

УДК [622.411.322.023.623:533.587:551.243].001.57

Минеев С.П., д-р техн. наук, профессор,
Прусова А.А., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
Сапегин В.Н., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
Янжула А.С., магістр,
Кишкань М.А., магістр
(ИГТМ НАН Украины)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ, ВМЕЩАЮЩЕМ ЗОНУ НАРУШЕННОСТИ, НАСЫЩЕННУЮ СОРБИРОВАННЫМ И СВОБОДНЫМ МЕТАНОМ

Мінеєв С.П., д-р техн. наук, професор,
Прусова А.А., канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
Сапегін В.Н., канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
Янжула О.С., магістр,
Кишкань М.А., магістр
(ИГТМ НАН України)

МОДЕЛЮВАННЯ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО ПРОЦЕСА У ВУГІЛЬНОМУ ПЛАСТІ, ЩО ВМІЩУЄ ЗОНУ ПОРУШЕНОСТІ, НАСИЧЕНОЮ СОРБОВАНИМ І ВІЛЬНИМ МЕТАНОМ

Mineev S.P., D.Sc.(Tech.), Professor,
Prusova A.A., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,
Sapehyn V.N., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,
Yanzhula A.S., M.S., (Tech.),
Kyshkan M.A., M.S., (Tech.)
(IGTM NAS of Ukraine)

MODELING OF FILTRATION PROCESSES IN THE COAL SEAM WITH DISPLACED ZONE SATURATED BY THE SORBED AND FREE METHANE

Аннотация. Рассмотрено исходное состояние зоны тектонического нарушения в геомеханическом пространстве угленосного массива и определены энергетический потенциал этой зоны и объем запасенного ею метана. Установлена закономерность изменения потенциальной энергии упругой деформации, позволяющая выполнять оценку потенциальной энергии конформеров молекулярной структуры угля, обуславливающих ее деформирование в области опорного давления.

Построена модель трещиновато-пористой структуры угля в области нарушения, состоящая из фрагментов различного масштабного уровня в иерархической структуре угля.

Моделирование фильтрационного процесса из угольного пласта основывалось на представлении угольного пласта как структурно-неоднородной системы в виде комбинаций нескольких участков, каждый из которых описывается средними значениями пористости и газовой проницаемости по методике Басниева К.С. Это позволяет для каждой комбинации участков пласта воспользоваться уравнением фильтрации Желтова Ю.П.

Задачу о десорбции метана из ядра зоны нарушения угольного пласта, свели к задаче

о суммарной диффузии метана из угольных фрагментов, разделенных нарушенной структурой угля. Для единичного источника десорбция описывается уравнением диффузии в сферических координатах. При установлении энергии активации и коэффициента диффузии использовалась модель Пейса-Дейтинера. Это позволило в задаче учесть такие основные параметры: константы, определяющие деформацию нарушенной структуры угля; параметры потенциала Ленарда-Джонса, характеризующие энергетическую связь между структурой угля и молекулами метана; диаметр молекулы метана и длину ее свободного диффузионного скачка; температуру угольного пласта.

Ключевые слова: угольный пласт, фильтрация, свободный метан, сорбированный метан, десорбция, диффузия.

В настоящее время одним из весьма важных вопросов при разработке высокоэффективных и безопасных технологий ведения горных работ является оценка газационных потоков метана в углепородном массиве, вмещающем зону нарушенности. Этой проблеме посвящено множество экспериментальных и теоретических работ [1- 7], но несмотря на это, в данной области отсутствует целостный алгоритм расчета фильтрационного потока метана, основанный на современных исследованиях, посвященных исходному состоянию зоны нарушенности в угольном массиве, особенностям ее газонасыщенности свободным и связанным с углем метаном, закономерностям десорбционной разгрузки угольного пласта, а также их влиянию на развитие фильтрационного процесса, происходящего в углепородном массиве при нарушении его равновесного состояния. В связи с этим, в работе была поставлена цель устранить перечисленные пробелы в этом направлении, поэтапно смоделировать фильтрационный процесс в угольном пласте, вмещающем зону нарушенности, насыщенную свободным и сорбированным метаном.

В отличие от ненарушенных зон, в нарушенных зонах, вследствие изменения структуры пласта, имеет место перераспределение напряжений и состояния метана, находящегося в нем в той или иной форме. Нарушенность структуры угля приводит к образованию новой системы пор и трещин. При этом распределение нарушений на всех масштабных уровнях носит характер некоторого распределения по протяженности пласта, вокруг этих нарушений располагаются области затухающих нарушений структуры угля и пород, в которых имеет место переход от ненарушенных углей к нарушенным и обратно. Это выражается в плавном изменении свойств массива и состояния метана в нем по мере, соответственно, приближения и удаления от нарушения. Изменения в пласте и вмещающих породах, как известно [8, 9], происходящие вследствие того или иного тектонического процесса, можно разделить на три основных типа – деформации крупных прогибов и поднятий, складчатые (пликативные) и разрывные (дизъюнктивные). При этом деформации крупных прогибов и поднятий обусловлены исключительно радиальными движениями земной коры, которые, чаще всего, имеют большой радиус. Колебания, вызывающие образование подобных форм совершаются медленно и ощутимых разрушений не приносят.

Два других типа нарушений имеют самое непосредственное влияние на структуру и свойства углепородного массива и состояние метана в нем. Склад-

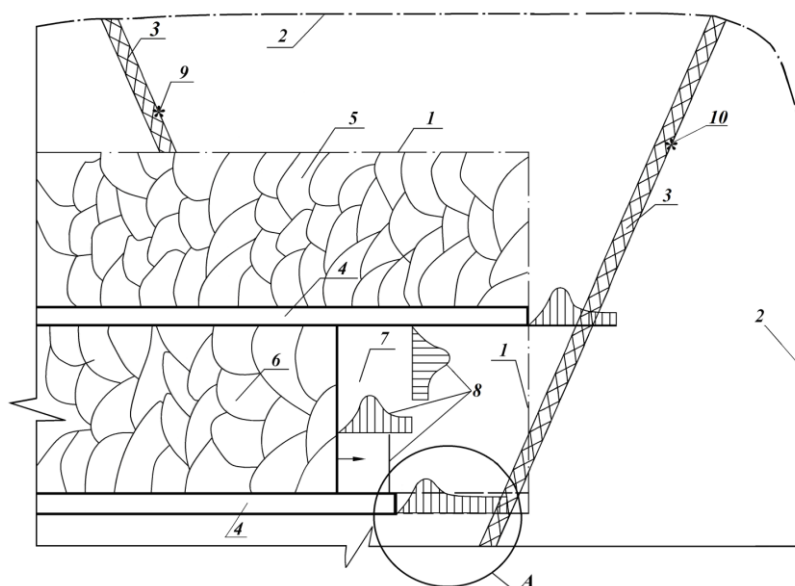
чатые деформации, как правило, не приводят к разрывам сплошности пластов и выражаются в изменении наклона их залегания, включающее также синклинали и антиклинальные деформации.

К разрывным нарушениям относят нарушения, приведшие к разрыву сплошности угольного пласта. Очень часто они накладываются друг на друга, создавая, таким образом, более сложные виды нарушений [4]. При этом характерно то, что складчатые и разрывные нарушения приводят к различным изменениям в структуре угля и в распределении метана в нем.

В областях складчатых нарушений синклинали типа могут создаваться условия для накопления метана в куполе синклинали при условии наличия сверху пород с низкой проницаемостью. В областях же разрывных нарушений будет иметь место смещение угля с вмещающими породами, что может приводить к скачкообразным изменениям, как свойств угольного пласта, так и концентрации метана в угле.

Несмотря на большое разнообразие типов тектонических нарушений, основным обобщенным параметром, которым можно охарактеризовать эти нарушения является энергетический потенциал этой зоны, которая, в какой-то период времени, претерпела изменения напряженно-деформированного состояния вследствие того или иного тектонического процесса. Для оценки энергетического потенциала нарушенной зоны угольного пласта рассмотрим включающее тектоническое нарушение геомеханическое пространство [8], представляющие собой обрабатываемый участок шахтопласта, оконтуренный замкнутой поверхностью, в пределах которого велись и ведутся горные работы (рис. 1). Вокруг этого пространства, который можно рассматривать, как некий единый комплекс, включенный в виде полости в породный массив, возникает опорное давление, называемое геодинамическим давлением [10] (рис. 1). Когда в процессе развития горных работ область геодинамического опорного давления достигает зоны нарушенности, то это приводит к ее энергетической подзарядке от дополнительного напряженного состояния, обусловленного геодинамическим давлением. При этом в пределах шахтного поля зоны нарушенности создают локальные накопления потенциальной энергии. В некоторых случаях на участках неустойчивого равновесия имеют место динамические проявления горного давления, в результате чего реализуется неконтролируемый переход накопленной нарушенными зонами потенциальной энергии в кинетическую. Эта энергия складывается из энергии, накопленной за миллионы лет в нетронутом горными работами углепородном массиве и от притока энергии в результате пересечения зоны геодинамического пространства. По данным работ [10, 11], среднее значение энергии, выделяемой нарушенной зоной угольного пласта в процессе динамического явления, составляет 10^5 Дж. К нарушенной области примерно с такой же потенциальной энергией подходят очистные и подготовительные забои. Результатом их взаимодействия будет изменение фильтрационных потоков метана в призабойной зоне угольного пласта. Таким образом, судя по интенсивности проявления динамических явлений в области геодинамического давления,

обусловленных зонами средней степени нарушенности угля, за исходное значение их потенциала можно принять энергию, равную 10^5 Дж.



1 – граница геомеханического пространства шахтопласта; 2 – граница геодинамического опорного давления; 3 – тектоническое нарушение; 4 – оконтуривающие лаву выработки; 5 – выработанное пространство отработанной лавы; 6 – выработанное пространство отрабатываемой лавы; 7 – угольный целик отрабатываемой лавы; 8 – опорное давление; 9, 10 – области динамического проявления горного давления; А – узел ожидаемого пересечения нарушения с угольным пластом

Рисунок 1 – Схема формирования геомеханического пространства, вмещающего тектонические нарушения

Следующим важным этапом является установление объема газа, содержащегося в зоне тектонической нарушенности. Ранее в процессе исследований трансформации молекулярной структуры угольного пласта, находящегося под действием горного давления достаточно большой период времени [12], установлено, что особенности деформирования молекулярной структуры угля определяются, в первую очередь, ее механическим поведением, как микроструктуры высокомолекулярного вещества, поэтому она имеет сложную природу упругости, характеризующуюся сильно выраженными временными свойствами деформирования [13]. Вследствие этого, в нетронутом угольном массиве релаксационное последствие длится многие годы и кажущееся состояние равновесия не является истинным [12]. То есть, в нетронутом угольном массиве с течением времени происходит процесс перестройки молекулярной структуры угля, характеризующийся изменением конформаций. Последние представляют собой пространственное расположение атомов, которое может изменяться под воздействием внешних факторов без разрушения химических связей между атомами [14]. На рисунке 2 изображен конформер молекулярной структуры угля и характерная зависимость потенциальной энергии конформера от значения торсионного угла. Процесс перестройки молекулярной структуры угля происходит

в результате преодоления энергетических барьеров, препятствующих такой перестройке, определяемых энергией активации конформаций. Этот процесс описывается также спектром времен релаксации, который соответствует указанным барьерам конформационных переходов (рис.3) [14, 15]. Последние, в свою очередь, определяют конформационную подвижность макромолекул угля и тем самым являются основой деформационного поведения угольного пласта.

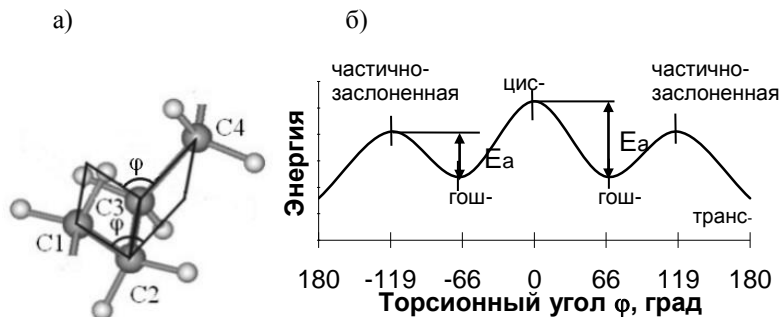


Рисунок 2 - Конформер молекулярной структуры угля (а) и характерная зависимость потенциальной энергии конформера от значения торсионного угла φ (б), где E_a – энергия активации конформационных переходов [20]

Если за исходное значение потенциала зоны средней степени нарушенности угля принять энергию порядка 10^5 кДж/моль, то с учетом данных работы [15], представленных на гистограмме 3, можно считать, что в результате тектонического процесса и

геодинамического давления в угольном пласте реализовывались все конформации, энергия которых $\leq 10^5$ Дж/моль. Это составляет около 50% из числа всех возможных конформаций в молекулярной структуре угля, обуславливающих нарушение структуры твердого скелета и геометрии пор в угле.

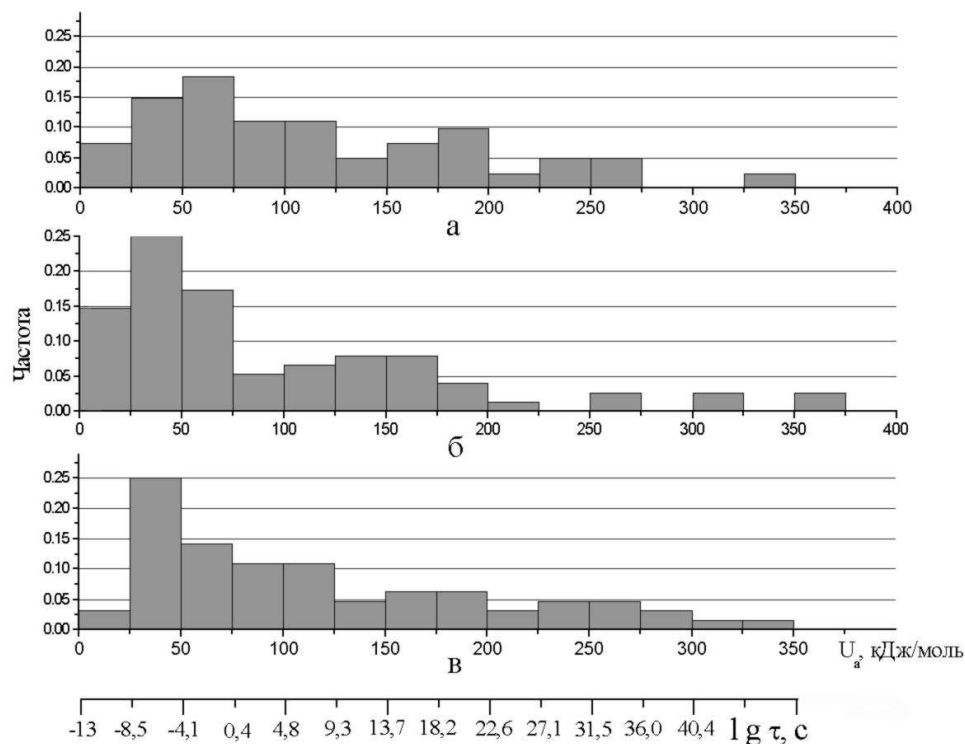


Рисунок 3 - Гистограммы частот энергии активации конформационных переходов в молекулярной структуре угля U_a с содержанием углерода 87,7% (а), 89,1% (б) и 91,26% (в) и соответствующие им времена релаксации τ [15]

Численный расчет параметров, характеризующих процесс деформирования молекулярной структуры угля, показал [12], что с течением времени в угле, находящемся длительный период времени под воздействием геостатического давления, в результате релаксационного процесса происходит отщепление от алифатической бахромы атомов метильной группы и водорода. При их химическом взаимодействии в угольном массиве реализуется генерация молекул метана. Объем этого метана определяется, в первую очередь, температурой и степенью метаморфизма угля [12]. При этом для угольного пласта, залегающего на глубине 1000 м, объем образовавшегося таким путем метана в угле с содержанием углерода 87,7% равен $65 \text{ м}^3/\text{т}$; 89,1 % – $29 \text{ м}^3/\text{т}$; 91,2 % – $60 \text{ м}^3/\text{т}$. Следует отметить, что при реализации энергии $\leq 10^5 \text{ Дж/моль}$, обусловленной тектоническими подвижками в массиве, в молекулярной структуре угля не будет происходить отщепление от алифатической бахромы атомов метильной группы и водорода, которые могут образовывать дополнительные молекулы метана в угле [12]. То есть можно считать, что в начальном состоянии нарушенная зона насыщена метаном, генерированным в угольном массиве в результате только релаксационного механизма деформирования молекулярной структуры угля. За счет этого образовавшиеся молекулы метана сразу же вступают в сорбционную связь с микроструктурой угля, поскольку она имеет характер, преимущественно, физического взаимодействия дисперсионного типа [12], а ее энергия составляет величину порядка 10-20 кДж/моль. Эти взаимодействия описываются Ван-дер-ваальсовыми силами, которые можно рассматривать как процессы с наличием возвращающей и возмущающей сил, где функции возвращающей силы выполняет энергия межатомного взаимодействия, а возмущающей – энергия теплового движения [16]. Причем, поскольку Ван-дер-ваальсова связь является делокализованной [10], то адсорбированные молекулы способны перемещаться вдоль поверхности сорбента независимо от величины и перепада геостатического давления. В результате этого метан, образовавшийся, преимущественно, в межпоровом пространстве угля, диффундировал (рис. 3) в направлении пониженной концентрации и заполнял микро- и мезопоры. По мере их заполнения, молекулы метана по фильтрационным каналам покидали угольный пласт, переходя во вмещающие пласт породы. При этом объем сорбированного в угле метана, который, покинув угольный пласт, перешел в свободное состояние и распределился во вмещающих породах, оценивается сорбционной емкостью угля при данных термодинамических условиях. На основе алгоритма [15, 18], описывающего систему адсорбированный метан – микропористое пространство, как термодинамическую систему, характеризующуюся объемом энергии как внутри системы, так и внешней среды, проводился расчет метана, который в процессе фильтрации во вмещающие породы остался в угольном пласте. В результате получено следующее уравнение для энтропии сорбированного метана

$$S = C_V \ln(T) + R \ln(\theta\theta + RT \left(\frac{\partial \ln k'_1}{\partial T} \right)_\theta) + R \ln(k'_1) - R \ln \frac{\theta}{1-\theta} - R \frac{\theta}{1-\theta}, \quad (1)$$

где C_V – молярная теплоемкость метана; T – температура пласта; R – радиус пор; θ – степень заполнения пор метаном; k'_1 – константа Генри [19].

Результаты расчета энтропийного фактора TS от степени заполнения пор метаном при различных температурах, представлены на рисунке 4. Как видно из этого рисунка, энтропийный фактор имеет максимум при степени заполнения пор метаном, равной 0,40-0,45. Это значит, что при данном насыщении пор метаном состояние системы наиболее вероятно, а, следовательно, и более выгодно энергетически. Выше этого значения метан стремился покинуть пору, а ниже – стремился сорбироваться в ней. При этом возрастание энтропийного фактора в точке сорбционного равновесия ($\theta = 0,40$) свидетельствует об интенсификации подвижности молекул метана с повышением температуры пласта. Причем этот вывод справедлив для любой температуры угольного пласта, а следовательно и для любой глубины его залегания.

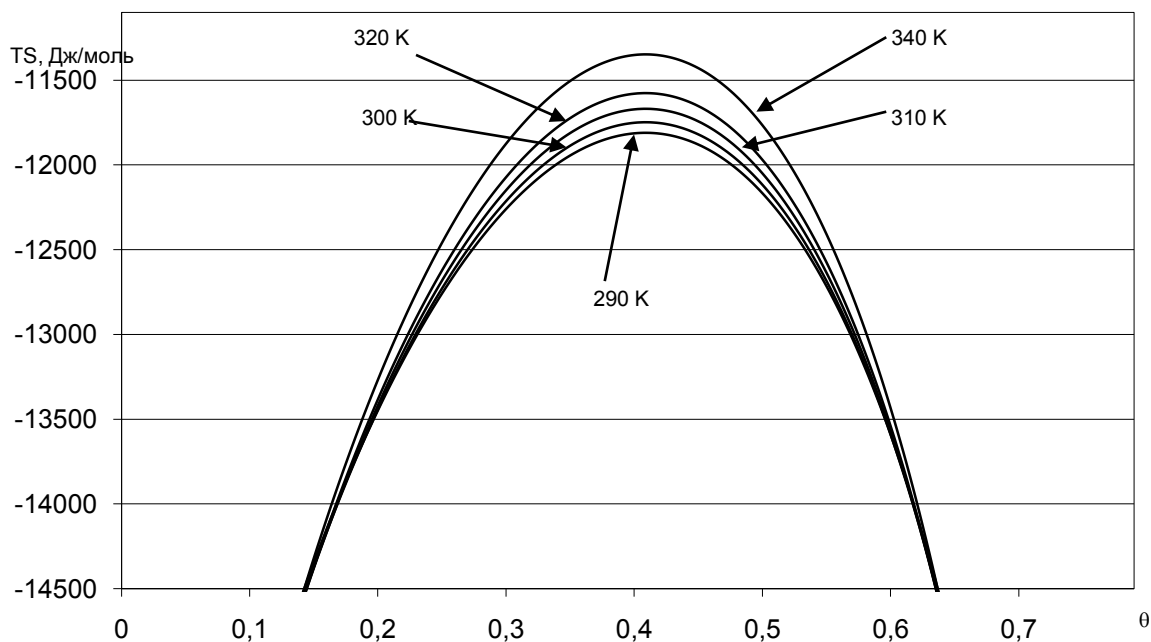


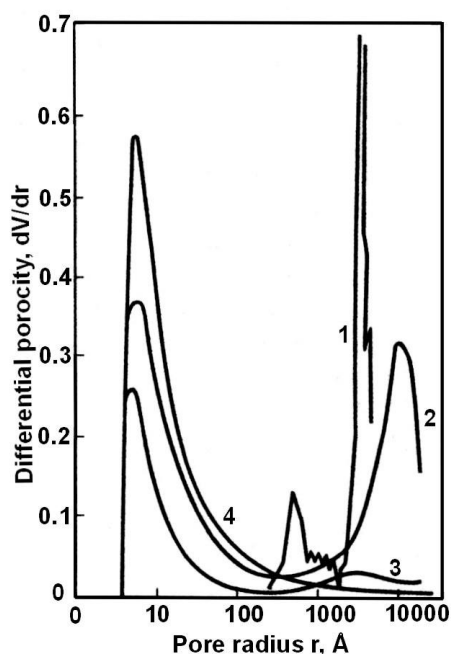
Рисунок 4 – Зависимость энтропийного фактора TS от степени заполнения пор метаном θ при различных температурах

То есть, в процессе генерирования в угольном массиве метана, обусловленного релаксационным механизмом деформирования молекулярной структуры угля, в нем осталось около половины объема этого газа. Остальной газ, объемы которого доходят до 30 и более $\text{м}^3/\text{т}$, мигрировал и перешел во вмещающие угольный пласт породы. Причем этот газ находится в породах уже не в связанном, а, в основном, в свободном состоянии.

Таким образом, можно считать, что в начальном состоянии угольный массив

был насыщен связанным метаном в зависимости от температуры пласта и степени метаморфизма угля в объеме до $35 \text{ м}^3/\text{т}$, распределенном в поровом и межпоровом пространстве угля с весьма сильными сорбционными связями [20], энергия которых равна $10\text{-}20 \text{ кДж/моль}$ [19]. При этом сорбционный диаметр пор, по данным работы [15], не зависит от размера пор и составляет $6,8 \text{ \AA}$.

Когда в результате подвижек в массиве горных пород зарождаются зоны нарушенности, сопровождающиеся притоком значительных энергий, в результате чего реализуется конформационные перестройки в молекулярной структуре угля, то происходит дезинтеграция структуры угля, перераспределение пористости и связанного с углем метана. На рисунке 5 представлено типичное распределение пор по размерам для природных углей [21]. Из этого рисунка видно, что поры с наименьшим в угле диаметром не исчезают совсем, а только уменьшается их число.



1 – графит; 2 – брикет природного угля; 3, 4 – образец нарушенного и ненарушенного угля

Рисунок 5 – Распределение пор по размерам для типичных образцов природных углей и эталонных сорбентов (графита) [21]

Это свидетельствует о том, что в нарушенном угле может оставаться до 40% пор с диаметром, присущим пустотам ненарушенного угля. Кроме того, как отмечается в работе [22], размеры ненарушенного фрагмента угля, то есть участка образца угля, не содержащего пустот более $3 - 4 \text{ нм}$, существенно (примерно в 7 раз) различаются для нарушенного и ненарушенного пласта и составляют соответственно $1,7 \cdot 10^{-4}$ и $12,4 \cdot 10^{-4} \text{ см}$. При этом появляется до 20% субмакропор, образованных фольмеровскими и кнудсеновскими порами, образуются также микро и макро – трещины. В связи с этим, учитывая исследования, проведенные Ходотом В.В. [21], диффузия различных типов будет происходить в порах нарушенного угля, радиус которых не превышает 500 \AA ,

а фильтрация начнет реализовываться в субмакропорах радиусом от 500 \AA до 5000 \AA . Интенсивная ламинарная фильтрация будет иметь место в макропорах и трещинах от $5 \cdot 10^3 \text{ \AA}$ до $1 \cdot 10^6 \text{ \AA}$. В видимых трещинах размером более 10^6 \AA , может реализовываться турбулентная фильтрация метана в угле.

По мере увеличения нарушенности угля, имеет место уменьшение среднего расстояния между трещинами, как видно из рисунка 6, которое сопровождается уменьшением их зияния. Таким образом, имеет место двоякий процесс: с одной стороны количество трещин растет, с другой – их зияние уменьшается.

Исходя из рассмотренных выше особенностей строения угольного пласта в нарушенных зонах, модель трещиновато-пористой структуры угля в зоне на-

рушенности угольного пласта будет иметь следующий вид. В центральной части нарушенной зоны имеет место «перемятая» зона, которая на самом малом масштабном уровне представлена ненарушенными фрагментами угля размером до 7 раз меньше, чем в ненарушенном угле.

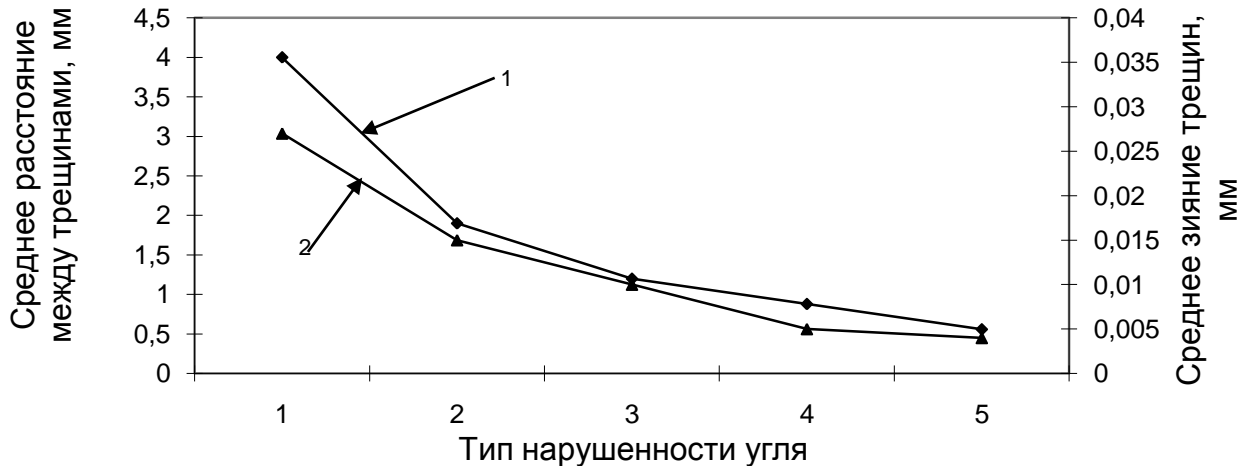


Рисунок 6 – Изменение среднего расстояния между трещинами (1), и среднего зияния трещин (2) в углях различных типов нарушенности [21]

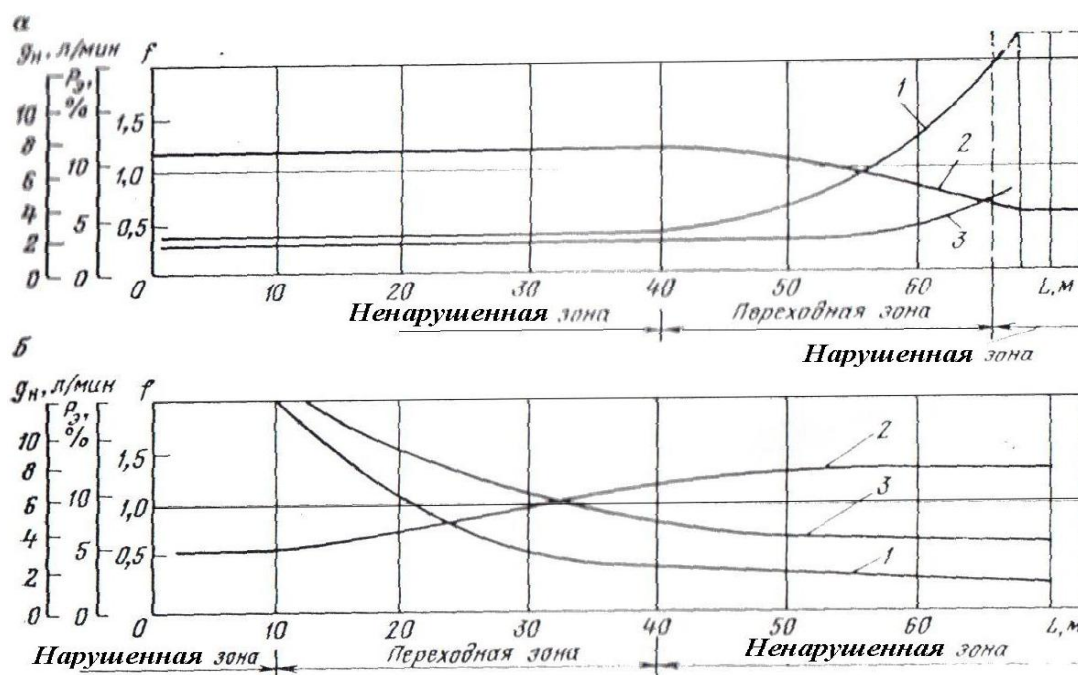
Это приводит к его переуплотнению, что внешне проявляется в изменении мощности пласта, а внутренне – в образовании новых систем трещин. Причем подобного рода разрушение может приводить и к снижению общей проницаемости угля. В этих ненарушенных фрагментах метан находится в сорбированном состоянии в микропорах и межпоровом пространстве [15]. Они являются основным резервуаром метана в нарушенной зоне угля, где содержится до 80% этого газа. В связи с этим, они представляют собой основные источники десорбции метана в угольном пласте при нарушении его равновесного состояния. Способом его миграции является, преимущественно, твердотельная диффузия.

Следующий масштабный уровень составляет совокупность ненарушенных фрагментов угля, между которыми располагаются субмакропоры радиусом более 500 \AA , в которых начинает реализовываться фильтрация метана. Указанную «перемятую» область, насыщенную сорбированным метаном в микропорах и свободным в субмакропорах, можно назвать ядром нарушенной зоны. Далее идут крупномасштабные образования в иерархической структуре угля [23], составленные отдельностями, рассеченными трещинами, которые насыщены только свободным метаном. Эта область называется переходной зоной, где реализуется лишь фильтрация метана. Закономерности изменения свойств угля в этой зоне представлены на рисунке 7 [7].

В процессе приближения горных работ к зоне нарушенности она оказывается в области влияния опорного давления (рис. 8).

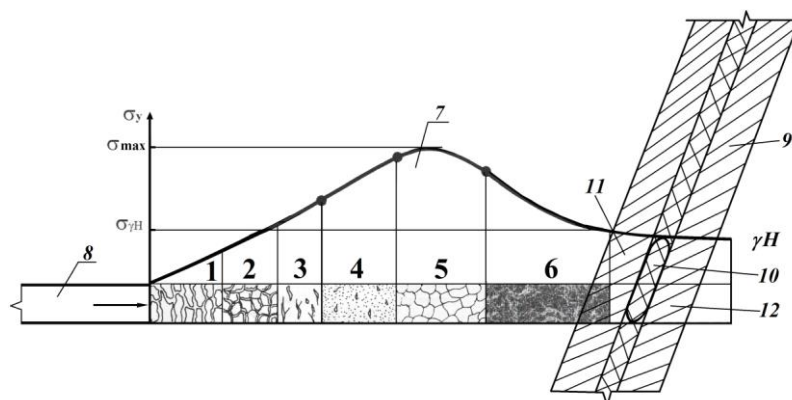
Отрабатываемый угольный пласт в этой области находится в различном напряженно-деформированном состоянии и вследствие этого характеризуется зональной структурной неоднородностью [24], как показано на рисунке 8. В этом случае фильтрационные процессы в угольном пласте, вмещающего зону нарушенности, будут определяться напряженным состоянием в зоне опорного дав-

ления, ее геометрическими параметрами, распределением в ней давления газа, а также энергией упругой деформации. В связи с этим, прежде всего, необходимо установить основные закономерности, характеризующие зону опорного давления угольного пласта при ее приближении к нарушенной зоне. Эти исходные данные определялись следующим образом.



1 – начальная скорость газовыделения g_n ; 2 – коэффициент крепости угля f ;
3 – эффективная пористость угля p_3

Рисунок 7 –Обобщенные графики изменения свойств угольного пласта в переходной зоне:
(а) - при входе забоя в нарушенную зону, (б) - при выходе забоя из этой зоны



1-6 – зоны различной структуры в области опорного давления; 7 - угольного пласта; 8 – проводимая выработка; 9 – тектоническое нарушение; 10 – ядро зоны нарушенности;
11, 12 – переходные зоны

Рисунок 8 – Схема пересечения забоем выработки тектонического нарушения

Напряжения в зоне предельного состояния между обнажением пласта и пиком горного давления определялись, на основе результатов работы Линькова А.М. [25] по формулам

$$\sigma_{y1} = \sigma_k - k_* \cdot \frac{x}{h}; \quad \sigma_{x1} = -k_* \cdot \frac{x}{h}; \quad (2)$$

где σ_{y1} ; σ_{x1} — нормальные напряжения на площадках, параллельных и перпендикулярных плоскости угольного пласта; σ_k — нормальные напряжения около обнажения пласта; k_*/h — темп нарастания опорного давления; h — полумощность пласта; $\sigma_k = -\sigma_{куб}$; $k_* = \sigma_{куб}$; $\sigma_{куб}$ — кубиковая прочность угля на поверхности забоя.

Напряжения в упругой зоне угольного пласта σ_y за пиком горного давления определяются по формуле, полученной на основе разницы между напряжением в пике горного давления и напряжением в нетронутым массиве с учетом результатов работы [25]

$$\sigma_y = \sigma_{y1m} + (\sigma_{\gamma H} - \sigma_{y1m}) \cdot \frac{x - a}{l' - a} \quad \text{для } l' \geq x \geq a, \quad (3)$$

где σ_{y1m} — максимальные вертикальные нормальные напряжения в пике максимума опорного давления, определяемые по формуле:

$$\sigma_{y1m} = -0,96 \cdot \left| \frac{k_1^2 \cdot k_*}{h} \right|^{\frac{1}{3}} \cdot d_a(b), \quad (4)$$

где k_1 — коэффициент интенсивности напряжений; $d_a(b)$ — функции зависящие от σ_k , k_1 , k_* и h , определяемые по данным работы [25]; $\sigma_{\gamma H}$ — горное давление в зоне нетронутого массива; l' , l — длина зоны опорного давления, соответственно, в процессе и в начале отработки угольного пласта, определяемые по статистическим зависимостям, приведенным в работе [26]

$$l' = l \cdot (1 - e^{-0,015 \cdot (S + 0,03 \cdot H)}); \quad (5)$$

$$l = 138 \cdot (1 - e^{-0,0026 \cdot (H + 60)}) \cdot (1 - e^{-0,285 \cdot (m_{пл} + 0,75)}), \quad (6)$$

где S — ширина выработанного пространства; $m_{пл}$ — мощность угольного пласта.

Длина упругой зоны l_y за пиком горного давления с учетом (5) и (6) будет равна

$$l_y = l' - a, \quad (7)$$

где a — расстояние от забоя пласта до максимума горного давления, определяемое по формуле [25]

$$a = 0,96 \cdot \left| \frac{k_1}{k_*} \cdot h \right|^{2/3} \cdot f_a(b), \quad (8)$$

где $f_a(b)$ — функция, аналогичная функции $d_a(b)$ в формуле (3), которую определяют по данным работы [25].

Зависимость газового давления p от расстояния x до забоя пласта и его связь с горным давлением устанавливали на основе теоретических и шахтных данных, приведенных в работах Линькова А.М. [25]

$$\frac{p(x)}{p_u} = \frac{p_a}{p_u} + 0,85 \cdot \frac{x}{\xi_0}, \quad (9)$$

где p_u – пластовое давление газа в нетронутом массиве; p_a — барометрическое давление на забое пласта; x – расстояние от забоя очистной выработки до расчетной точки в зоне опорного давления, определяемое по формуле [1]

$$x = \frac{a}{\gamma_\phi} \text{Ln} [C_k \times e^{\chi_0 / z(\beta_g) - z(\beta_g)} - C_k + 1], \quad (10)$$

где $\chi_0 = \frac{p_u \cdot k_{\phi u} \cdot \gamma_\phi}{\vartheta \cdot \mu \cdot k_g \cdot a}$; $z(\beta_g)$, $z(\beta_a)$ – параметры, зависящие от соотношения давлений p/p_u и p_a/p_u ; ξ_0 – характерное расстояние, отсчитываемое от забоя пласта до точки в которой давление газа p составляет $0,85 p_u$; $k_{\phi u}$ – коэффициент газовой проницаемости угля в нетронутом массиве; b_ϕ – эмпирический коэффициент, равный $0,2 \cdot 10^6$; ϑ – скорость продвижения забоя; μ – динамическая вязкость метана;

$$k_g = V_{gu} \cdot \frac{p_a}{p_u}, \quad (11)$$

где V_{gu} – исходное газосодержание в пласте;

$$\gamma_\phi = b_\phi \cdot k_c \cdot \theta_* + b_\phi \cdot |\sigma_{y1m}|; \quad (12)$$

k_c – модуль всестороннего сжатия; θ_* – относительное увеличение объема угля при полном его разрушении.

Распределение давления газа p в призабойной области пласта в случае, когда соотношение $x/\xi_0 \leq 1,19$ устанавливается по формуле (9). Если это соотношение $\geq 1,19$ то считают, что текущее давление газа не изменяется и равно пластовому [25].

Расчет потенциальной энергии деформации для равнокомпонентного поля напряжений в зоне предельного состояния U^n и в упругой зоне U^y проводился с использованием зависимостей, приведенных в работе [25] по формулам

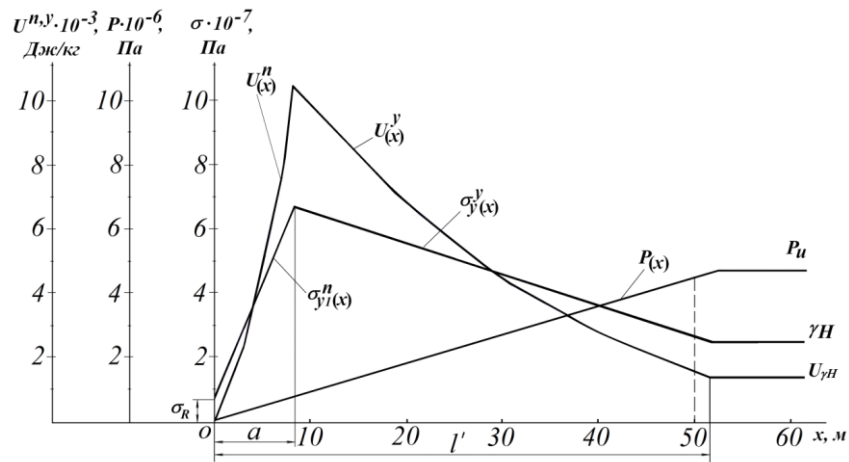
$$U^n = \frac{3\sigma_{y1}^2 \cdot (1-2\nu)}{2E}; \quad U^y = \frac{3\sigma_y^2 \cdot (1-2\nu)}{2E}, \quad (13)$$

где E – модуль упругости угля; ν – коэффициент Пуассона.

При численном расчете принимались следующие исходные данные для квадратного сечения выработки: $\nu = 0,4$; $H=1000$ м; $l' = 49$ м; $\rho = 2600$ кг/м³; g

$= 9,8 \text{ М/с}^2$; $a = 8,5 \text{ м}$; $\sigma_{y1m} = 6,73 \cdot 10^7 \text{ Па}$; $E = 10^8 \text{ Па}$; $2h = 2 \text{ м}$; $x_0 = 50 \text{ м}$; $k_* = \sigma_k = \sigma_{\text{куб}} = 7,5 \cdot 10^6 \text{ Па}$; σ_{y1} изменялось от $\sigma_k = 7,5 \cdot 10^6 \text{ Па}$ в зоне обнажения угольного пласта до $\sigma_{y1m} = 6,7 \cdot 10^7 \text{ Па}$ в пике опорного давления; $p_u = 5 \text{ МПа}$; $k_{\phi u} = 10^{-15} \text{ м}^2$; $\vartheta = 1 \text{ м/сут}$; $k_g = 1$; $\gamma_{\phi} = 13,6$; $a = 8,5 \text{ м}$; $C_k = 10^5$; $\mu = 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\chi_0 = 69,6$; $\xi_0 = 50 \text{ м}$.

Результаты расчета вертикальных напряжений, давления газа на различном расстоянии от забоя пласта и потенциальной энергии деформации представлены на рисунке 9.



$P(x)$ – давление газа в зоне опорного давления; P_u – пластовое давление; $\sigma_{y1}^n(x)$, $\sigma_{y1}^y(x)$ – главные нормальные напряжения, соответственно, в предельной и упругой области; $U^n(x)$, $U^y(x)$ – потенциальная энергия деформации, соответственно, в предельной и упругой области; a – расстояние до *тах* опорного давления; l' – длина зоны опорного давления

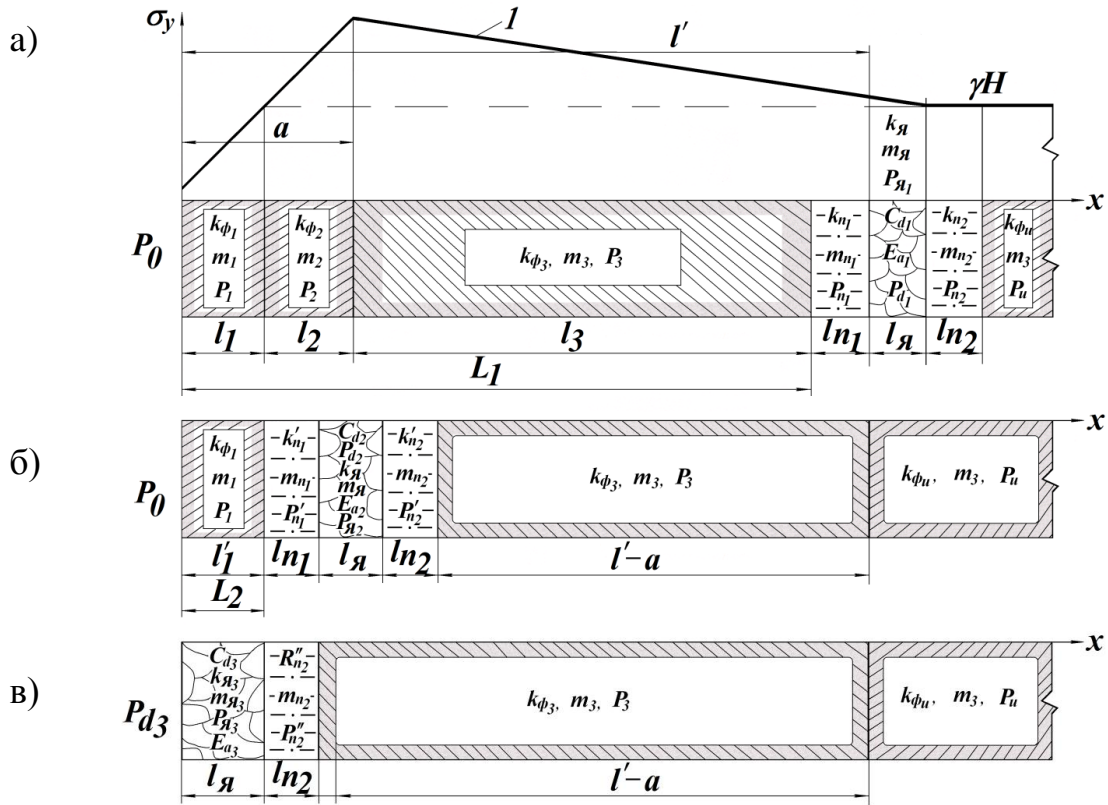
Рисунок 9 – Закономерности изменения основных параметров, определяющих исходное состояние угольного пласта при подходе к зоне тектонического нарушения

Таким образом, десорбция метана из ядра нарушенной зоны будет определяться перепадом концентрации метана на границе с фильтрационной зоной и приращением потенциальной энергии деформации, изменяющейся по мере подвигания этой области по зоне опорного давления, как показано на рисунке 9. Это обусловлено дополнительными конформационными перестройками в уже нарушенной структуре угля, определяющими энергию активации диффузии метана в этой зоне пласта. Фильтрация свободного метана в пласте будет определяться перепадом концентраций десорбирующего метана на границе с переходными областями, изменением пористости и проницаемости угля в данной зоне опорного давления, дополнительными объемами метана, перетекающими из переходной зоны.

Основываясь на закономерностях изменения структуры угольного пласта в призабойной области с учетом результатов работы [24], можно считать, что пористость изменяется по закону компрессии, в соответствии с которым между пористостью и напряжением существует связь экспоненциального вида

$$m_i = a e^{\sigma_i}, \tag{14}$$

где m_i – показатель пористости, соответствующей напряжению σ_i , где $i = 1 \div 4$ как показано на рисунке 10; a, b – коэффициенты, значения которых определяются нормальным к пласту напряжением на соответствующем участке опорного давления по зависимостям, установленным в работе [24].



1 – опорное давление; k_{ϕ_i} – коэффициент газовой проницаемости; m_i – пористость; P_i – давление свободного метана; C_{d_i} – концентрация сорбированного метана; E_{a_i} – энергия активации десорбции; P_{d_i} – давление десорбирующегося метана; «i», «я», «n», «u» - индексы, соответственно, зоны угольного пласта, ядра нарушенной области, переходных зон и пласта вне области опорного давления

Рисунок 10 - Схемы расположения области тектонического нарушения по отношению к забою выработки (а, б, в) с указанием основных фильтрационных, десорбционных и геометрических параметров различных структурных зон угольного пласта

В переходной зоне пористость можно определить по данным экспериментальных замеров, представленных в работе [7], имеющих вид:

- при входе в нарушенную зону:

$$p_m = \exp(1,19 - 0,025 \cdot L - 0,002 \cdot L^2), R_k = 0,65 \pm 0,08; \tag{15}$$

- при выходе из нарушенной зоны [7]:

$$p_m = \exp(2,9 - 0,4 \cdot L + 0,0004 \cdot L^2), R_k = 0,85 \pm 0,05, \tag{16}$$

где L – подвигание забоя к середине нарушенной зоны.

Коэффициент газовой проницаемости угля обычно определяют как функцию от напряжения в зоне опорного давления по известным формулам А.М. Линькова [25], имеющих следующий вид для области предельного и упругого состояния, соответственно

$$k_{\phi} = k_{\phi T} \cdot [(C_{\phi} - 1) \cdot e^{b_{\phi} \cdot k_c \cdot \theta_*} \cdot e^{-(b_{\phi} \cdot k_c \cdot \theta_* + b_{\phi} \cdot |\sigma_{y1m}|) \cdot \xi / a} + 1]; \quad (17)$$

$$k_{\phi} = k_{\phi T} \cdot [(C_{\phi} - 1) \cdot e^{-b_{\phi} \cdot |\sigma_{y1}|} + 1], \quad (18)$$

где коэффициент $C_{\phi} = \frac{k_{\phi p}}{k_{\phi T}}$; $k_{\phi p}$ – газопроницаемость угля в разгруженном состоянии;

$k_{\phi T}$ – минимальная газопроницаемость угля в нагруженном состоянии, когда при определенной величине напряжений в основном прекращается процесс фильтрации свободного газа; ξ – расстояние от забоя очистной выработки до расчетной точки в зоне предельного состояния $\xi \leq a$.

При моделировании решения задач фильтрации угольный пласт представим как структурно-неоднородную систему в виде комбинаций нескольких участков, находящихся в различных зонах опорного давления и вмещающих зону нарушенности (рис. 10). Каждый из этих участков имеет свои средние значения пористости и газовой проницаемости, определяющиеся по известной методике Басниева К.С. [27]. Тогда, реализовать эту методику, можно для каждой комбинации участков с использованием уравнения фильтрации Желтова Ю.П. [28], решение которого в приближенной форме является решением уравнения нестационарной фильтрации газа Лейбензона Л.С. [29]. В одномерной постановке уравнение Желтова Ю.П. имеет вид [28]

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k_{\phi}}{\mu \cdot m} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot p \cdot \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (19)$$

где p – текущее давление газа в пласте; t – время; k_{ϕ} , m – соответственно средняя газовая проницаемость и пористость угля в исследуемой зоне пласта.

При установлении граничных и начальных условий для решения уравнения фильтрации (19) необходимо учесть наличие перемятой области в зоне нарушенности, где при фильтрации свободного газа будет иметь место процесс активации десорбции метана. Данный процесс, как известно [15], происходит не одновременно с развитием фильтрации, а с некоторым запаздыванием, равным времени t_3 . Это время обусловлено временем релаксации конформационных перестроек в молекулярной структуре угля в результате нарушения ее равновесного состояния [15]. В связи с этим, уравнение (19) необходимо решать в два этапа. Сначала необходимо рассмотреть фильтрацию лишь свободного метана, а затем фильтрацию метана при $t > t_3$ с учетом десорбции метана из ядра нарушенной зоны. Таким образом, для самого общего случая, когда зона нарушен-

ности полностью находится в области условного опорного давления, под которым понимается аналогичная область угольного пласта, не вмещающая зону нарушенности (рис. 10 б), необходимо решать две следующие задачи фильтрации, описываемые уравнением (19).

Задача 1 – определение давления метана $P_1(x,t)$ при фильтрации в случае отсутствия десорбции из ядра нарушенной зоны при следующих начальных и граничных условиях

$$x = 0, \quad t = 0, \quad P_1 = P_a \quad (20)$$

$$x \text{ при } \sigma_y = \gamma H; \quad P_1 = P_u \quad (21)$$

Задача 2 – определение давления метана $P_2(x,t)$ при фильтрации с учетом десорбции из ядра нарушенной зоны $P_d(x,t)$ при следующих начальных и граничных условиях:

$$\text{при } x = 0, \quad t = 0, \quad P_2 = P_a \quad (22)$$

$$\text{при } x = l'_1 + l_{nl}, \quad t > t_3, \quad P_2 = P_1 + P_d. \quad (23)$$

Давление десорбирующегося метана из ядра нарушенной зоны будет складываться из давления десорбции сорбированного метана, генерированного в угольном массиве $P_{d,2}$ объем которого составляет, как отмечалось выше, 0,4 объема микропор, и давления десорбции метана адсорбированного микропорами в результате перетока газа из переходной зоны $P_{d,ad}$: $P_d = P_{d,2} + P_{d,ad}$. При этом объем адсорбированного метана нетрудно установить по перепаду давления на границе ядра с переходной зоной по известным экспериментальным кривым адсорбции, приведенными в работе [30].

Общее решение рассматриваемой задачи фильтрации будет иметь вид:

$$P(x,t) = P_1(x \geq 0; t \leq t_3) + P_2(x \leq l'_1 + l_{nl}; t > t_3) + P_1(x > l'_1 + l_{nl}; t > t_3). \quad (24)$$

Решение задачи фильтрации при вариантах расположения зоны нарушенности, представленных на рисунках 10 а и 10 в являются частными случаями общего решения уравнения (24).

Давление метана, десорбирующегося из ядра нарушенной зоны P_d в выражении (23) можно определить следующим образом.

Поскольку, как отмечалось ранее, внутри перемятой зоны ядра способом миграции сорбированного метана при активации процесса десорбции является, преимущественно, твердотельная диффузия, то для установления закономерности изменения давления десорбирующегося метана можно воспользоваться молекулярной моделью Пейса - Дейтинера [15, 31]. Эта модель наиболее полно связывает параметры молекулярной структуры угля с его диффузионной способностью и учитывает локальные взаимодействия между молекулами метана и сегментами структурной цепочки угля. В соответствии с этой моделью, основными факторами, определяющими возбуждение десорбции метана и условия развития диффузионного потока десорбирующегося газа, является энергия ак-

тивации и подвижность молекул метана в угольной среде в данных термодинамических условиях. При этом энергия активации диффузии определяется как сумма энергии межмолекулярного и внутримолекулярного взаимодействия. Эти параметры, в свою очередь, зависят, в основном, от диаметра молекулы диффузанта, длины структурной цепочки и длины диффузионного скачка. Энергия активации диффузионного скачка определяется разностью потенциальной энергии между равновесным состоянием сорбционной системы и активированным. Энергия активации диффузии, то есть десорбции метана в ядре нарушенной зоны, в соответствии с работой [15], будет выражаться соотношением

$$E_a = 5,23 \left(\frac{\beta}{d'} \right)^{1/4} \left(\frac{\varepsilon^* r^*}{\lambda^2} \right)^{3/4} \left\{ 0,077 \left[\left(\frac{r^*}{l} \right)^{11} (l - 10d') - r^* \left(\frac{r^*}{r^* + d} \right)^{10} \right] - \right. \\ \left. - 0,580 \left[\left(\frac{r^*}{l} \right)^5 (l - 4d') - r^* \left(\frac{r^*}{r^* + d} \right)^4 \right] \right\}^{3/4}, \quad (25)$$

где ε^* и r^* – средние значения параметров потенциала Ленарда-Джонса характеризующее энергетическую связь между молекулами метана угольного вещества; λ – среднее расстояние между структурными сегментами нарушенного угля; β – константа, характеризующая деформацию валентного угла молекулярной структуры угля на единицу длины сегмента; $d' = d + r^* - l$ – эквивалентный диаметр молекулы метана; l – расстояние между структурными цепями нарушенного угольного вещества, определяемое энергетическим потенциалом молекулярной структуры угля.

Уравнение связи коэффициента диффузии молекул метана с физическими и молекулярными свойствами системы сорбат- сорбент в соответствии с этой моделью имеет вид [15]:

$$D_d = (9.1 \times 10^{-4}) \frac{\bar{L}^2}{\lambda^2} \left(\frac{\varepsilon^*}{r^*} \right)^{5/4} \left(\frac{\sqrt{\beta}}{m^*} \right)^{1/2} \frac{d'}{\partial E_a / \partial d} \exp \left(- \frac{E_a}{RT} \right), \quad (26)$$

где m^* – молекулярная масса единицы длины структурного сегмента; \bar{L} – длина свободного диффузионного скачка молекулы метана; R – газовая постоянная; T – температура пласта.

При моделировании диффузии десорбирующегося метана из ядра нарушенной зоны в переходную, в которой основными источниками метана, как отмечалось ранее, являются ненарушенные фрагменты угля, разделённые нарушенной структурой угля, будем полагать, что начальная концентрация сорбированного метана в ненарушенном сферическом фрагменте угля радиусом R_0 равна $c(r, 0) = c_0$ а концентрация метана в трещинах, полностью или частично окружающих его, составляет $c(R_0, t) = c_1$, соответствующее давлению P_1 при $t = t_3$ и $x = l_1 + l_{nl}$ для варианта, например, на рисунке 10 б. Тогда задачу о десорбции метана из ядра зоны нарушенности угольного пласта можно свести к задаче о суммарной диффузии метана во фрагментах угля, которая для единичного ис-

точника десорбции описывается уравнением диффузии в сферических координатах следующим образом [31, 32]

$$\frac{\partial c(r,t)}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c(r,t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial c(r,t)}{\partial r} \right), \quad (27)$$

где $c(r,t)$ – концентрация газа; t – время; r – радиальная координата; D – коэффициент диффузии с учетом межмолекулярных взаимодействий в системе «метан - уголь».

Переход от концентрации метана к давлению осуществляется по известному уравнению Менделеева-Клапейрона.

ВЫВОДЫ. Судя по интенсивности проявления динамической активности угольных пластов, обусловленной зонами тектонических нарушений в области геодинамического давления, за исходное значение потенциала этих пластов можно принять энергию, равную, в среднем, 10^5 Дж. Это значит, во-первых, что при данной энергии в молекулярной структуре угля не могло происходить отщепление от алифатической бахромы атомов метильной группы и водорода, которые образуют дополнительные молекулы метана в угольном массиве. В связи с этим, можно считать, что в начальном состоянии нарушенная зона насыщена метаном, генерированным в угольном массиве в результате только релаксационного механизма деформирования молекулярной структуры угля. Наиболее вероятный максимум объема метана в нарушенной зоне при указанном значении ее потенциала составляет около $35 \text{ м}^3/\text{т}$. Во – вторых, в результате тектонического процесса и геодинамического давления в нарушенной зоне реализовывались все конформации, энергия которых $\leq 10^5$ кДж/моль, что составляет половину всех возможных конформаций в молекулярной структуре угля. То есть генерированный газ распределен в поровом и межпоровом пространстве угля на 50% с измененной геометрией структуры и с весьма сильными сорбционными связями, энергия которых равна 10-20 кДж/моль. При этом сорбционный диаметр пор не изменился, поскольку он не зависит от размера пор и составляет 6,8 А.

Для установления исходных параметров зоны опорного давления предложена комбинированная модель, основанная на использовании решения Линькова А.М. при определении параметров предельного состояния и известных корреляционных зависимостей для определения длины зоны опорного давления. На их основе установлена формула для расчета напряжений в упругой зоне опорного давления. Расчет газового давления в зоне опорного давления осуществлялся также по формулам Линькова А.М. На основе полученных зависимостей установлена закономерность изменения потенциальной энергии деформации в предельной и упругой зоне угольного пласта, позволяющая проводить оценку конформационных перестроек в молекулярной структуре угля при её деформировании в зоне опорного давления.

Моделирование фильтрационного процесса из угольного пласта, вмещающего зону нарушенности в области опорного давления, основывалось на представлении угольного пласта как структурно-неоднородной системы в виде комбинаций нескольких участков, находящихся в различных зонах опорного давления и вмещающих зону нарушенности. Каждый из этих участков описывается средними значениями пористости и газовой проницаемости, которые определялись по методике Басниева К.С. Это позволило для каждой комбинации участков пласта воспользоваться уравнением фильтрации Желтова Ю.П.

При установлении граничных и начальных условий для решения указанного уравнения фильтрации учитывалось наличие перемятой области в зоне нарушенности, где при фильтрации свободного газа имеет место процесс активации десорбции метана, который происходит с некоторым запаздыванием, равным t_3 . Это время определяется временем релаксации конформационных перестроек в молекулярной структуре угля в результате нарушения ее равновесного состояния. В связи с этим, уравнение фильтрации предложено решать в два этапа. Сначала рассмотреть фильтрацию лишь свободного метана, а затем - фильтрацию метана при $t \geq t_3$ с учетом десорбции метана из ядра нарушенной зоны при граничных и начальных условиях, полученных при решении первой задачи.

При установлении энергии активации и коэффициента диффузии использовалась модель Пейса-Дейтинера. При этом основными параметрами, определяющими энергию активации диффузии десорбирующегося метана и коэффициент диффузии, являются: параметры потенциала Ленарда-Джонса, характеризующее энергетическую связь между молекулами угля и метаном; константы, определяющие деформацию нарушенной структуры угля и зависящие от энергии активации конформационных перестроек в молекулярной структуре; диаметр молекулы метана и длина ее свободного диффузионного скачка, энергия активации которого определяется разностью потенциальной энергии между равновесным состоянием сорбционной системы и активированным; а также одним из важнейших параметров является температура угольного пласта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подготовка и разработка высокогазоносных угольных пластов /А.Д. Рубан, В.Б. Артемов, В.С. Забурдяев [и др.]. – М.: Горная книга, 2010. - 500 с.
2. Влияние трещинной и мелкоамплитудной разрывной тектоники на метановыделение в подземные горные выработки угольных шахт Донбасса / А.М. Брижанев, Р.А. Галазов, О.А. Куц [и др.] // Изв. Вузов. Геология и разведка. – 1985. - №2. –С. 51-56.
3. Дрибан, В.А. Направления исследований влияния мелкоамплитудной нарушенности на ведение горных работ / В.А. Дрибан, И.А. Южанин, А.О. Севрюков // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. – 2011, № 8. – С. 6-18.
4. Горные работы в сложных условиях на выбросоопасных пластах/ С.П. Минеев, А.А. Рубинский, О.В. Витушко, А.В. Радченко. - Донецк: Східний видавничий дім, 2010.- 604 с.
5. Минеев, С.П. Прогноз и способы борьбы с газодинамическими явлениями на шахтах Украины / С.П. Минеев. – Мариуполь: Восточный издательский дом, 2016.- 258 с.
6. Малышев, Ю.Н. Фундаментально - прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов / Ю.Н. Малышев, К.Н. Трубецкой, А.Т. Айруни. – М.: Из-во академии горных наук, 2000.- 517 с.
7. Ольховиченко, А.Е. Прогноз выбросоопасности угольных пластов / А. Е. Ольховиченко. – М. Недра, 1982. – 278 с.

8. Справочник по литологии / Под редакцией Н.Б. Вассоевича, В.Л. Либровича, Н.В. Логвиненко, В.И. Марченко.– М.: Недра, 1983. – 509 с.
9. Миронов, К.В. Справочник геолога- угольщика / К.В. Миронов. – М.: Недра, 1991.- 363 с.
10. Шемякин, Е.И. К вопросу к классификации горных ударов / Е.И. Шемякин, М.В. Курленя, Г.И. Кулаков. – ФТПРПИ. - 1986. - №5. – С. 3-11.
11. Петухов, И.М. Горные удары на угольных шахтах / И.М. Петухов. - М.: Недра, 1979. – 280 с.
12. Булат, А.Ф. Генерирование сорбированного метана, обусловленное релаксационным механизмом деформирования молекулярной структуры угля / А.Ф. Булат, С.П. Минеев, А.А. Прусова. – ФТПРПИ. – 2016. - №1. - С. 91-99.
13. Тенорд, Ч. Физическая химия полимеров / Ч. Тенорд. – М.: Химия, 1965. – 772 с.
14. Кулезнев, В.Н. Химия и физика полимеров / В.Н. Кулезнев, В.А. Шершнев. – М.: Высшая школа, 1988. -312 с.
15. Минеев, С.П. Активация десорбции метана в угольных пластах / С.П. Минеев, А.А. Прусова, М.Г. Корнилов. – Днепропетровск: Вебер, 2007. – 250 с.
16. Мэзон, У. Физическая акустика. Том 4. Часть Б. Применения физической акустики в квантовой физике и физике твердого тела. – М.: Мир, 1970.- 440 с.
17. Gregg, S.J. Adsorption, Surface Area and Porosity / S.J. Gregg, K.S.W. Sing. – London and New York: Academic Press, 1967. – 304 p.
18. Методология оценки возможности спонтанного выделения сорбированного метана из угольного пласта/ С.П. Минеев, А.А. Прусова, В.Н. Кочерга, А.А. Потапенко. - Наукові праці УкрНДМІ НАН України, 2014. - Вип. 14. - С. 113-127.
19. Zhou, L. A Simple Isotherm Equation for Modeling the adsorption Equilibria on Porous Solids over Wide Temperature Ranges / L.Zhou, J.Zhang // *Langmuir*, 2001. - Vol. 17. – pp. 5503-5507.
20. Минеев, С.П. Свойства газонасыщенного угля / С.П. Минеев. - Днепропетровск, НГУ, 2009.- 220 с.
21. Физико-химия газодинамических явлений в шахтах / В.В. Ходот, М.Ф. Яновская, Ю.С. Премыслер [и др.]. – М. Наука, 1973. –140 с.
22. Ковалева, И.Б. О возможности использования физико-механических характеристик угля для оценки способности угольных пластов к метаноотдаче / И. Б. Ковалева, Е. А. Соловьева. - М. ИПКОН РАН, 2001. – 6 с.– Семинар ИПКОН РАН [Электронный ресурс]; режим доступа: <http://www.seminar-1.narod.ru/sem10/d10.htm>. — Заглавие с экрана.
23. Булат, А.Ф. Фракталы в геомеханике / А. Ф. Булат, В. И. Дырда.- К.: Наукова думка, 2005. - 358 с.
24. Минеев, С.П. Кинетика структурных изменений в зоне опорного давления напряженного газонасыщенного угольного пласта / С.П. Минеев, А.А. Прусова // ФТПРПИ, 1992. - №2. – С. 53-60.
25. Петухов, И.М. Механика горных ударов и выбросов // И.М. Петухов, А.М.Линьков. – М: Недра, 1983.- 280 с.
26. Напряженно-деформированное состояние пород кровли и пласта в зоне движущегося забоя / В.А. Матвеев, А.В. Матвеев, В.А. Мосяков, В.М. Феоктистов // Горно-информационный аналитический бюллетень, 2001. -№8.- С. 120-125.
27. Подземная гидравлика: Учебник для вузов / К.С. Басниев, А.М. Власов, И.Н. Кочина, В.М. Максимов. – М.: Недра, 1986.- 303с.
28. Желтов, Ю.П. Механика нефтегазоносного пласта/ Ю.П.Желтов. – М.: Недра, 1975. – 216с.
29. Лейбензон, Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде / Л.С. Лейбензон. – Ленинград: ОГИС Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1947. -244 с.
30. Эттингер, И.Л. Распределение метана в порах ископаемых углей / И.Л. Эттингер. – М.: Наука, 1975. – 112 с.
31. Араманович, И.Г. Уравнения математической физики / И.Г. Араманович, В.И. Левин. – М.: Наука, 1969. – 287 с.
32. Годунов, С. К. Уравнения математической физики / С.К. Годунов. – М.: Наука, 1979. – 393 с.

REFERENCES

1. Ruban, A.D., Artemov, V.B., Ziburdaev, V.S., Zakharov, V.N., Loginov, A.K. and Yutyayev, E.P. (2010), *Podgotovka i razrabotka vysokogazonosnykh ugolnykh plastov* [Preparation and Development of Very Gassy Coal seams], Gornaya kniga, Moscow, Russia.

2. Brizhanev, A.M., Galazov, R.A., Kushch, O.A. et al. (1985), "Effect of fracture and fault tectonics melkoamplitudnoy on methane in the underground workings of coal mines of Donbass", *Izvestiya vuzov: Geologiya i razvedka*, no2, pp. 51-56.
3. Driban, V.A., Yuzhanin, I.A. and Sevryukov, S.A. (2011), "Areas of research influence melkoamplitudnoy disturbance at mining operations", *Naukovi pratsi UkrNDMI NAS of Ukraine*, no. 8, pp. 6-18.
4. Mineev, S.P., Rubinsky, A.A., Vitushko, O.V. and Radchenko, A.V. (2010), *Gornye raboty v slozhnykh usloviyakh na vybrosopasnykh plastakh* [Mining operations in difficult conditions in the outburst seams], Shidny vidavnychiy Dim, Donetsk, Ukraine.
5. Mineev, S.P. (2016), *Prognoz i sposoby borby s gazodinamicheskimi yavleniyami na shakhtakh Ukrainy* [Forecast and ways to deal with gas-dynamic phenomena in mines Ukraine], Shidny vidavnychiy Dim, Mariupol, Ukraine.
6. Malyshev, Y.N., Troubetzkoy, K.N. and Airuni, A.T. (2000), *Fundamentalno-prikladnye metody resheniya problem metana ugolnykh plastov* [Fundamentally - applied methods for solving the problem of coal bed methane], Izdatelstvo akademii gornykh nauk, Moscow, Russia.
7. Olhovichenko, A.E. (1982), *Prognoz vybrosopasnosti ugolnykh plastov* [Forecast outburst coal seams], Nedra, Moscow, Russia.
8. Vassoevich, N.B., Librovich, V.L., Logvinenko, N.V. and Marchenko, V.I. (ed) (1983) *Spravochnik po litologii* [Reference lithology], Nedra, Moscow, USSR.
9. Mironov, K.V. (1991), *Spravochnik geologa - ugolshchika* [Directory geologa- collier], Nedra, Moscow, USSR.
10. Shemyakin, E.I., Kurlenya, M.V. and Kulakov, G.I. (1986), "On the question of the classification of rock bursts", *Fiziko-technicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, no.5, pp. 3-11.
11. Petukhov, I.M. (1979), *Gornye udary na ugolnykh shakhtakh* [Mining strikes in the coal mines], Nedra, Moscow, USSR.
12. Bulat, A.F. Mineev, S.P. and Prusova, A.A. (2016), "Generation of methane sorbed due to strain relaxation mechanism of molecular coal", *Fiziko-technicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* 2016, no.1, pp. 91-99.
13. Tenord, Ch. (1965), *Fizicheskaya khimiya polimerov* [Physical chemistry of polymers], Khimiya, Moscow, USSR.
14. Kuleznev, V.N. and Shershnev, V.A. (1988), *Khimiya i fizika polimerov* [Chemistry and Physics of Polymers], Vyshaya shkola, Moscow, USSR.
15. Mineev, S.P., Prusova, A.A. and Kornilov, M.G. (2007), *Aktivatsiya desorbtsii metana v ugolnykh plastakh* [Activating the desorption of methane in coal seams], Weber, Dnepropetrovsk, Ukraine.
16. Mezon, U. (1969), *Fizicheskaya akustika. Tom IV. Chast B. Primenenie fizicheskoy akustiki v kvantovoy fizike i fizike tverdogo tela* [Physical Acoustics. Volume 4, Part B. Applications physical acoustics in quantum physics and solid state physics], Mir, Moscow, USSR.
17. Gregg, S.J. and Sing, K.S.W. (1967), "Adsorption, Surface Area and Porosity", Academic Press, London and New York, England – USA.
18. Mineev, S.P., Prusova, A.A., Kocherga, V.N. and Potapenko, A.A. (2014), "Methodology for assessing the possibility of spontaneous release of adsorbed methane from the coal seam", *Naukovi pratsi UkrNDMI NASU*, vol 14, pp. 113-127.
19. Zhou, L. and Zhang, J. (2001), "A Simple Isotherm Equation for Modeling the adsorption Equilibria on Porous Solids over Wide Temperature Ranges", *Langmuir*, vol. 17, pp. 5503-5507.
20. Mineev, S.P. (2009), *Svoystva gazonasyshchennogo uglya* [Properties of gas-saturated coal], NMU, Dnepropetrovsk, Ukraine.
21. Khodot, V.V., Yanovskaya, M.F., Premysler, Yu.S. et al. (1973), *Fiziko-khimiya gazodinamicheskikh yavleniy v shakhtakh* [Physical chemistry of gas-dynamic phenomena in mines], Nauka, Moscow, USSR.
22. Kovalev, I.B. and Solovieva E.A. (2001), "On the possibility of the use of physical and mechanical characteristics of coal to assess the ability of coal seams to metanooutdache", *6 St.- Seminar IPKON early, IPKON RAS*, available at: <http://www.seminar-1.narod.ru/sem10/d10.htm>, (Accessed 1 September 2016).
23. Bulat, A.F. and Dyrda, V.I. (2005), *Fraktaly v geomekhanike* [Fractals in geomechanics], Naukova Dumka, Kiev, Ukraine.
24. Mineev, S.P. and Prusova, A.A. (1992), "Kinetics of structural changes in the reference pressure zone busy gas-saturated coal seam *Fiziko-technicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, no. 2, pp. 53-60.

25. Petukhov, I.M. and Linkov, A.M. (1983), *Mekhanika gornykh udarov i vybrosov* [The mechanics of rock bursts and releases], Nedra, Moscow, USSR.

26. Matveev, V.A. Matveev, A.V., Mosyakov, V.A. and Feoktistov, V.M. (2001), "Stress-strain state of the rocks and the formation of the roof in the area of the moving face", *Mining informational and analytical bulletin*, no. 8, pp.120-125.

27. Basniev, K.S., Vlasov, A.M., Kochina, I.N. and Maksimov, V.M. (1986), *Podzemnaya gidravlika* [Underground hydraulics: Textbook for Universities], Nedra, Moscow, USSR.

28. Zheltov, Yu.P. (1975), *Mekhanika neftegazonosnogo plasta* [Mechanics of oil and gas reservoir Nedra, Moscow, USSR.

29. Leibenzon, L.S. (1947), *Dvizhenie prirodnykh zhydkostey i gazov v poristykh srede* [Movement of natural fluids in porous media], State Publishing House VDVS technical-theoretical literature, Leningrad, USSR.

30. Ettinger, I.L. (1975), *Raspredelenie metana v porakh iskopaemykh ugley* [The distribution of methane in the pores of fossil coals], Nauka, Moscow, USSR.

31. Aramanovich, I.G. and Levin, V.I. (1969) *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [The equations of mathematical physics], Nauka, Moscow, USSR.

32. Godunov, S.K. (1979), *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics], Nauka, Moscow, USSR.

Об авторах

Минеев Сергей Павлович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом Управления динамическими проявлениями горного давления, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, sergminee@gmail.com.

Прусова Алла Андреевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела Управления динамическими проявлениями горного давления, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, sergminee@gmail.com.

Сапегин Владимир Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник в отделе управления динамическими проявлениями горного давления. Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, sergminee@gmail.com.

Янжула Алексей Сергеевич, магистр, инженер в отделе Управления динамическими проявлениями горного давления, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, sergminee@gmail.com.

Кишкань Максим Александрович, магистр, инженер в отделе Управления динамическими проявлениями горного давления, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, sergminee@gmail.com.

About the authors

Mineev Sergei Pavlovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Professor, Head of Department of Pressure Dynamics Control in Rock, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, sergminee@gmail.com.

Prusova Alla Andreevna, Candidat of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher of Department of Pressure Dynamics Control in Rock, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, sergminee@gmail.com.

Sapegin Vladimir Nikolaevich, Candidat of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher of Department of Pressure Dynamics Control in Rock, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, sergminee@gmail.com.

Yanzhula Aleksey Sergeevich, Master of Sciences (M.S.), Engineer in of Department of Pressure Dynamics Control in Rocks, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, sergminee@gmail.com.

Kyshkan Maxim Aleksandrovich, Master of Sciences (M.S.), Engineer in of Department of Pressure Dynamics Control in Rocks, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, sergminee@gmail.com.

Анотація. Розглянуто початковий стан зони тектонічного порушення в геомеханічному просторі вуглепородного масиву і визначені енергетичний потенціал цієї зони і обсяг запасеного нею метану. Встановлено закономірність зміни потенційної енергії пружної деформації, що дозволяє виконувати оцінку потенційної енергії конформерів молекулярної структури вугілля, які обумовлюють її деформування в області опорного тиску.

Побудована модель тріщинувато-пористої структури вугілля в області порушеності, що складається з фрагментів різного масштабного рівня в ієрархічній структурі вугілля.

Моделювання фільтраційного процесу з вугільного пласта ґрунтувалось на уявленні вугільного пласта як структурно-неоднорідної системи у вигляді комбінацій декількох ділянок, кожна з яких описується середніми значеннями пористості і газової проникності за методикою Баснієва К.С. Це дозволяє для кожної комбінації ділянок пласта скористатися рівнянням фільтрації Желтова Ю.П.

Завдання про десорбції метану з ядра зони порушеності вугільного пласта, звели до задачі про сумарну дифузії метану з вугільних фрагментів, розділених порушеною структурою вугілля. Для одиничного джерела десорбція описується рівнянням дифузії в сферичних координатах. При встановленні енергії активації і коефіцієнта дифузії використовувалася модель Пейса-Дейтінера. Це дозволило в завданні врахувати такі основні параметри: константи, що визначають деформацію порушеної структури вугілля; параметри потенціалу Ленарда-Джонса, що характеризують енергетичний зв'язок між структурою вугілля і молекулами метану; діаметр молекули метану і довжину її вільного дифузійного стрибка; температуру вугільного пласта.

Ключові слова: вугільний пласт, фільтрація, вільний метан, сорбований метан, десорбція, дифузія.

Abstract. Initial state of zone with tectonic displacement in geomechanical space of the coal-rock mass was considered, and energetic potential of this area and volume of stored methane were specified. The specified regularities of potential strain energy changing help evaluating potential energy conformers of the molecular structure of coal, which cause the structure deformation in the area with bearing pressure.

The article represents a model of the coal fractured-and-porous structure in the displaced area, which consists of fragments of different scale level in the hierarchical structure of the coal.

Modeling of filtering process in the coal seam is based on a concept that a coal seam is a structurally heterogeneous system represented in the form of combinations of several sections, each of which is described by average values of porosity and gas permeability with the help of the K.S. Basniev method. Such approach makes possible to apply the Y.P. Zheltov filtering equation to any combination of the coal sections. A problem of methane desorption from the core of displaced zone in the coal seam was reduced to the problem of total methane diffusion from the coal fragments, which were separated by the coal broken structure. With a single source, desorption is described by diffusion equation in spherical coordinates. In order to specify the activation energy and diffusion coefficient, the Pace-Deytiner model was used with taking into account the following key parameters: constants, which described deformation of the coal broken structure; the Lennard-Jones potential, which characterized energetic interdependence between the coal structure and methane molecules; diameter of methane molecule and length of its free diffusion jump; and temperature of the coal seam.

Keywords: coal seam, filtering, free methane, adsorbed methane, desorption, diffusion.

Статья поступила в редакцию 31.10.2016

Рекомендовано к публикации д-ром геологических наук Барановым В.А.