

## РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.31:622.83

### ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ЗОНАЛЬНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ

**В. Н. Одинцев<sup>1</sup>, В. В. Макаров<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт проблем комплексного освоения недр РАН,  
E-mail: odin-vn@yandex.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Дальневосточный федеральный университет,  
E-mail: vlmv@mail.ru, ул. Суханова, 8, 690600, г. Владивосток, Россия*

Рассмотрены теоретические вопросы зональной дезинтеграции газоносного угольного пласта и газодинамических явлений в горной выработке. Используется концепция неустойчивости геомеханического состояния пласта, обусловленная неустойчивостью деформирования пласта при образовании микротрещин и неустойчивостью трещинообразования в макромасштабе. Установлено, что в зоне дезинтеграции газоносного угольного пласта происходит процесс перехода растворенного в угольном веществе метана в свободное состояние. В результате роста давления свободного метана в глубине пласта образуется зона разрушенного угля и газа, которая может быть очагом таких газодинамических явлений, как суфляр, отжим пласта, выброс угля и газа. Получены значения и соотношения параметров геомеханических и газодинамических процессов, согласующиеся с данными практики.

*Угольный пласт, зональная дезинтеграция, трещины отрыва, диффузия метана, давление газа, суфляр, отжим пласта*

DOI: 10.15372/FTPRPI20200606

Газодинамическое разрушение угля при разработке угольных пластов часто приводит к опасным природно-техногенным явлениям в подземных выработках в виде внезапных выбросов угля и газа, суфлярных выделений газа, отжима пласта и т. п. Факторы, влияющие на вероятность газодинамических явлений, — газоносность и глубина залегания пласта, природные напряжения в пласте и вмещающих породах, проницаемость, прочность, деформационные свойства угля, геологическое строение пласта, технология разработки. Большое количество данных факторов делают прогнозирование газодинамических явлений трудной проблемой. Очевидно, что ее научное решение основывается на понимании физической природы геопроцессов. Менее очевидна, но столь же важна, идея о необходимости рассмотрения геологической среды, геопроцессов и технологии разработки как сложной системы, состоящей из взаимодействующих подсистем со своими законами и последовательностью изменений.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор соглашения RFMEFI58418X0034).

Важное понятие сложных систем — устойчивость, которая выражается в малом отклике устойчивой системы на малое внешнее воздействие. Неустойчивая система при малом внешнем воздействии изменяется за счет внутренних факторов и переходит в качественно новое состояние с новой структурой или же разрушается, перестает существовать в своем изначальном определении.

Проявлением неустойчивости состояния сильнонапряженного массива пород вблизи подземных выработок является зональная дезинтеграция в виде чередующихся зон трещиноватых и относительно ненарушенных пород [1–4]. На рис. 1а показана серия чередующихся зон трещинообразования (дезинтеграции пород) вблизи одиночной выработки [2]. Подобные зоны разрушения, представленные трещинами отрыва, образуются вблизи забоя лавы [5].

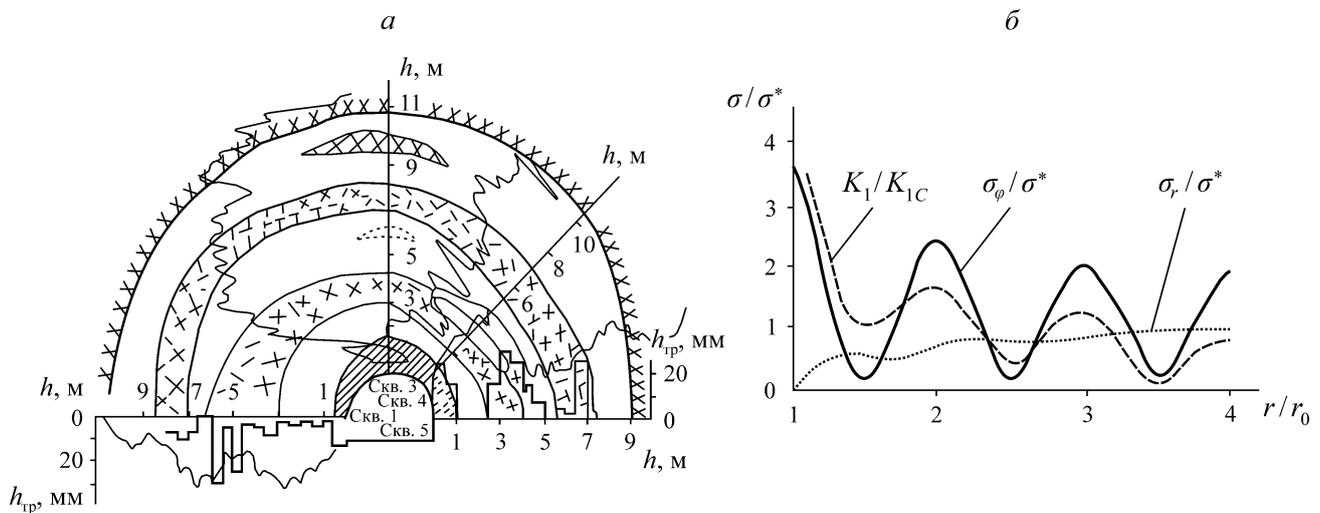


Рис. 1. Зональная дезинтеграция пород: а — области техногенной трещиноватости пород вблизи одиночной выработки [2]; б — распределение главных напряжений и коэффициента интенсивности напряжений в кончике трещин [6]:  $\sigma_\phi$ ,  $\sigma_r$  — безразмерные окружные и радиальные напряжения;  $r$  — радиальная координата;  $r_0$  — радиус выработки;  $\sigma^*$  — подгоночный прочностной параметр, определяемый из условия выполнения критерия трещинообразования в наиболее удаленной от выработки зоне дезинтеграции

Возможность формирования периодической структуры в массиве поясним простым примером деформирования предельно сжатого стержня. Согласно классическому решению Л. Эйлера, при потере устойчивости сжатого стержня с шарнирно закрепленными концами существует не только одно очевидное решение, отвечающее одностороннему боковому выпучиванию, а множество решений, отвечающих волнообразному деформированию стержня. В эксперименте эти решения реализуются при наличии промежуточных шарниров, т. е. при наличии стеснения на деформацию стержня. В совокупности деформирующийся стержень, действующую силу, условия стеснения можно описать как механическую систему, в которой реализуется волнообразное деформирование стержня.

Аналогично деформированию стержня, в массиве породы в условиях мягкого внешнего нагружения и стеснения потеря устойчивости деформирования приводит к волнообразному распределению деформаций и напряжений. Волнообразное распределение деформаций может

сопровождаться волнообразным распределением трещиноватости, поскольку предельные деформации на растяжение породы малы по величине и в области, где деформации растяжения превышают предельные, происходит растрескивание породы.

В газоносных угольных пластах в зонах наведенной трещиноватости метан из изначально растворенного состояния в угольном веществе может переходить в свободное состояние [7, 8]. Это проявляется в волнообразном изменении газопритока в пробуренные скважины по мере увеличения их длины [9, 10]. Свободный метан, наполняющий зоны дезинтеграции, имеет большую энергию и способствует деформированию и разрушению пласта.

Рассмотрим модели газодинамических явлений, вызванных зональной дезинтеграцией пласта, при упрощающих предположениях, не носящих принципиальный характер, но позволяющих по совокупности связанных задач прояснить возможные газодинамические следствия и оценить порядок величин параметров, которые могут быть замерены в экспериментах.

### ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРЕДЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ ГОРНОЙ ПОРОДЫ

В [1–6, 11–22] рассмотрены аспекты деформирования геомеханической системы “нетронутый массив пород – выработка – разрушающаяся порода – разрушенная порода”. Экспериментальные данные и теоретические представления о зональной дезинтеграции наиболее полно изложены в [2]. Сопоставляя результаты исследований, отметим, что периодическую картину техногенных геомеханических изменений в массиве трудно объяснить в рамках традиционного одномодельного представления о напряженно-деформированном состоянии пород вблизи горных выработок. Деформирование хрупких пород при достижении прочности определяется процессом трещинообразования, имеющим различные стадии развития. Первая стадия связана с образованием наведенных микротрещин, большей частью по границам зерен минералов, и началом их активного взаимодействия. Деформирование породы на этой стадии целесообразно определить как предельное. Горная порода еще сохраняет общую связанность и в ее поведении большую роль играют упругие деформации.

Массовое образование микротрещин нарушает условие совместности деформаций горной породы. Для математического описания предельного деформирования в стадии образования микротрещин можно использовать математический аппарат деформаций несовместности. Строгое решение задачи о взаимодействии упругих деформаций и деформаций несовместности позволило теоретически исследовать эффект волнообразного распределения напряжений и деформаций в области предельного деформирования [11].

На рис. 1б для области предельного деформирования приведено распределение безразмерных окружных  $\sigma_\varphi$  и радиальных  $\sigma_r$  напряжений вдоль радиальной координаты  $r$  ( $r_0$  — радиус выработки,  $\sigma^*$  — подгоночный прочностной параметр, определяемый из условия выполнения критерия трещинообразования в наиболее удаленной от выработки зоне дезинтеграции). Выявлено, что зон концентрации напряжений может быть разное количество. Это зависит от свойств горной породы и условий задачи, т. е. от напряженного состояния нетронутого массива, геометрии выработки, прочности породы и т. п. Параметры математической модели деформирования находятся с помощью обратного анализа по замеренным деформациям породы в натуральных условиях [6].

Волнообразному распределению напряжений соответствует волнообразное распределение концентрации микротрещиноватости. Это следует из натуральных данных и теоретически обосновывается анализом распределения коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  в кончике

микротрещин. На рис. 1б показано распределение отношения коэффициента  $K_1$  к предельной трещиностойкости породы  $K_{1C}$ . Для роста микротрещин и перерастания их в макротрещины необходимо, чтобы величина этого отношения превышала единицу.

Вторая стадия процесса трещинообразования связана с развитием макротрещин, образующихся за счет объединения микротрещин, расположенных примерно в одной плоскости. Начальная стадия развития макротрещин должна происходить в динамическом режиме, поскольку предельно равновесное состояние небольших макротрещин неустойчиво [14]. По окончании процесса трещинообразования в зоне макротрещин формируется устойчивое деформационное состояние, физически обусловленное диссипацией энергии при взаимодействии берегов трещин. Деформирование породы, соответствующее процессу развития макротрещин, характеризуется как запредельное деформирование горной породы.

Появление зон макротрещин должно изменить напряженно-деформированное состояние массива горных пород. Математически это состояние можно описать введением в анализ состояния пород деформаций макротрещиноватости и рассматривать их в качестве фактора нагрузки, подобно тепловым деформациям для упругого тела. Ниже реализована такая схема анализа напряженно-деформированного состояния.

#### УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЗОНЫ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ВНУТРИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

Насыщенный метаном природный уголь характеризуется преимущественно хрупким типом разрушения с проявлением отрыва. Это обусловлено распирающим действием свободного метана в природных и наведенных трещинопорах [23, 24]. Поэтому закономерности деформирования хрупких пород должны проявляться и в газоносных угольных пластах.

На рис. 2а показана схема расчета напряженно-деформированного состояния угольного пласта при образовании зон макротрещин. Протяженная одиночная выработка радиусом  $r_0$  расположена вдоль простирания горизонтального пласта мощностью  $h = r_0$ .

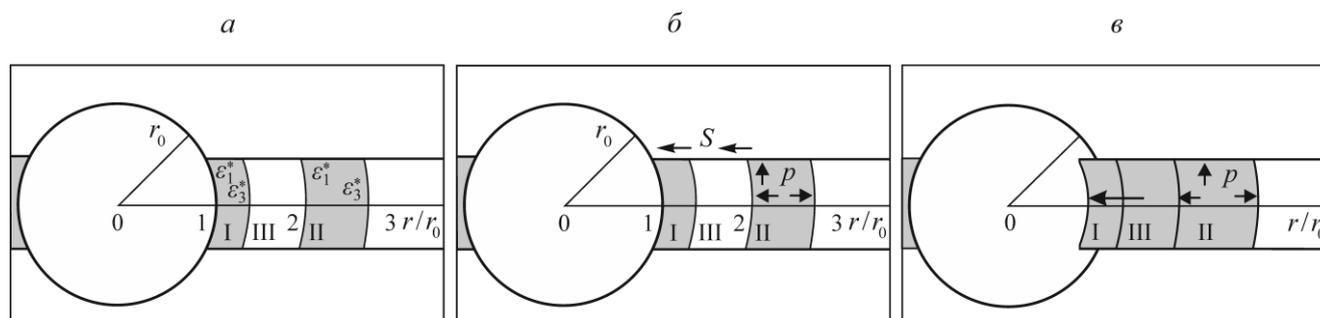


Рис. 2. Решение задач о дополнительных напряжениях в пласте при образовании зон макротрещин I и II (а), формировании трещины суфляра  $S$  из внутренней зоны дезинтеграции пласта (б) и отжиме краевой части пласта (в)

При высоких природных напряжениях массива горных пород краевая часть угольного пласта должна находиться в предельном напряженном состоянии. Как следует из [6], на начальном этапе предельного деформирования здесь может реализоваться волнообразное распределение окружных напряжений (рис. 1б). При непринципиальном упрощении задачи считаем, что исходное напряженное состояние массива отвечает условиям гидростатики и образуются всего две зоны предельно высоких напряжений — непосредственно у стенки выработки (зона I) и на определенном расстоянии в глубине пласта (зона II). Кроме того, в задаче, цель которой

получить оценочные зависимости при отсутствии надежных данных о деформационно-прочностных свойствах угля и вмещающих пород, целесообразно опираться на осредненные параметры, что позволяет провести оценки по порядку величин.

Согласно [6], принимаем мощность первой зоны  $l_I = 0.45r_0$ , второй —  $l_{II} = 0.80r_0$ . Эти зоны разделены зоной низких окружных напряжений (зона III), мощностью  $l_{III} = 0.65r_0$ . Осредненное напряжение сжатия пласта в этих зонах составляет  $2.20\sigma^*$ ,  $1.75\sigma^*$  и  $0.65\sigma^*$ . В данном случае прочностной параметр  $\sigma^*$  определяется из условия образования трещин отрыва во внутренней зоне дезинтеграции. В результате обратного пересчета находим, что  $\sigma^* = 10$  МПа. Для последующего исследования краевой части пласта выделяем три характерные зоны и полагаем, что в зонах I и II должно произойти разрушение пласта в виде макротрещин (зоны дезинтеграции), зона III может сохранить ненарушенное упругое состояние.

Влияние зон макротрещин на пласт и вмещающие породы опишем заданием в расчетах деформаций проседания  $\varepsilon_1^*$ , отражающих увеличение податливости зоны макротрещин в направлении действия максимальных сжимающих напряжений, и боковых горизонтальных деформаций разрыхления  $\varepsilon_3^*$ . Значения  $\varepsilon_1^*$  и  $\varepsilon_3^*$  не определяются теоретически, поскольку деформации отражают свойства трещинообразования конкретной породы. Они должны быть установлены из экспериментов. В первом приближении их можно оценить из опытов по запредельному деформированию образцов на жестких прессах.

Численное решение задачи о дополнительных напряжениях, вызванных появлением деформаций  $\varepsilon_1^*$  и  $\varepsilon_3^*$ , проведено методом конечных элементов. В расчетах использовалась методика, применяемая для решения задач теории упругости при задании в определенной области объемных сил или свободных деформаций, которые не являются следствием механических напряжений. Полученные дополнительные напряжения суммированы с напряжениями, найденными в [6]. Суммарные напряжения отражают напряженное состояние краевой части пласта после образования зон макротрещин.

На рис. 3 показаны обработанные результаты расчетов, т. е. зависимости безразмерных осредненных вертикальных напряжений  $\sigma$ , а именно  $\sigma_1^I$ ,  $\sigma_1^{II}$ ,  $\sigma_1^{III}$ , в зонах I, II, III от величины деформаций  $\varepsilon_1^*$ , а также зависимости осредненных безразмерных горизонтальных напряжений  $\sigma_3^{III}$  и безразмерного параметра  $K = K_1 / K_{1C}$  для модельной трещины в упругой зоне (штрихпунктирная линия). Построенные зависимости относятся к расчетам при условии  $\varepsilon_3^* = 2.5\varepsilon_1^*$ .

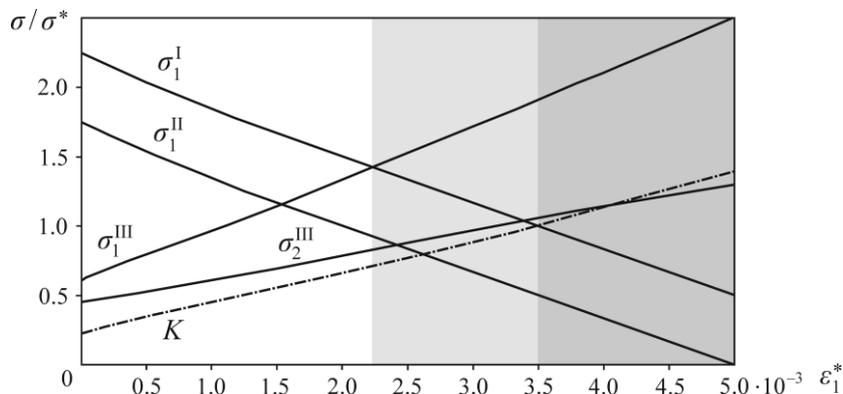


Рис. 3. Зависимость напряжений в характерных зонах краевой части пласта от деформации макротрещиноватости  $\varepsilon_1^*$

Возможны различные соотношения между вертикальными напряжениями  $\sigma_1^I$ ,  $\sigma_1^{II}$ ,  $\sigma_1^{III}$  в зависимости от интервалов значений параметра  $\varepsilon_1^*$  (рис. 3). Различие в соотношениях определяет качественное различие геомеханических ситуаций после образования макротрещин. Если деформация  $\varepsilon_1^*$  соответствует интервалу  $(0 - 1.5) \cdot 10^{-3}$ , то вертикальные напряжения  $\sigma_1^I$ ,  $\sigma_1^{II}$  в зонах I и II хотя и являются более низкими, чем до образования макротрещин, все же превышают напряжения в упругой зоне  $\sigma_1^{III}$ . Если деформация  $\varepsilon_1^*$  соответствует условию  $\varepsilon_1^* > 2.25 \cdot 10^{-3}$ , то напряжения в зонах I и II макротрещин становятся меньше напряжений в зоне III, однако зона III должна сохранить связанность и упругие свойства.

Если деформация  $\varepsilon_1^*$  определяется соотношением  $\varepsilon_1^* > 3.50 \cdot 10^{-3}$ , то в зоне III выполняются условия роста макротрещин, поскольку там должно выполняться условие  $K > 1$ . В этом случае вся рассматриваемая краевая часть пласта должна стать областью макротрещин, т. е. зональность дезинтеграции пласта должна исчезнуть. Этот случай соответствует традиционному представлению о краевой области пласта как о запредельной области деформирования со сплошной областью макронарушенности.

При других соотношениях величин  $\varepsilon_3^*$ ,  $\varepsilon_1^*$  ситуации с возможными перераспределениями нагрузок между зонами I, II, III остаются теми же при небольших отклонениях в установленных значениях границ интервалов.

Таким образом, в условиях предельной напряженности краевой части угольного пласта возможна различная структура техногенной трещиноватости пласта, как с образованием чередующихся зон макротрещин (зон дезинтеграции), так и образованием краевой области сплошной макротрещиноватости. Эта особенность техногенной трещинной структуры определяется природой двух процессов разных масштабных уровней — начальным процессом образования микротрещин, следствием которого может быть волнообразное распределения напряжений, и последующим процессом образования макротрещин, в котором либо усиливается, либо сглаживается неоднородность трещинообразования. Качественные различия в структуре макротрещиноватости краевой части пласта должны проявиться в последующих газодинамических явлениях, обусловленных появлением свободного метана в областях макротрещин.

#### ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ЗОНАЛЬНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИЕЙ ПЛАСТА

*Образование свободного метана в зоне дезинтеграции.* При зональной дезинтеграции метанонасыщенного угольного пласта в краевой части пласта начинает действовать газовый фактор, связанный с переходом растворенного метана в свободное состояние в области наведенных трещин. Свободный метан оказывает давление на сохранившуюся упругую зону пласта III, ненарушенный угольный пласт и вмещающие породы (рис. 2б).

Заполнение зоны образовавшихся трещин свободным метаном зависит от следующих процессов:

- условно мгновенного выхода молекул метана в трещины из локальной зоны разрушения материала на берегах трещины, которая формируется из-за высоких растягивающих напряжений в вершине растущей трещины и сохраняется в виде следа на ее берегах [25];
- продолжительной диффузии молекул растворенного метана в угольном веществе к берегам трещин, где молекулы переходят в свободное состояние;
- фильтрации свободного метана в выработку по природному и наведенному трещинно-пористому пространству.

Из оценки условий динамического развития трещин в газоносном угле [26] следует, что давление мгновенно образовавшегося свободного метана в трещине даже при высокой газоносности пласта не превышает 0.05 МПа. Это малое давление газа можно не учитывать.

Диффузионный поток молекул метана в трещины определяется разницей концентрации молекул внутри угольного вещества и на поверхности образовавшихся трещин. Фильтрационный отток свободного метана из зоны дезинтеграции в выработку определяется разностью давления свободного метана в зоне дезинтеграции и выработке. Отток метана может начаться после достижения значительного давления метана в зоне дезинтеграции, фактически после прекращения диффузионного притока.

Скорость протекания диффузионных и фильтрационных процессов, согласно исследованиям десорбции метана из угольного пласта на основе диффузионно-фильтрационной модели [27], может различаться на порядки. Наиболее метанонасыщенные пласты в нетронутном состоянии имеют изолированные трещиннопоры и непроницаемы в отношении фильтрации газа [6, 28]. Следовательно, десорбция и фильтрация метана будут иметь существенно различную интенсивность в нарушенных и ненарушенных зонах краевой части пласта.

В крайней зоне интенсивного трещинообразования I (рис. 2), выделяющийся из угольного вещества метан, не влияет на механическое равновесное состояние пласта, поскольку быстро фильтруется в выработку по образовавшимся каналам. В зоне III, если она остается упругой, наведенная нарушенность связана только с образованием изолированных микротрещин, поэтому десорбция и фильтрация в этой зоне должны быть минимальными.

Во внутренней зоне макротрещин II диффузия молекул растворенного метана в трещины может протекать интенсивно, в то же время фильтрация метана из этой зоны в выработку затруднена из-за наличия трудно проницаемой зоны III, если она находится в упругом состоянии. В настоящей работе исходим из условия отсутствия оттока газа из зоны дезинтеграции, если сохраняется слабопроницаемая упругая зона III.

Из анализа натуральных данных выявлено, что в зоне дезинтеграции породы наведенная макротрещиноватость связана преимущественно с разрушением отрывного типа. В [14] показано, что в сжатой породе зону трещин отрыва можно представить как область тесно примыкающих одна к другой протяженных трещин с взаимодействующими берегами. Эта область подобна природному кливажу. Следы сдвига берегов отсутствуют, неровность берегов определяется микроструктурными особенностями породы. Расстояние по нормали между трещинами по порядку величины соответствует миллиметру, характерное расстояние между частично контактирующими берегами каждой трещины не меньше 100 мкм. В метанонасыщенном угле образовавшееся трещинное пространство между частично контактирующими берегами может быть заполнено свободным метаном.

Математическая модель диффузии метана в трещинное пространство включала уравнение диффузии в виде второго закона Фика, уравнение адсорбции Ленгмюра для части вышедших молекул метана на новообразованной поверхности угля и уравнение состояния идеального газа (свободного метана) в трещине [29]. Расчет выхода метана в трещину выполнялся малыми шагами по времени. На каждом шаге определялся диффузионный поток молекул метана в трещинное пространство с учетом изменения концентрации молекул на новообразованной поверхности вследствие адсорбции и изменения давления свободного метана. Длина трещины с частично взаимодействующими берегами равнялась мощности пласта.

Установлено, что давление метана в макротрещинах растет со временем, одновременно растет концентрация адсорбированных молекул на их берегах. Увеличение количества адсорбированных молекул тормозит выход молекул растворенного метана и замедляет рост давления газа в трещинном пространстве. Этот нелинейный процесс наполнения трещин свободным метаном ведет к прекращению диффузии молекул метана в свободное пространство зоны макротрещин.

При постановке задачи диффузии считалось известной газоносность угольного пласта  $M_V$ . Эта величина равна количеству свободного метана в кубических метрах, выделяющегося из кубометра твердого угля при атмосферном давлении и температуре 20 °С. На практике  $M_V$  определяется известными методами и по ней оценивается концентрация растворенного метана в кубометре твердого угля в молях.

Получены зависимости роста давления свободного метана в зоне дезинтеграции мощностью 1.2 м при высокой и низкой газоносности угольного пласта  $M_V = 45, 30$  и  $7.5 \text{ м}^3/\text{м}^3$  (рис. 4). Рост давления газа в зоне дезинтеграции пласта может привести к различным газодинамическим явлениям, в частности, суффлярному выделению метана.

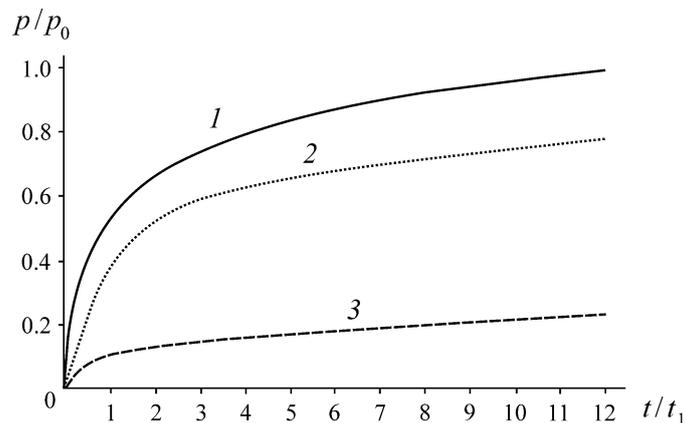


Рис. 4. Зависимость роста давления свободного метана от времени в зоне дезинтеграции II при газоносности пласта 45 (1), 30 (2) и  $7.5 \text{ м}^3/\text{м}^3$  (3):  $t$  — время, прошедшее с момента формирования зоны дезинтеграции II;  $t_1 = 1$  сут — время нормировки

Суффлярное выделение метана определяется как интенсивное выделение метана из природных и техногенных трещин в горные выработки с дебитом не менее  $1 \text{ м}^3/\text{мин}$ . Здесь рассматривается техногенный суффляр, вызванный локальной разгрузкой пласта от горного давления в краевой зоне [30].

Расчетное горное давление вмещающих пород  $\sigma_1^{\text{III}}$  на упругую зону пласта зависит от деформаций  $\varepsilon_1^*$ ,  $\varepsilon_3^*$  и изменяется в широких пределах: от минимального значения, оцененного в [6], до значения прочности, при котором происходит трещинообразование в этой зоне. В определенных случаях давление газа может превысить горное давление. В этих случаях возможно частичное расслоение контакта пласта и вмещающих пород, его приоткрытие и образование газопроводящей трещины  $S$ , соединяющей зону дезинтеграции II и выработку (рис. 2б). Через эту трещину метан поступает в выработку, что проявляется как суффлярное выделение метана из пласта.

Условие раскрытия контакта на границе газонаполненной зоны дезинтеграции запишем в виде  $p \geq \sigma_1^{\text{III}}$ . В этом случае контакт представим в виде протяженной трещины с взаимодействующими берегами. Такие трещины наблюдаются в горных породах. Они не имеют полного зияния. Берега трещин взаимодействуют на множестве локальных соприкосновений, в результате чего через трещину передается нормальная нагрузка, при этом трещины являются коллекторами и проводниками природных флюидов.

Условие  $p = \sigma_1^{\text{III}}$ , определяющее начало прорыва метана в выработку, положено в основу комплексных геомеханических и газодинамических расчетов, по результатам которых установлены соответствующие зависимости между временем начала суфляра  $T$  и параметрами задачи  $\varepsilon_1^*$ ,  $M_V$  и  $\alpha = \varepsilon_3^* / \varepsilon_1^*$  (рис. 5): 1.1 —  $\alpha = 5$ ,  $M_V = 45 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ; 1.2 —  $\alpha = 2.5$ ,  $M_V = 45 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ; 1.3 —  $\alpha = 0.25$ ,  $M_V = 45 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ; 2.1 —  $\alpha = 5$ ,  $M_V = 30 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ; 2.2 —  $\alpha = 2.5$ ,  $M_V = 30 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ; 2.3 —  $\alpha = 0.25$ ,  $M_V = 30 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . При малых деформациях трещинообразования  $\varepsilon_1^*$  требуется относительно небольшое давление газа, чтобы нарушить контакт упругой зоны III с вмещающими породами, и, соответственно, сравнительно небольшое время десорбции метана в зоне дезинтеграции для начала суфлярного выделения метана. При больших деформациях  $\varepsilon_1^*$  напряжения сжатия на контакте упругой зоны и вмещающих пород значительны, поэтому необходимо продолжительное время для достижения критического давления газа. Если деформации  $\varepsilon_1^*$  превышают величину  $2.15 \cdot 10^{-3}$ , то напряжения сжатия в зоне контакта будут столь большими, что даже при максимально возможном давлении метана контакт останется ненарушенным и суфлярного выделения метана из зоны дезинтеграции пласта не произойдет.

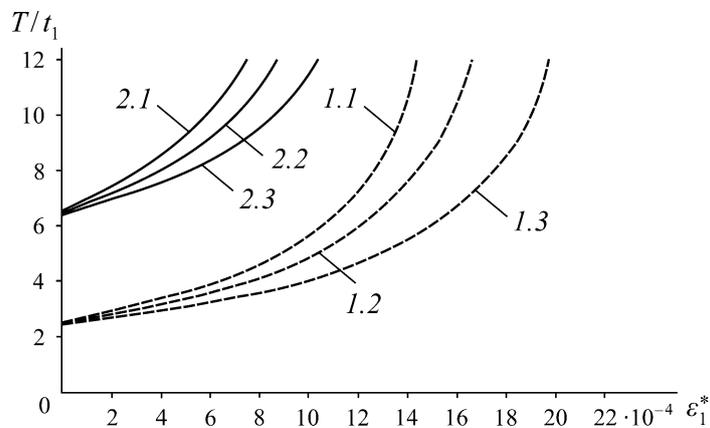


Рис. 5. Зависимость времени начала суфлярного выделения метана  $T$  от вертикальной деформации макротрещиноватости  $\varepsilon_1^*$  при разных параметрах деформаций разрыхления  $\alpha$  и газоносности пласта  $M_V$

Условие образования техногенного суфляра зависит от напряженного состояния пласта, особенностей трещинообразования и газоносности пласта. Рассмотренная модель суфляра принципиально отличается от известной модели, описанной в [31], где определяющим фактором суфляра является фильтрация метана в краевой части пласта.

*Отжим пласта.* Другое действие газа связано со сдвижением краевой части пласта в выработанное пространство, которое определяется как внезапный отжим угля с попутным газовыделением [30]. Это быстропротекающий процесс выдавливания угля из призабойной

части пласта в выработку под действием горного и газового давления (рис. 2в). Отжим угля может происходить в квазистатическом и динамическом режимах. При квазистатическом скорость смещения краевой части пласта (например, на шахтах Донбасса) составляет несколько миллиметров в час [32]. Опасность представляет внезапный, динамический отжим, протекающий за секунды. В этом случае механическое воздействие разрушенного угля может приводить к травматизму рабочих и поломке техники. Смещение при динамическом отжиме превышает 1 м.

Существуют различные геомеханические модели динамического отжима пласта [33, 34]. Первостепенное значение в этих моделях имеет срыв сцепления на контакте вмещающих пород и пласта. В настоящей работе рассматривается модель, в которой определяющее значение имеют образование внутренней зоны дезинтеграции и рост в ней давления метана за счет перехода метана из растворенного состояния в свободное.

Расчеты механического состояния краевой части выполнены с помощью метода конечных элементов. Вмещающая порода и пласт представлялись однородной упругой средой. Определены осредненные нормальные и касательные напряжения на контакте вмещающих пород и пласта, учитывающие давление газа  $p(t)$  в зоне II, и дополнительные напряжения, наведенные деформациями  $\varepsilon_3^*$ ,  $\varepsilon_1^*$ . Равновесное состояние части пласта, включающей зоны I и III, отвечает простому силовому соотношению  $F_s = F_z$  ( $F_s$  — сила, сдвигающая рассматриваемую часть пласта,  $F_z$  — сила препятствующая сдвигу). Сила  $F_s$  зависит от сдвигающих касательных напряжений  $\tau_n^{\text{III}}$  на контакте упругой зоны пласта и вмещающих пород, а также от давления газа во внутренней зоне дезинтеграции  $p(t)$ . Сила  $F_z$  определяется соотношением Кулона–Мора, в котором сцепление отлично от нуля только на ненарушенном контакте упругой зоны пласта и вмещающих пород.

Учитывая, что в рассматриваемых задачах протяженность зон I и III вдоль контакта равна  $0.45r_0$  и  $0.65r_0$ , силу  $F_s$  запишем в виде  $F_s = 1.3\tau_n^{\text{III}}r_0 + hp(t)$ , силу сопротивления —  $F_z = 0.9\sigma_n^{\text{I}}\text{tg}\varphi r_0 + 1.3(\sigma_n^{\text{III}}\text{tg}\varphi + C)r_0$  ( $\varphi$  — угол трения,  $C$  — удельное сцепление берегов контакта,  $\tau_n^{\text{III}}$ ,  $\sigma_n^{\text{I}}$ ,  $\sigma_n^{\text{III}}$  — касательные и нормальные напряжения на контакте в зонах I и III). Сдвигающими касательными напряжениями на контакте зоны трещиноватости I и вмещающих пород пренебрегаем в силу их малости.

Проведена оценка соотношения сил сдвига и сопротивления сдвигу краевой части. Соотношение описывается функцией  $K_F(t) = F_s / F_z$  от безразмерного времени  $t/t_1$ , прошедшего с момента формирования зоны дезинтеграции II. Время нормировки  $t_1 = 1$  сут. В расчетах использовались зависимости роста давления газа, приведенные на рис. 4. На рис. 6 представлены результаты расчетов функции  $K_F(t/t_1)$  при разной деформации макротрещиноватости  $\varepsilon_1^*$ , сцеплении  $C$ , газоносности  $M_V$  и отношения  $\alpha = \varepsilon_3^* / \varepsilon_1^*$ : 1.1 —  $\varepsilon_1^* = 7 \cdot 10^{-3}$ ,  $\alpha = 1.25$ ,  $C = 1$  МПа,  $M_V = 45$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; 1.2 —  $\varepsilon_1^* = 7 \cdot 10^{-3}$ ,  $\alpha = 1.25$ ,  $C = 1$  МПа,  $M_V = 7.5$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; 2.1 —  $\varepsilon_1^* = 2.5 \cdot 10^{-3}$ ,  $\alpha = 0.25$ ,  $C = 1$  МПа,  $M_V = 45$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; 2.2 —  $\varepsilon_1^* = 2.5 \cdot 10^{-3}$ ,  $\alpha = 0.25$ ,  $C = 1$  МПа,  $M_V = 7.5$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; 3.1 —  $\varepsilon_1^* = 2.5 \cdot 10^{-3}$ ,  $\alpha = 2.5$ ,  $C = 1$  МПа,  $M_V = 45$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; 3.2 —  $\varepsilon_1^* = 2.5 \cdot 10^{-3}$ ,  $\alpha = 2.5$ ,  $C = 1$  МПа,  $M_V = 7.5$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; 4.1 —  $\varepsilon_1^* = 2.5 \cdot 10^{-3}$ ,  $\alpha = 2.5$ ,  $C = 3$  МПа,  $M_V = 45$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

4.2 —  $\varepsilon_1^* = 2.5 \cdot 10^{-3}$ ,  $\alpha = 2.5$ ,  $C = 3$  МПа,  $M_V = 7.5$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; 5.1 —  $\varepsilon_1^* = 2.5 \cdot 10^{-3}$ ,  $\alpha = 5.0$ ,  $C = 1$  МПа,  $M_V = 45$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; 5.2 —  $\varepsilon_1^* = 2.5 \cdot 10^{-3}$ ,  $\alpha = 5.0$ ,  $C = 1$  МПа,  $M_V = 7.5$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; 6.1 —  $\varepsilon_1^* = 2.5 \cdot 10^{-3}$ ,  $\alpha = 5.0$ ,  $C = 5$  МПа,  $M_V = 45$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; 6.2 —  $\varepsilon_1^* = 2.5 \cdot 10^{-3}$ ,  $\alpha = 2.5$ ,  $C = 5$  МПа,  $M_V = 7.5$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; 7.1 —  $\varepsilon_1^* = 0.7 \cdot 10^{-3}$ ,  $\alpha = 2.5$ ,  $C = 1$  МПа,  $M_V = 45$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; 7.2 —  $\varepsilon_1^* = 0.7 \cdot 10^{-3}$ ,  $\alpha = 2.5$ ,  $C = 1$  МПа,  $M_V = 7.5$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Полученные зависимости позволяют оценить возможные состояния краевой части пласта. Если значения функции  $K_F$  везде меньше единицы, то краевая часть после образования зоны дезинтеграции II нелинейно деформируется, но не перемещается как связанное тело. Величины деформаций сравнительно малы и по порядку величины соответствуют деформации  $\varepsilon_3^*$ .

Значения функций 2.1, 2.2, 3.2, 4.1, 4.2, 6.2, 7.1, 7.2 не превышают единицы. При соответствующих параметрах рост давления газа не может привести к сдвигу пласта. Значения функций 1.1, 1.2, 3.1, 5.1, 5.2, 6.1 полностью или некоторой частью превышают единицу, следовательно, при соответствующих значениях параметров сдвиг краевой части как связанного тела возможен. Если деформация  $\varepsilon_1^*$  превышает  $0.7 \cdot 10^{-3}$  или  $\alpha > 5$ , то сдвиг может начаться сразу же после образования внутренней зоны дезинтеграции.

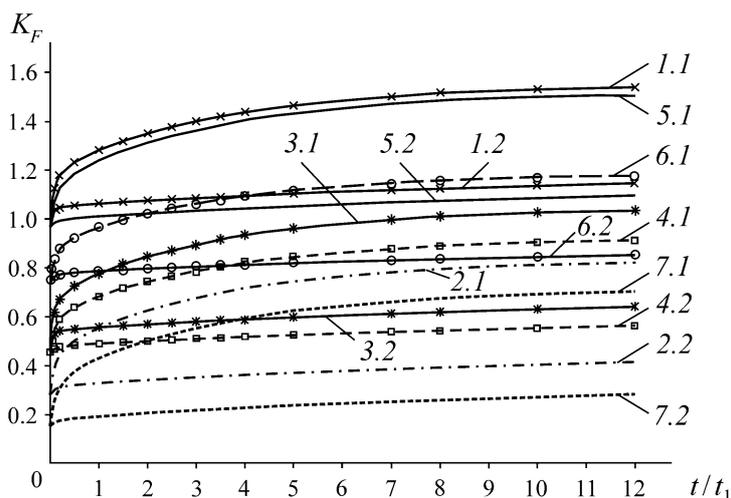


Рис. 6. Функция  $K_F(t)$  при десорбции метана во внутренней зоне дезинтеграции пласта II при разных параметрах разрушения и газоносности

С началом сдвига пласта касательные напряжения, определяемые решением исходной задачи теории упругости и входящие в выражение для сдвигающей силы, исключаются из анализа геомеханического состояния. Изменяется напряженное состояние упругой части III и в ней может выполняться критерий трещинообразования. Это повлечет переход этой части пласта в запредельное состояние и вся краевая часть пласта должна стать областью сплошной трещиноватости. Как следствие, во всей краевой части должны кардинально измениться условия выхода метана из угольного вещества и фильтрации метана в выработку. Взаимодействие этих процессов и их влияние на сдвиг пласта требует специальных исследований.

Если условие  $K_F > 1$  выполняется спустя некоторое время после образования внутренней зоны дезинтеграции, то в этом случае нарушение равновесного состояния краевой части пласта может служить триггером последующих динамических геомеханических и газодинамических изменений в пласте. Возможны два сценария газодинамических изменений. Согласно первому, высокое давление газа в зоне дезинтеграции II будет проталкивать зоны I и II в выработанное пространство (рис. 2в). Этому сценарию может способствовать срыв сцепления на контакте вмещающих пород и упругой части пласта.

Если сдвигение краевой части по каким-либо причинам затруднено, то при достаточно большом давлении газа возможен второй сценарий с прорывом смеси разрушенного угля и газа из зоны II — внезапный выброс угля и газа. Существуют различные модели выброса из внутренней зоны разрушенного угля и газа [35].

Рассматривая первый сценарий, найдем положение краевой части пласта после ее динамического смещения. При динамическом процессе запредельное деформирование должно перейти в фазу, которая характеризуется устойчивой ветвью деформирования и определяется остаточной прочностью геоматериала  $\sigma_0^*$ , которая оценивается соотношением  $\sigma_0^* \sim (0.1 - 0.5)\sigma_0$ , где  $\sigma_0$  — прочность на одноосное сжатие [14].

При сдвигении краевой части происходит увеличение объема зоны дезинтеграции II, давление газа падает, степень разрушения угля возрастает. Для определения новой величины давления газа можно использовать условие остановки сдвигения пласта. Запишем его как равенство двух сил, одна из которых определяется давлением газа, другая — трением:  $p_s h = \sigma_0^* \operatorname{tg} \varphi (l_I + l_{III}) \Delta l$ . Здесь  $p_s$  — давление газа в зоне II после остановки сдвигения,  $\Delta l$  — смещение краевой части пласта (отжим пласта).

Вместе с тем, для определения величины  $p_s$  можно использовать закон Бойля–Мариотта. Для этого надо знать размеры зон I, II, III, мощность пласта и давление газа  $p_c$  на момент начала сдвигения пласта  $t_c$ . Величина  $t_c$  оценивается по зависимостям, определяющим начало сдвигения пласта и представленным на рис. 6. По известному значению  $t_c$  оценивается величина давления свободного метана в зоне II по графикам рис. 4.

Проведя несложные расчеты, построим зависимости величины динамического смещения краевой части пласта в выработку  $\Delta l$  от мощности зоны дезинтеграции  $l_{II}$  при разных параметрах задачи  $\omega = r_0 / h$ ,  $\beta = p_c / (\sigma_{res} \operatorname{tg} \varphi)$ : 1.1 —  $\omega = 1$ ,  $\beta = 10$ ; 1.2 —  $\omega = 1$ ,  $\beta = 5$ ; 1.3 —  $\omega = 1$ ,  $\beta = 2$ ; 2.1 —  $\omega = 2$ ,  $\beta = 10$ ; 2.2 —  $\omega = 2$ ,  $\beta = 5$ ; 2.3 —  $\omega = 2$ ,  $\beta = 2$ ; 3.1 —  $\omega = 3$ ,  $\beta = 10$ ; 3.2 —  $\omega = 3$ ,  $\beta = 5$  (рис. 7).

Отметим, что если преддинамическое состояние пласта определяется прочностью угля, деформациями трещинообразования, сцеплением на контакте пласта и вмещающих пород, а также газоносностью пласта, то постдинамическое состояние определяется другой группой параметров (трением на контакте пласта, остаточной прочностью угля в пласте, протяженностью внутренней зоны дезинтеграции и мощностью пласта).

Оценим величину динамического отжима пласта. Принимая радиус выработки равным 1.5 м, радиальную протяженность второй зоны дезинтеграции 1.2 м, возможный диапазон угла трения берегов контакта  $10 - 30^\circ$ , диапазон мощности пласта 0.5–1.5 м, возможный диапазон давления газа на момент начала сдвигения пласта  $(0.4 - 1.0)p_0$ , из расчетов находим, что величина отжима пласта может варьироваться от сантиметров до 2–3 м. Эти значения соответствуют практическим данным.

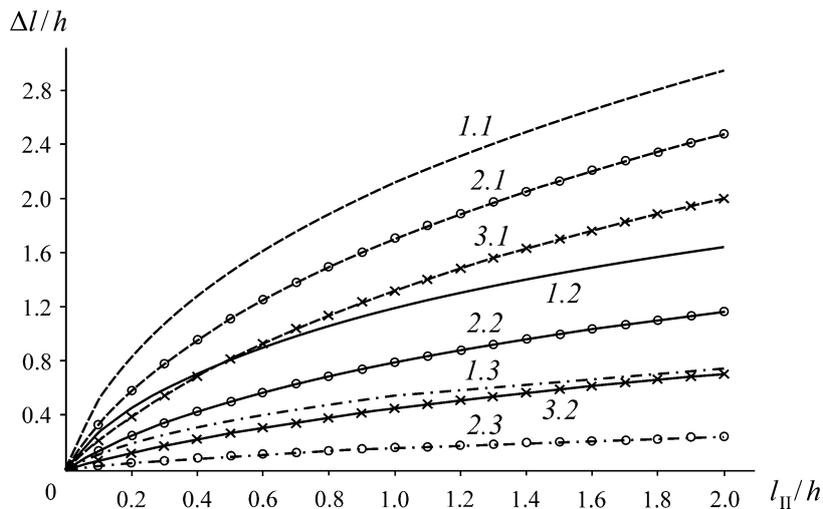


Рис. 7. Зависимость между смещением пласта при отжиге  $\Delta l$  и мощностью зоны дезинтеграции  $l_{II}$  при разных параметрах задачи

Чем больше деформации трещинообразования и выше газоносность пласта, тем благоприятней условия для сдвижения краевой части. При этом большое значение имеет сцепление на контакте пласта и вмещающих пород: чем выше сцепление, тем более высокое давление газа может быть в зоне дезинтеграции и, как следствие, в этом случае величина динамического отжима больше. Однако, очень высокое сцепление, сопоставимое с прочностью угля на сдвиг, блокирует отжим, поскольку давление газа не может превысить определенное критическое значение.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование зональной дезинтеграции газоносных угольных пластов имеет двойное значение. С одной стороны, оно способствует более глубокому пониманию природы газодинамических явлений в угольных выработках на основе концепции механического разрушения угля как первопричины газопроявлений, с другой, дает более глубокое понимание самого механизма разрушения пласта на основе анализа последующих газопроявлений.

В настоящей работе используется концепция неустойчивости геомеханического состояния пласта, которая обусловлена неустойчивостью деформирования пласта при образовании микротрещин и неустойчивостью трещинообразования в макромасштабе. Путем введения в анализ условных деформаций трещинообразования показано, что эффект зональной дезинтеграции пласта, т. е. чередование неразрушенных упругих зон пласта и сильно трещиноватых зон, в рассматриваемом случае возможен, если усредненная вертикальная деформация проседания в зоне образования макротрещин отвечает условию  $\varepsilon_1^* < 3.5 \cdot 10^{-3}$ . В противном случае в краевой зоне пласта должна сформироваться область сплошной макротрещиноватости.

В метанонасыщенном пласте при зональной дезинтеграции появляются зоны с разной интенсивностью образования свободного метана, изначально находящегося в растворенном состоянии. Со временем внутренняя зона дезинтеграции пласта становится зоной высокого давления газа, который может участвовать в последующих процессах разрушения пласта. Оценки показали, что возможны различные газопроявления (медленное сдвижение пласта в выработку, динамический отжим пласта, суффлярное выделение метана, выброс угля и газа).

Важную роль играет соотношение интенсивности диффузионного процесса выхода молекул метана из угольного вещества и фильтрации свободного метана в выработку. Поскольку внутренняя зона дезинтеграции окружена слабо фильтрующей упругой частью угля и пород, процесс образования свободного метана в ней должен идти быстрее, чем фильтрационный отток. В общем случае зональная дезинтеграция пласта может кардинально влиять на общий процесс фильтрации, поскольку четко выделяются области преимущественного появления свободного метана и формируется существенно неоднородная по фильтрационным свойствам среда.

Идея связи зональной дезинтеграции угольного пласта с распадом твердого углеметанового раствора разрабатывалась в [8–10]. Области распада углеметанового раствора изначально ассоциировались с областями низких техногенных напряжений. В данной работе показано, что сначала эти области должны быть зонами повышенных напряжений, а снижение напряжений вызывается трещинообразованием. Новым элементом является учет десорбции метана, и как следствие, учет фактора времени в заполнении зоны дезинтеграции свободным метаном. При этом необходимо выделять момент образования зоны дезинтеграции пласта и время заполнения этой зоны метаном до соответствующего предельного давления газа.

Проведенное исследование — пример системного подхода в анализе природно-техногенных явлений, происходящих в горных выработках [36–40]. В этом подходе взаимоувязаны постановка задач исследования геопроцессов и порядок моделирования. Решение одной геомеханической задачи определяет постановку последующих задач геомеханического или газодинамического содержания. Это дает возможность более глубоко вникнуть в природу взаимосвязи процессов и проследить переходы в системе. Здесь фактически рассматривается масштабный переход с микроуровня на макроуровень. Начало необратимых изменений в пласте угля связано с микроуровнем и проявляется в виде формирования микротрещиноватости и волнообразного распределения напряжений. Волнообразное распределение напряжений создает основу для перехода на следующий масштабный уровень вследствие развития макротрещин на всю толщину пласта и формирования в масштабе выработки неоднородной структуры макронарушенности. Далее рассматривается разрушение пласта на более крупном масштабном уровне в виде отжима пласта. Общей чертой перехода с одного уровня на другой является неустойчивость изменений на соответствующем масштабной уровне.

Анализ иерархии геопроцессов способствует созданию более адекватной системы контроля и прогноза газодинамических явлений в горных выработках на основе существующих методик лабораторных и шахтных экспериментов. Электронно-оптический анализ углей позволяет выявить их трещинную структуру в масштабе микрона и склонность к газодинамическим явлениям [41]. Шахтные средства контроля позволяют фиксировать время образования зоны макротрещинообразования в пласте с помощью сейсмоакустического мониторинга и изменение деформаций пласта с помощью геомониторинга смещений пород.

Зона высокого давления газа внутри пласта, находящаяся в нескольких метрах от забоя, является техногенным очагом выбросопасности [38]. Наличие таких зон подтверждает правомерность проведения мероприятий по принудительной дегазации краевой части пласта, например, бурением дегазационных скважин или предварительным разупрочнением угольного пласта [42, 43].

## ВЫВОДЫ

Зональная дезинтеграция пород может быть вызвана процессами разных масштабных уровней — начальным процессом образования микротрещин, следствием которого является волнообразное распределение напряжений, и последующим процессом образования макротрещин, в котором либо усиливается, либо сглаживается неоднородность трещинообразования.

При разработке угольных пластов зональная дезинтеграция пласта является фактором, формирующим газодинамические процессы, поскольку в зоне дезинтеграции создаются благоприятные условия для перехода метана из растворенного состояния в угольном веществе в свободное состояние в трещинах. Зоны дезинтеграции угля могут породить газодинамические явления разных типов — суфляр, отжим пласта, выбросы угля и газа.

При изучении геопроцессов и явлений в подземных выработках целесообразно использовать схему многозадачного моделирования, позволяющую, в отличие от одномодельного подхода, более адекватно учесть последовательность действия разных природных и техногенных факторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шемякин Е. И., Фисенко Г. Л., Курленя М. В., Опарин В. Н., Рева В. В., Глушихин Ф. П., Розенбаум М. А., Тропп Э. А., Кузнецов Ю. С. Эффект зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок // ДАН СССР. — 1986. — Т. 289. — № 5. — С. 1088–1094.
2. Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Розенбаум М. А., Рева В. Н., Бадтиев Б. П., Тропп Э. А., Чанышев А. И. Зональная дезинтеграция горных пород и устойчивость подземных выработок. — Новосибирск: СО РАН, 2008. — 278 с.
3. Гузев М. А., Макаров В. В. Деформирование и разрушение сильно сжатых горных пород вокруг выработок. — Владивосток: Дальнаука, 2007. — 231 с.
4. Xu-Guang Chen, Qiang-Yong Zhang, Yuan Chyng Wang, Shu-Cai Li, and Han-Peng Wang. In situ observation and model test on zonal disintegration in deep tunnels, J. Test. Eval., 2013, Vol. 41, No. 6. — P. 1–11.
5. Adams G. R. and Jager A. J. Petroscopic observation of rock fracturing ahead of stop face in deep-level gold mines, J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 1980, Vol. 80, No. 6. — P. 204–209.
6. Makarov V. V., Guzev M. A., Odintsev V. N., and Ksendzenko L. S. Periodical zonal character of damage near the openings in highly-stressed rock mass conditions, J. Rock Mech. Geotech. Eng., 2016, Vol. 8, No. 2. — P. 164–169.
7. Малышев Ю. Н., Трубецкой К. Н., Айруни А. Т. Фундаментально прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов. — М.: Акад. горн. наук, 2000. — 519 с.
8. Полевщиков Г. Я., Киряева Т. А. Газодинамические следствия распада углеметановых геоматериалов при подземной разработке месторождений // Вест. КузГТУ. — 2008. — № 4 (68). — С. 6–9.
9. Полевщиков Г. Я., Плаксин М. С. Газодинамическая активность угольных пластов и зональная дезинтеграция массива горных пород при проведении подготовительных выработок // Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012. — С. 83–89.
10. Полевщиков Г. Я., Козырева Е. Н., Шинкевич М. В., Леонтьева Е. В. Техногенная структуризация массива горных пород при выемке пласта угля // Горн. журн. — 2017. — № 4. — С. 19–23.
11. Гузев М. А., Парошин А. А. Неевклидова модель зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземной выработки // ПМТФ. — 2001. — № 1. — С. 147–156.

12. **Ройтер М., Крах М., Кислинг У., Векслер Ю. А.** Зональная дезинтеграция горных пород вокруг очистных выработок // ФТПРПИ. — 2015. — № 2. — С. 46–52.
13. **Кайдо И. И.** Особенности охраны целиками подготовительных выработок при зональной дезинтеграции массива // ГИАБ. — 2010. — № 6. — С. 211–217.
14. **Одинцев В. Н.** Отрывное разрушение массива скальных горных пород. — М.: ИПКОН РАН, 1996. — 166 с.
15. **Xu-Guang Chen, Yuan Chyng Wang, Qiang-Yong Zhang, Shu-Cai Li, and Erling Nordlund.** Analogical model test and theoretical analysis on zonal disintegration based on filed monitoring in deep tunnel, Eur. J. Env. Civ. Eng., 2013, Vol. 17. — P. 33–52.
16. **Qingteng Tang, Wenbing Xie, Xingkai Wang, Zhili Su, and Jinhai Xu.** Numerical study on zonal disintegration of deep rock mass using three-dimensional bonded block model, Adv. Civ. Eng., 2019, Article ID 3589417. — 12 p.
17. **Циопин Ч., Циу Ц.** Механизм зональной дезинтеграции ослабленного микротрещинами вмещающего породного массива вокруг глубинных тоннелей круглого сечения // ФТПРПИ. — 2014. — № 2. — С. 47–57.
18. **Wu Hao, Guo Zhi-Kun, Fang Qin, and Liu Jin-Chun.** Mechanism of zonal disintegration phenomenon in enclosing rock mass around deep tunnels, J. Cent. South Univ. Technol., 2009, Vol. 16. — P. 303–311.
19. **Wang X., Pan Y., and Wu X.** A continuum grain-interface-matrix model for slabbing and zonal disintegration of the circular tunnel surrounding rock, J. Min. Sci., 2013, Vol. 49, No. 2. — P. 220–232.
20. **Nikitin L. V. and Odintsev V. N.** A Dilatancy model of tensile macrocracks in compressed rock, Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 1999, Vol. 22, No. 11. — P. 1003–1009.
21. **Ксендзенко Л. С., Лосев А. С.** Оптимизация вычисления параметра периодичности модели зонального разрушения массива горных пород // Горн. науки и технологии. — 2016. — № 2. — С. 43–47.
22. **Хоменко О. Е.** Энергетический метод исследования зональной дезинтеграции горных пород // Науч. вест. НГУ. — 2012. — № 4. — С. 44–54.
23. **Коваленко Ю. Ф., Сидорин Ю. В., Устинов К. Б.** Деформирование массива угля при наличии в нем системы изолированных газонаполненных трещин // ФТПРПИ. — 2012. — № 1. — С. 33–45.
24. **Никитин Л. В., Одинцев В. Н.** Механика отрывного разрушения сжатых газонесущих горных пород // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. — 1988. — № 6. — С. 135–144.
25. **Brooks Z.** Fracture process zone: microstructure and nanomechanics in quasi-brittle materials, Thesis (Ph. D), Massachusetts Institute of Technology, 2013. — 355 p.
26. **Одинцев В. Н.** Внезапный выброс угля и газа — разрушение природного угля как раствора метана в твердом веществе // ФТПРПИ. — 1997. — № 6. — С. 18–28.
27. **Алексеев А. Д., Василенко Т. А., Гуменник К. В., Калугина Н. А., Фельдман Э. П.** Диффузионно-фильтрационная модель выхода метана // Журн. техн. физики. — 2007. — Т. 77. — Вып. 4. — С. 65–74.
28. **Христианович С. А., Коваленко Ю. Ф.** Об измерении давления газа в угольных пластах // ФТПРПИ. — 1988. — № 3. — С. 3.
29. **Одинцев В. Н., Шиповский И. Е.** Моделирование влияния взрывного воздействия на газодинамическое состояние пачки выбросоопасного угля // ФТПРПИ. — 2019. — № 4. — С. 46–57.
30. **Большинский М. И., Лысиков Б. А., Каплюхин А. А.** Газодинамические явления в шахтах. — Севастополь: Вебер, 2003. — 284 с.
31. **Кузнецов С. В., Трофимов В. А.** Об одном механизме суффлярных выделений газа из угольных пластов // ФТПРПИ. — 2004. — № 4. — С. 23–28.

32. **Кравченко В. И.** Отжим угля при разработке пологопадающих пластов Донбасса. — М.; Харьков: Углетехиздат, 1951. — 52 с.
33. **Кузнецов С. В., Трофимов В. А.** Волна разрушения в краевой части пласта при “внезапном отжиме” // Взрывное дело. — 2014. — № 111 (68). — С. 32–48.
34. **Трофимов В. В., Филиппов Ю. А.** Динамика “внезапного” отжима краевой части угольного пласта // Триггерные эффекты в геосистемах. — М.: ГЕОС, 2015. — С. 235–242.
35. **Трофимов В. А.** Внезапный выброс угля и газа. Вынос угля и газа в выработанное пространство // ГИАБ. — 2011. — S 1. — С. 391–405.
36. **Полевщиков Г. Я.** Условия динамического саморазрушения газоносных материалов // ГИАБ. — 1999. — № 1. — С. 221–223.
37. **Fan Chaojun, Li Sheng, Luo Mingkun, Du Wenzhang, Yang Zhenhua** Coal and gas outburst dynamic system, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 2017, Vol. 27. — P. 49–55.
38. **Булат А. Ф., Дырда В. И.** Некоторые проблемы газодинамических явлений в угольном массиве в контексте нелинейной неравновесной термодинамики // Геотехн. механика. — 2013. — Вып. 108. — С. 3–31.
39. **Guzev M. A., Odintsev V. N., and Makarov V. V.** Principals of geomechanics of highly stressed rock and rock massifs, *Tunnelling Underground Space Technol.*, 2018, Vol. 81. — P. 506–511.
40. **Серяков В. М.** Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород при применении технологий с закладкой выработанного пространства // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 51–60.
41. **Трубецкой К. Н., Рубан А. Д., Викторов С. Д., Малинникова О. Н., Одинцев В. Н., Кочанов А. Н., Учаев Д. В.** Фрактальная структура нарушенности каменных углей и их предрасположенность к газодинамическому разрушению // ДАН. — 2010. — Т. 431. — № 6. — С. 818–821.
42. **Подготовка и разработка высокогазоносных угольных пластов** / под ред. А. Д. Рубана, М. И. Щадова. — М.: Горн. кн., 2010. — 500 с.
43. **Клишин В. И., Кокоулин Д. И., Кубанычбек Б., Дурнин М. К.** Разупрочнение угольного пласта в качестве метода интенсификации выделения метана // Уголь. — 2010. — № 4 (1008). — С. 40–42.

*Поступила в редакцию 16/IX 2020*

*После доработки 27/X 2020*

*Принята к публикации 03/XI 2020*