

## ГЕОМЕХАНИКА

УДК 66.002.3; 622.7.004.18

### О ВОЗМОЖНОМ ВЛИЯНИИ ВТОРИЧНЫХ ОСАДКОВ ОСНОВНОЙ КРОВЛИ ПРИ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ НА ИХ ВЫБРОСОПАСНОСТЬ ПРИ РАЗЛОЖЕНИИ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ

В. В. Дырдин<sup>1</sup>, В. Н. Опарин<sup>2</sup>, А. А. Фофанов<sup>1</sup>,  
В. Г. Смирнов<sup>1</sup>, Т. Л. Ким<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева,

E-mail: ktl.fiz@kuzstu.ru, ул. Весенняя, 28, 650000, г. Кемерово, Россия

<sup>2</sup>Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,

Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

Приведены результаты физического моделирования геомеханических процессов, протекающих в краевых зонах угольных пластов, основная кровля которых представлена труднообрушаемыми породами. Исследовано влияние изменения температуры и давления газа при его ступенчатом выпуске из автоклава на процессы газовой выделенности, что соответствует периодическому механическому воздействию на угольный пласт в зонах “газового мешка”. Установлено, что возникающие низкочастотные (2.0–4.5 Гц) затухающие колебания пород основной кровли при вторичных осадках могут приводить не только к вторичной дезинтеграции массива, но и к процессам десорбции метана и разложению газовых гидратов (при их наличии), сопровождающихся повышением давления газа с реализацией газодинамических явлений в краевой зоне угольного пласта.

*Газодинамические явления, вторичные осадки, зона дезинтеграции, “газовый мешок”, газогидраты метана, выбросоопасность, низкочастотные колебания, температура, давление, моделирование*

DOI: 10.15372/FTPRPI20170501

Изучение физико-химических процессов, происходящих при подземной разработке угольных месторождений, важно для совершенствования технологических процессов и безопасного ведения горных работ.

Основными компонентами угольных пластов являются высокомолекулярные соединения, образовавшиеся путем конденсации из различных химических веществ, входящих в состав отмерших растений. Кроме циклических углеродных колец в структуре угля содержится бахрома, включающая метильные группы  $\text{CH}_3$ ,  $\text{CH}_2$ , а также  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ . В угольном пласте имеются поры и трещины, внутри и на поверхности которых находится вода в свободном и химически связанном состоянии, а также природный газ, который на 85–95 % состоит из метана. Помимо метана в угольном пласте присутствуют азот, углекислый газ, сероводород, аргон и другие газы, но их содержание в сумме не превышает 10–12 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-05-00573а), а также ОНЗ РАН-3.1 (руководитель — член-корр. РАН В. Н. Опарин).

Метан в угольных пластах находится в различных формах связи с углем: свободном, сорбированном, в виде твердого раствора и кристаллогидратов. Гидраты метана представляют собой соединения, в которых молекулы гидрофобных газов включены в полости кристаллического каркаса, построенного посредством водородных связей из молекул воды [1]. Помимо газовых гидратов, метан может быть в виде интеркаляционных соединений, т. е. соединений включения, образующихся в результате обратимой реакции внедрения молекул газа в межслоевое пространство кристаллических веществ со слоистым типом структуры.

Впервые на возможность существования гидратов метана в угольном пласте указал Ю. Ф. Макогон, который стал первооткрывателем природных газогидратов [2]. В [3 – 5] исследуются физико-химические эффекты, связанные с образованием и диссоциацией газогидрата метана в угольных пластах, и их влияние на газодинамические явления в краевой зоне угольных пластов.

В природной среде при давлении газа в несколько десятков атмосфер в большинстве случаев газовые гидраты встречаются в виде трех структурных типов (табл. 1): КС-I (кубическая структура I), КС-II (кубическая структура II), ГС-III (гексагональная структура III). В угольных пластах отмечен только один тип газогидратов метана КС-I (рис. 1). Элементарная ячейка такого газового гидрата содержит 46 молекул воды, образующих шесть больших Т-полостей и две малых D-полости, которые могут занимать 8 молекул метана [6, 7]. В гидратных соединениях включения кристаллическая решетка “хозяина” построена из молекул воды, связанных между собой водородными связями, а молекулы “гостя” полностью или частично располагаются в полиэдрических полостях этой решетки.

ТАБЛИЦА 1. Типы клатратных каркасов, обнаруженные среди газовых гидратов [6]

Тип, пространственная группа	Параметр ячейки $a$ , Å, плотность полого каркаса $\rho$	Формула элементарной ячейки	Пример гостевых молекул
Кубическая I, КС-I	$a = 12.0, \rho = 0.796$	$6T \cdot 2D \cdot 46H_2O$	Цикло- $C_3H_6$ , $CH_4$ , $H_2S$
Кубическая II, КС-II	$a = 17.1, \rho = 0.812$	$8H \cdot 16D \cdot 136H_2O$	$CCl_4$ , Ar, Kr
Гексагональная III, ГС-III	$a = 12.3, \rho = 0.768$	$E \cdot 2D' \cdot 3D \cdot 34H_2O$	$CH_3C_6H_{11} + H_2S$

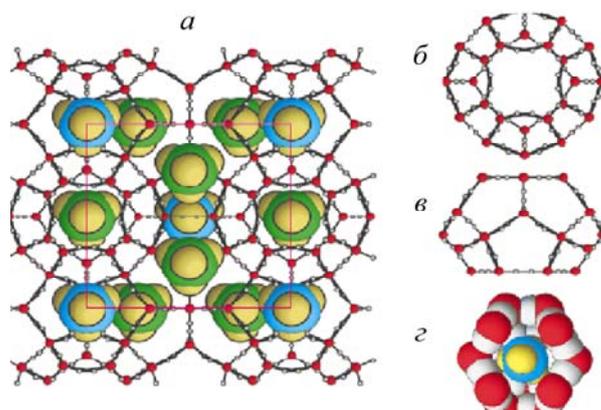


Рис. 1. Структурный фрагмент молекулы газогидрата метана типа КС-I:  $a$  — D- (голубого цвета) и Т-полости (зеленого цвета) (выделена элементарная ячейка);  $b$ ,  $v$  — Т-полость (вид сверху и вид сбоку);  $z$  — D-полость с включенной молекулой метана в ван-дер-ваальсовых очертаниях хозяйской и гостевой подсистем [7]

Процессы образования газогидратов метана в угольных пластах характеризуются наличием влаги и определенным соотношением давления и температуры системы (условия стабильности гидрата). В зависимости от термодинамических параметров система “влаги – метан” может находиться в состоянии “газ – гидрат” или “газ – влага”, а сами состояния разделяться равновесной

кривой. В [8] приведены равновесные кривые для различных природных газов и их смесей. Например, при температуре 10 °С возможен переход метана из гидратного состояния в газообразное (рис. 2) при резком падении давления от значений, больших 8 МПа (над кривой фазового перехода), до значений, меньших 6 МПа (ниже кривой).

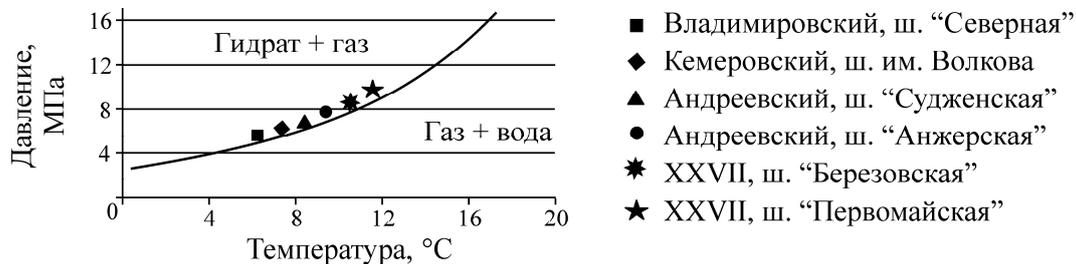


Рис. 2. Термобарические условия угольных пластов Кузбасса в проекции на равновесную кривую фазового состояния системы “уголь – метан – вода”

Для практики горного дела важно знать не только общее количество содержащегося в угле метана, но и его фазовое состояние, т. е. соотношение между количеством метана в виде газа (“свободный метан”) и других фазовых состояниях. Роль различных видов существования метана в угольном веществе в формировании газодинамических процессов до конца не ясна, поскольку объем выделяющегося метана при внезапных выбросах угля и газа превышает природную газоносность. Значения термобарических параметров, соответствующих фазовому переходу, определяются равновесными значениями [6], представленными на рис. 2.

Термодинамические условия в угольных пластах Кузбасса, по данным ВостНИИ и каталога шахтопластов Кузнецкого, Карагандинского и Печорского угольных бассейнов с характеристикой горно-геологических факторов и явлений, на 80 % соответствуют термодинамическим условиям гидратообразования природного газа [9]. Вместе с тем в процессах образования и диссоциации газогидратов необходимо рассматривать суммарное давление, т. е. газовое и обусловленное вышележащими горными породами, которое может изменяться в широком диапазоне. Кроме того, при разрушении угля силами горного давления появляются другие газы: этан, пропан и пр., для образования газогидратов из которых требуются более “мягкие” термобарические условия, т. е. при определенной температуре угольного пласта они могут образовываться при меньших давлениях газа. Процессы образования и диссоциации газогидратов метана и его смесей в матрице каменного угля описаны в [10]. Китайские ученые также высказывают идеи по борьбе с внезапными выбросами угля и газа путем закачки углекислоты в угольные пласты для достижения наиболее “мягких” условий гидратообразования.

В этой связи возникает вопрос о влиянии диссоциации гидратов метана при внезапном падении давления, связанного с процессами горных работ, на выбросоопасность угольных пластов при очистных работах. Зависание пород труднообрушаемой кровли позади очистного забоя вызывает ее “отрицательную” деформацию в некоторой части зоны опорного давления, что приводит к образованию так называемого “газового мешка” [11], в котором давление существенно меньше, чем на соседних участках. Действительно, вес зависающей части основной кровли переносится на угольный пласт впереди очистного забоя, создавая зону концентрации напряжений. При этом возникает момент пары сил: силы тяжести зависающего конца пород основной кровли и силы реакции, приложенной в зоне опорного давления. Для равновесия вращающий момент должен быть скомпенсирован за счет перераспределения сил в зоне опорного давления. Деформации зависающего конца пород основной кровли направлены вниз (рис. 3), поэтому в зоне опорного давления должна быть область, в которой деформации основной кровли направлены вверх.

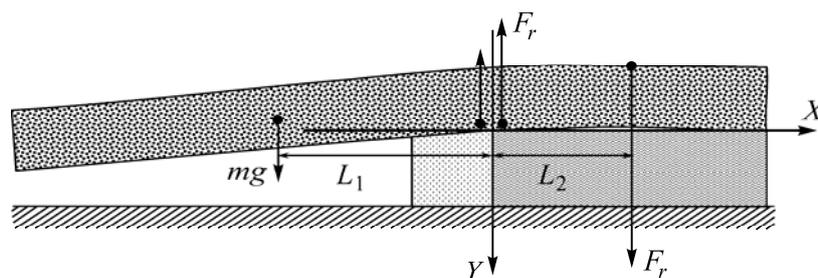


Рис. 3. Схема для расчета силы реакции

Начало координат на рис. 3 выбрано на границе зон упругих и неупругих деформаций. Выработанное пространство находится слева от зоны отжима. При равновесии векторная сумма моментов сил относительно горизонтальной оси, проходящей через начало координат, должна быть равна нулю. На зависающую часть основной кровли действует момент силы тяжести, модуль которого определяется выражением  $M_1 = L_1 mg$ , где  $M_1$  — вращающий момент;  $L_1$  — характерный рычаг, равный половине длины зависающей части кровли;  $mg$  — вес зависающей части. На правую часть кровли для выполнения условий равновесия должна действовать дополнительная сила реакции  $F_r$ , приложенная на  $L_2$  — некотором эффективном расстоянии от начала координат. Тогда модуль момента сил, действующий на правую часть кровли, можно записать так:  $M_2 = L_2 F_r$ .

Вблизи начала координат для равновесия вертикальных проекций сил необходимо приложить дополнительную силу, равную не только массе зависающей части пласта, но и дополнительной силе реакции. Сила реакции зависит от отношения плеч и массы зависающей части основной кровли:

$$F_r = mg(L_1/L_2).$$

Величина  $L_1$  может составлять порядка 10–12 м. При наличии впереди забоя разломов основной кровли  $L_2$  может иметь протяженность 5–10 м, т. е. сила реакции будет примерно в 1.2–2.0 раза больше силы тяжести, действующей на зависающую часть кровли. Оценим характерный размер участка, на который распределяется сила реакции. Примем, что он также соизмерим с величиной  $L_2$ . Пусть длина рассматриваемого участка пласта вдоль линии забоя равна  $Z_0$ , в этом случае дополнительные напряжения, разгружающие пласт, запишутся в следующем виде:

$$\sigma_r = \frac{F_r}{Z_0 L_2}.$$

Силу тяжести рассчитаем с учетом мощности пород основной кровли  $h$  и  $Z_0 2L_1$  — площади рассматриваемого участка:  $mg = \gamma h Z_0 2L_1$ . Исходя из данных соотношений, разгружающее напряжение, возникающее в зоне опорного давления, можно оценить по формуле

$$\sigma_r = \gamma h \cdot 2 \left( \frac{L_1}{L_2} \right)^2.$$

Если принять, что мощность основной кровли  $h = 20$  м, а отношение  $2(L_1/L_2)^2 \approx 10$ , то разгружающее напряжение соизмеримо с горным давлением ненарушенного пласта. Более точные расчеты, проведенные для сплошной однородной основной кровли, показывают, что ширина зоны, в которой смещения кровли направлены вверх, составляет примерно 20–25 м [12]. Данную зону называют “газовым мешком”. Это потенциальный очаг газодинамического явления (ГДЯ),

вероятность реализации которого возрастает с увеличением размера области “газового мешка” и ростом газового давления в нем. Состояние угля и давление газа в данной области периодически изменяются с продвижением фронта забоя, вторичными осадками основной кровли и возникающими при этом затухающими колебаниями. Частота затухающих колебаний кровли [12] может составлять от 2.0 до 4.5 Гц в зависимости от ее физико-технических параметров. При колебательных движениях пород основной кровли давление в зоне “газового мешка” в полуволну разгрузки значительно уменьшается, что вызывает процессы десорбции газа и разложение в массиве газогидратов метана (при их наличии), а в полуволну пригрузки газовое давление значительно возрастает за счет увеличения количества свободного газа, что приводит к формированию ГДЯ.

Во время вторичных осадок основной кровли коэффициент концентрации напряжений в зоне максимума опорного давления может достигать 6–8 [13], тем самым инициируя процесс зональной дезинтеграции массива горных пород путем образования чередующихся областей относительного уплотнения и разуплотнения в глубине массива на некотором удалении от очистного забоя [14–16].

Поровые газогидраты метана могут появляться в угольных пластах в различные периоды, когда соответствующие уровни давления и температуры обеспечивают состояние угленосной системы выше равновесной кривой для объемных газогидратов [4, 5]. Диссоциацию газогидратов метана вызывает падение давления в системе “газ–массив–влага” до значений, меньших равновесных. Внезапные выбросы угля и газа в очистных выработках достаточно редки по сравнению с подготовительными, но важно то, что они проявляются значительно интенсивнее и приводят к более “катастрофичным” последствиям [17, 18].

#### ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ И ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ ПРИ ВТОРИЧНЫХ ОСАДКАХ ОСНОВНОЙ КРОВЛИ

Для физического моделирования таких процессов выполнен лабораторный эксперимент по изучению поведения температуры и давления природного газа при его ступенчатом выпуске из автоклава. Это соответствует процессам периодического воздействия на угольный пласт колебаний пород основной кровли при вторичных осадках.

Автоклав (рис. 4) представляет собой изготовленный из нержавеющей стали цилиндрический стакан 1 с внутренним диаметром 59 мм, глубиной 108 мм и толщиной стенок 4 мм. Сверху он герметично закрывается крышкой, оборудованной стальным капилляром 2 для подвода газа и хромель-копелевой термопары 3, вводимой в геометрический центр стакана. Автоклав рассчитан на рабочее газовое давление внутри до 15 МПа. Давление газа в автоклаве измерялось преобразователем давления МИДА-ПИ-51 (25 МПа), постоянно находящемся в термостабильной зоне и соединенным с автоклавом газовым капилляром 2.

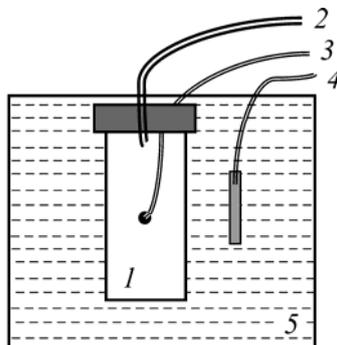


Рис. 4. Схема автоклава для изучения образования газовых гидратов в углях: 1 — цилиндрический стакан; 2 — стальной капилляр; 3 — термопара; 4 — медный термометр; 5 — жидкостной криостат

Сигналы от преобразователя давления, термопары, а также от образцовых термометров сопротивления поступали на многоканальный прецизионный измеритель температуры серии МИТ8 (рис. 4), преобразующий измеряемые сопротивления и термоЭДС в значения температуры на основе встроенных в память прибора характеристик. Показания по каждому каналу записывались с интервалом 22 с. Полученные данные преобразовывались МИТ8 в цифровую форму и записывались в память компьютера 6 (рис. 5). С преобразователем давления в качестве стабилизированного источника постоянного напряжения ( $10.00 \pm 0.01$  В) использовался компаратор напряжений Р3003 с блоком выдачи калиброванных напряжений.

Во время основного этапа каждого из экспериментов автоклав полностью помещался в жидкостный криостат 5 (рис. 4). Данный криостат также изображен 3 на рис. 5, где показана общая схема экспериментальной установки. Используемый криостат Термекс Крио-ВТ-01 оборудован погружным циркуляционным блоком регулирования температуры М12М. Производитель гарантирует в диапазоне от  $-30$  до  $+100$  °С точность поддержания температуры  $0.1$  °С в жидком теплоносителе (Тосол А-40М), а также возможность линейного изменения температуры в соответствии с программой, вводимой вручную через дисплей блока регулирования температуры. Указанная точность регулирования температуры в криостате включает в себя также неоднородность температурного поля во всем объеме жидкого теплоносителя. Для измерения температуры теплоносителя, омывающего стенки автоклава, внутрь теплоносителя погружен образцовый медный термометр сопротивления типа ТСМ 4 (рис. 4). Термометр сопротивления такого же типа измерял температуру холодного конца термопары, рабочий конец которой находился в центре автоклава. Относительная погрешность измерения давления составляла  $0.05$  % от предельного значения ( $25$  МПа) и равнялась  $\sim 15$  кПа. Газовый капилляр 2 (рис. 4) через соединительную трубку подключался к приемному баллону, также оборудованному датчиком давления.

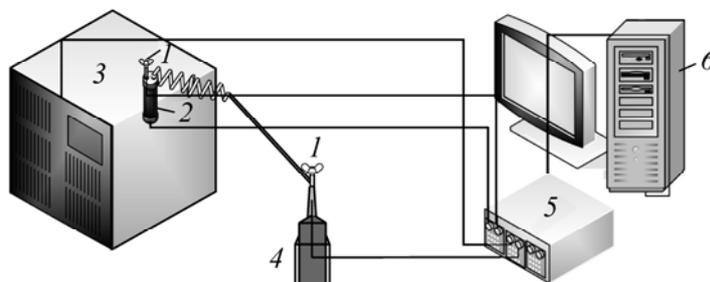


Рис. 5. Схема лабораторной установки: 1 — газовый кран; 2 — автоклав, с загруженным в него углем и датчиками температуры и давления; 3 — программируемый термостат; 4 — приемный баллон с краном и датчиками температуры и давления, соединенный с автоклавом соединительной трубкой; 5 — аналого-цифровой преобразователь (АЦП) сигналов от датчиков давления и температуры (МИТ8); 6 — компьютер, считывающий информацию с АЦП (МИТ8)

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились с углем марки Г, отобранном на шахте им. 7 Ноября Ленинского месторождения Кузбасса. Содержание общей золы в образцах угля  $A^d$  —  $5.3$  %, летучих веществ  $V^{daf}$  —  $44.1$  %. Элементный состав:  $C^{daf}$  —  $84.8$  %,  $H^{daf}$  —  $5.74$  %,  $O + N$  —  $9.00$  % определялся в CHNS анализаторе ThermoFlash2000. Отобранный уголь рассеивался на фракции по размерам частиц. В экспериментах использовалась проба угля крупностью  $0.5 - 1.0$  мм. Насыщение пробы угля водой происходило без контакта с жидкой фазой посредством сорбции молекул воды из воздуха при постоянной относительной влажности  $91$  %. Проба предварительно высушивалась при  $100$  °С в вакуумной печи на протяжении  $4$  ч, затем помещалась в эксикатор с постоянной влажностью воздуха. Влажность угля определялась по изменению массы образца.

В экспериментах с загрузкой автоклава углем марки Г массой 176.95 г, влажностью 5.80 % газовая фаза автоклава заполнялась природным газом, содержащим 89 % метана, 6 % азота, 3 % кислорода, 1.2 % углекислого газа и около 1 % легких углеводородных газов.

Первые эксперименты проводились с природным газом по схеме, описанной в [19]. Закрытый автоклав с углем заполнялся природным газом до давления около 7 МПа и выдерживался примерно 60 ч при температуре  $-3^{\circ}\text{C}$ . Затем автоклав при отрицательной температуре перемещался в криостат, в котором задавалась программа линейного повышения температуры со скоростью  $3^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ . Такой эксперимент проделан несколько раз с хорошей повторяемостью результатов.

На рис. 6 сплошными линиями показана  $P-T$  диаграмма различных загрузок автоклава с углем и природным газом: изменение давления в автоклаве при линейном повышении температуры теплоносителя, омывающего внешние стенки автоклава. По горизонтальной оси отложена температура, измеряемая в центре автоклава. Штриховой линией показана равновесная кривая гидрата метана, пунктирными —  $P-T$  диаграммы экспериментов, в которых в автоклав были загружены только вода и природный газ.

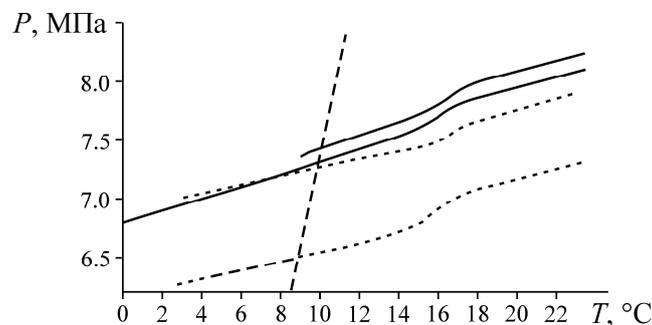


Рис. 6. Диаграмма состояния системы “уголь – влага – природный газ” (обозначения — по тексту)

При температуре  $+16^{\circ}\text{C}$  и давлении 7.5 МПа появился характерный перегиб — ступенька повышения давления, вызванная разложением газовых гидратов, которая составляет несколько процентов от абсолютного значения давления в автоклаве.

По величине ступени повышения давления можно определить количество газа, выделяющегося при разложении газовых гидратов. В данном случае в автоклаве выделилось 0.007 моль газа, что эквивалентно “мгновенному” газовыделению порядка  $1\text{ м}^3/\text{т}$  угля. Разложение газовых гидратов в двух подобных экспериментах с углем и природным газом происходило примерно на  $6^{\circ}\text{C}$  выше кривой равновесия газовых гидратов метана, что свидетельствует о существенно большем количестве угольных пластов, попадающих в область термобарических условий, при которых возможно образование и существование газовых гидратов природного газа. Следовательно, необходимо учитывать вклад природных газов, выделяющихся при разложении газовых гидратов, в формирование опасных ГДЯ.

Полупериод затухающих колебаний основной кровли составляет 0.11–0.25 с, скорость разложения поровых кристаллогидратов для частиц размером от 4 до 10 нм —  $4\text{--}28\text{ нм}/\text{мс}$  и убывает по экспоненциальной зависимости с увеличением их диаметра. В этой связи в полупериод разгрузки при колебаниях кровли происходит разложение газогидратов метана и природного газа, что в эксперименте сопровождается значительным понижением температуры и увеличением количества вещества в газообразной фазе.

По уравнению состояния реального газа рассчитано количество вещества в газовой фазе автоклава. Для каждого выпуска газа вычислена разница между количеством вещества, находящегося в газовой фазе до открытия крана, и количеством газа в автоклаве сразу после его закрытия.

## ХОД ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Эксперимент проводился на лабораторной установке, схема которой приведена на рис. 5. Закрытый автоклав с углем и давлением метана 6.6 МПа после выдержки около 60 ч при температуре  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  помещался в термостат и соединялся с приемным баллоном 4 (рис. 5). Задавалась программа линейного повышения температуры теплоносителя, омывающего внешние стенки автоклава, со скоростью  $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ . После достижения  $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$  термостат переключался на поддержание данной температуры на протяжении всего этапа эксперимента, во время которого из автоклава через определенные промежутки времени (около 50 мин) ступенчато выпускался газ и исследовалось вызванное этим изменение температуры и давления. Значения температуры и давления в автоклаве и в приемном баллоне регистрировались и с помощью аналогоцифрового преобразователя передавались на компьютер. При каждом выпуске газа из автоклава проявлялся тепловой эффект, вызванный адиабатным расширением газа, теплотой десорбции и теплотой фазового перехода, возникающим при разложении газовых гидратов.

Изменения температуры и давления во времени (рис. 7) построены с помощью специальной программы. Заметен anomalно высокий тепловой эффект для двух выпусков газа при понижении давления ниже 2.3 и 1.8 МПа.

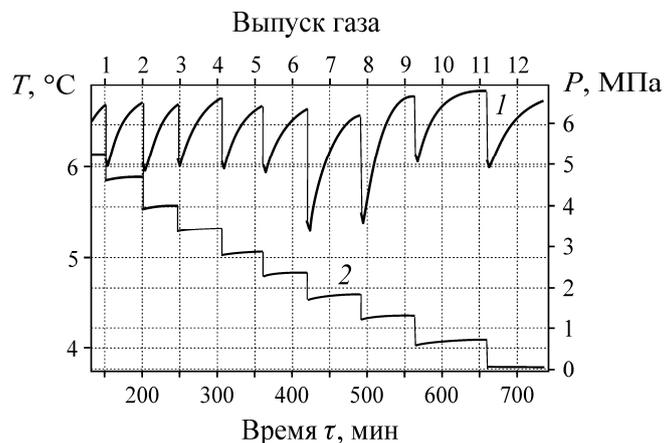


Рис. 7. Изменение температуры (1) и давления (2) в автоклаве при кратковременных сбросах газа в приемный баллон

Предполагалось, что кратковременное открытие крана автоклава сопровождается следующими процессами: адиабатное расширение газа и падение давления; десорбция молекул метана; возможное разложение газовых гидратов метана. Кроме того, время начала расширения газа (выпуск газа из автоклава во внешний баллон) и его десорбции из угля можно определять по точке начала изменения давления в автоклаве, а время окончания данного процесса — по времени окончания изменения давления, фиксируемого датчиком, расположенным между автоклавом и приемным баллоном. Момент окончания процесса десорбции фиксировался как момент, при котором температура перестает уменьшаться и начинает расти за счет притока тепла от термостата.

В первых пяти циклах сброса давления разложение гидратов не наблюдалось, так как давление и температура определяли положение рабочей точки выше равновесной кривой газовых гидратов метана (рис. 2). Диапазон изменения температуры в этом случае составлял  $0.6-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Последующие шестой и седьмой циклы сброса газа характеризовались резким падением температуры до значений, которые намного ниже, чем в первых пяти сбросах, а диапазон изменения составил  $1.17-1.36\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Расчет количества вещества в газовой фазе  $n$  осуществлялся по уравнению состояния реального газа:  $PV = nzRT$ . Здесь коэффициент сжимаемости  $z$  является функцией приведенных давления  $P/P_c$  и температуры  $T/T_c$  и определяется по экспериментальной диаграмме Нельсона–Оберта:  $z = 0.888$ . Объем метана в газовой фазе автоклава по нашим измерениям составил 150 мл. Результаты анализа данных графиков и соответствующих расчетов сведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Тепловой эффект выпуска газа, десорбция и разложение газовых гидратов в эксперименте

Цикл сброса газа	$P_1$ , МПа	$P_2$ , МПа	$\Delta P$ , МПа	$\Delta T$ , °С	$n_1$ , моль	$n_2$ , моль	$\Delta n$ , моль
1	5.294	4.643	0.651	0.67	0.388	0.341	0.004
2	4.710	3.953	0.757	0.73	0.345	0.291	0.005
3	4.024	3.374	0.650	0.67	0.295	0.248	0.006
4	3.462	2.794	0.668	0.73	0.254	0.208	0.006
5	2.885	2.272	0.613	0.75	0.214	0.167	0.007
6	2.368	1.698	0.670	1.36	0.174	0.125	0.010
7	1.835	1.200	0.635	1.17	0.135	0.088	0.010

Использованы обозначения:  $P_1, P_2$  — давление газа в автоклаве до и после сброса метана соответственно;  $\Delta P$  — разница этих давлений;  $\Delta T$  — изменение температуры за сброс;  $n_1, n_2$  — количество молей газа в автоклаве до и после сброса давления;  $\Delta n$  — прирост количества молей газа после каждого выпуска, вызванного процессами десорбции и диссоциации газовых гидратов, рассчитанный как разность между количеством молей газа перед следующим выпуском из автоклава и количеством оставшегося в автоклаве газа после предыдущего выпуска:  $\Delta n = n_{i+1} - n_{2_i}$ .

Согласно данным табл. 2, в первых пяти выпусках газа не происходило разложения газовых гидратов, а температура в системе уменьшалась примерно на  $0.6-0.7$  °С при каждом выпуске. С приближением давления (по мере сброса газа в приемный баллон из автоклава) к значениям, находящимся ниже равновесной кривой газовых гидратов метана ( $2.37-1.7$  МПа), диапазон уменьшения температуры увеличился примерно в 2 раза и составил  $1.17-1.36$  °С. При этом прирост числа молей газа за счет разложения газогидратов метана вырос также примерно в 1.5 раза: с  $0.004-0.007$  при десорбции газа до  $0.010$  молей при десорбции и диссоциации газогидратов (опыты 6, 7). Отсюда следует, что прирост давления метана в “газовом мешке” может быть обусловлен не только процессами десорбции газа, но и разложением газовых гидратов.

Материнская влага угольных пластов содержится в поровом пространстве угольной матрицы, и газовые гидраты могут образовываться только в переходных и макропорах. Объем макропор для углей составляет  $0.2-0.8$  см<sup>3</sup>/г. Эффективный радиус макропор для максимумов на кривых распределения равен  $0.5-2.0$  мкм. Радиус переходных пор не превышает  $0.1$  мкм. Размер микропор соответствует диаметру молекулы метана, поэтому их как места образования газогидратов из рассмотрения можно исключить. Нужно отметить, что размеры газогидратных частиц метана в угольных пластах существенно меньше размеров переходных и макропор, так как первые слои влаги достаточно сильно сцеплены с поверхностью угля электростатическими силами и не могут участвовать в процессе гидратообразования (их размер намного меньше чем  $0.5-2.0$  мкм). Вследствие этого геомеханические процессы, связанные с зависанием и вторичными осадками основной кровли, могут инициировать образование зон повышенного газового давления, из-за чего может начаться один из процессов: формирование выбросоопасной ситуации или интенсивной фильтрации газа в сторону забоя выработки с ее последующим “загазированием” [20, 21]. Диссоциация газовых гидратов способна приводить к увеличению в 2–3 раза значений газового давления в краевой зоне угольного пласта [22, 23], а колебания кровли, вызванные ее осадками, — к образованию “волны дробления” и возникновению газодинамического явления [24].

В качестве примера количественно оценим приращение давления газа после начала процесса диссоциации газогидратов для условий Владимирского пласта шахты “Северная” в Кузбассе. Рассмотрим краевую задачу.

Известно, что движение метана в пласте угля для одномерного изотермического течения описывается выражением

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k}{2m\mu_r} \cdot \frac{\partial^2 P^2}{\partial x^2},$$

где  $m$  — коэффициент пористости среды;  $\mu_r$  — динамическая вязкость газа;  $k$  — коэффициент проницаемости.

Начальные и граничные условия для давления газа запишем следующим образом:  $P(x,0)|_{x=0} = P_0$  — начальное давление в выработке;  $P_3(x,t)|_{x=\xi} = P_4(x,t)|_{x=\xi} = P_p$ , где  $P_p$  — давление разложения кристаллогидратов с подвижной границей  $\xi$ ;  $P_2(\infty,t)|_{x=\infty} = P_r$ ,  $P_r$  — давление газа.

По уравнению Ван-дер-Ваальса с учетом числа молей газа  $v$ , находящихся в гидратном состоянии в зоне угольного пласта, рассчитаем прирост давления  $\Delta P$  вследствие высвобождения газа из гидратного состояния:

$$\begin{aligned} \Delta P = P(v + \Delta v) - P(v) &= \frac{RT}{\frac{V_{\text{пор}}}{v + \Delta v} - b} - \frac{a}{\left(\frac{V_{\text{пор}}}{v + \Delta v}\right)^2} - \frac{RT}{\frac{V_{\text{пор}}}{v} - b} - \frac{a}{\left(\frac{V_{\text{пор}}}{v}\right)^2} = \\ &= \Delta v \left( \frac{RTV_{\text{пор}}}{(V_{\text{пор}} - bv)(V_{\text{пор}} - b(v + \Delta v))} - \frac{a(2v + \Delta v)}{(V_{\text{пор}})^2} \right), \end{aligned}$$

здесь  $R$  — газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура пласта;  $a, b$  — коэффициенты Ван-дер-Ваальса для природного газа;  $V_{\text{пор}}$  — объем порового пространства.

Решение данной задачи приведено в [25]. Принятые обозначения:  $T = 288$  К; глубина разработки  $H = 370$  м;  $P_r = 4.6 \cdot 10^6$  Па;  $P_0 = 10^5$  Па;  $m = 0.05$ ;  $\mu_r = 10.94 \cdot 10^{-6}$  Па·с при  $T = 17^\circ\text{C}$ ,  $h = 3$  — высота выработки, м;  $l = 5$  — ширина выработки, м;  $x_1 = 0.07$  м — протяженность зоны угля, содержащего газогидраты;  $v_{\text{угля}} = 1.05$  м<sup>3</sup>. Результаты расчета представлены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Приращения давления газа для условий пласта Владимирский шахты “Северная” (Кузбасс) при диссоциации газогидратов метана [27]

Влажность, $W$ , %	Гидратонасыщенность $\beta$ , %	$v$ , моль	$\Delta P$ , МПа
1.50	1.90	51.47	2.25
2.00	2.60	68.63	2.97
3.00	3.90	102.94	4.39

Для прогноза выбросоопасности угольного пласта по методике [26] был рассчитан показатель  $R^n$  для случая превышения давления в краевой части пласта за счет разложения газогидратов на  $\Delta P = 2,97$  МПа. Его величина оказалась положительной и равной  $R^n = 2.86$ , следовательно для данных условий существует выбросоопасная ситуация.

В реальных условиях подобная газодинамическая ситуация может сложиться на участках очистного забоя, примыкающих к вентиляционному и конвейерному штрекам. При вынимаемой мощности пласта до 3.5 м, ширине консоли по падению или восстанию 20 м, глубине очага выброса 10 м мощность выброса может составить до 1 000 т угля.

В связи с основными результатами экспериментальных исследований следует отметить, что более общие количественные оценки по режиму газовыделения из обрабатываемых угольных массивов, но уже с учетом вибрационных воздействий от землетрясений, технологических взрывов и всегда присутствующего сейсмического фона в геосреде с достаточно широким амплитудно-периодным спектром движения структурных отдельностей (от нано-, микро- макроуровней) могут быть получены в рамках активно развиваемой теории нелинейных упругих волн маятникового типа в направлении описания взаимодействия геомеханических и физико-химических процессов в угольных пластах [27]. Затронутая в настоящей статье проблематика является гармоничным дополнением фундаментальных исследований, отраженных в недавних публикациях [28, 29].

### **ВЫВОДЫ**

Показано, что впереди очистного забоя угольного пласта с труднообрушаемыми кровлями при их зависании возможно существование зон пониженных напряжений, так называемого газового мешка, давление в котором будет меняться при затухающих низкочастотных (2.0–4.5 Гц) колебаниях основной кровли, вызванных ее вторичными осадками, вследствие процессов зональной дезинтеграции массива, процессов десорбции газа и диссоциации газовых гидратов.

Экспериментально доказано, что в угольных пластах Кузбасса могут образовываться газогидраты метана. При этом установлено, что для природного газа (смесь метана, азота, углекислого газа и других газов) равновесная температура выше на  $6^\circ$  по сравнению с чистым метаном, следовательно, газогидраты природного газа могут формироваться в большинстве угольных пластов Кузбасса.

При падении газового давления до значений, меньших равновесных, происходит разложение газогидратов метана, на что указывают изменение количества молей газа в автоклаве и большой диапазон уменьшения температуры по сравнению с процессами десорбции газа.

Разложение поровых газогидратов метана, имеющих высокую скорость диссоциации, при вторичных осадах основной кровли может привести к газодинамическим явлениям на наиболее напряженных участках, примыкающих к вентиляционному или конвейерному штрекам.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Инербаев Т. М., Субботин О. С., Белослудов В. Р., Белослудов Р. В., Кавазое Е., Кудо Д. И.** Динамические, термодинамические и механические свойства газовых гидратов структуры I и II // Рос. хим. журн. — 2003. — Т. 48. — № 3. — С. 19–27.
2. **Макогон Ю. Ф.** Гидраты природных газов. — М.: Недра, 1974. — 208 с.
3. **Дырдин В. В., Шепелева С. А., Ким Т. Л., Смирнов В. Г., Гвоздкова Т. Н.** Метан и выбросоопасность угольных пластов. — Томск: Изд-во ТГУ, 2015. — 180 с.
4. **Smirnov V. G., Manakov A. Yu., Ukraintseva E. A., Villevald G. V., Karpova T. D., Dyrdin V. V., Lyrshchikov S. Yu., Ismagilov Z. R., Terekhova I. S., and Ogienko A. G.** Formation and decomposition of methane hydrate in coal, *Fuel*, 2016, Vol. 166. — P. 188–195.
5. **Dyrdin V. V., Smirnov V. G., Kim T. L. et al.** Thermodynamic changes in the coal matrix–gas–moisture system under pressure release and phase transformations of gas hydrates, *Russ. Phys. J.*, 2017, Vol. 60. — 206 p.
6. **Истомина В. А., Якушев В. С.** Газовые гидраты в природных условиях. — М.: Недра, 1992. — 236 с.
7. **Дядин Ю. А., Гущин А. Л.** Газовые гидраты // *Соросовский образов. журн.* — 1998. — № 3. — С. 55–64.
8. **Sloan E. D. and Koh C. A.** Clathrate hydrates of natural gases, *Chemical Industries Series*, CRC Press, 2008. — 731 p.

9. **Каталог** шахтопластов Кузнецкого, Карагандинского и Печорского угольных бассейнов / сост. М. И. Устинов и др. — М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 1982. — 179 с.
10. **НАО S.-Q., Kim S., Qin Y., and Fu X.-H.** Enhanced CO<sub>2</sub> gas storage in coal, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2013, Vol. 52. — P. 18492–18497.
11. **Пузырев В. Н., Балашова Т. А., Алексеев Д. В.** О возможно явлении “гистерезиса сорбции” метана выбросоопасным углем при возбуждении колебания давления свободного газа // *Уголь*. — 1993. — № 6. — С. 46–48.
12. **Дырдин В. В., Фофанов А. А., Смирнов В. Г., Дягилева А. В.** Образование “газового мешка” в зоне опорного давления угольного массива впереди забоя очистной выработки // *Изв. вузов. Горн. журн.* — 2016. — № 4. — С. 41–46.
13. **Шклярский М. Ф., Глушихин Ф. П.** Динамика опорного давления на пластах с труднообрушаемыми кровлями // *Горное давление в капитальных, подготовительных и очистных выработках*. — Л., 1982. — С. 50–55.
14. **Открытие № 400 СССР.** Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок / Е. И. Шемякин, М. В. Курленя, В. Н. Опарин, В. Н. Рева, Ф. П. Глушихин // *Опубл. в БИ*. — 1992. — № 1.
15. **Ройтер М., Крах М., Кислинг У., Векслер Ю.** Зональная дезинтеграция горных пород вокруг очистных выработок // *ФТПРПИ*. — 2015. — № 2. — С. 46–52.
16. **Зональная дезинтеграция** горных пород и устойчивость подземных выработок / В. Н. Опарин, А. П. Тапсиев, М. А. Розенбаум, В. Н. Рева и др. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. — 278 с.
17. **Sobczyk J.** The influence of sorption processes on gas stresses leading to the coal and gas outburst in the laboratory conditions, *Fuel*, 2011, Vol. 90. — P. 1018–1023.
18. **Yi J., Akkutlu I. Y., Karacan C. Ö., and Clarkson C. R.** Gas sorption and transport in coals: aporoelastic medium approach, *Int. J. Coal. Geol.*, 2009, Vol. 77, No. 1-2. — P. 137–144.
19. **Смирнов В. Г., Дырдин В. В., Манаков А. Ю., Ким Т. Л., Шепелева С. А.** Исследование форм связи метана с угольной матрицей для совершенствования методик прогноза выбросоопасности // *Изв. вузов. Горн. журн.* — 2014. — № 1. — С. 128–135.
20. **Ким Т. Л., Дырдин В. В., Шепелева С. А.** Газовыделение в выработку с учетом изменяющейся проницаемости угольного пласта // *Изв. вузов. Горн. журн.* — 2013. — № 2. — С. 128–130.
21. **Мурашев В. И.** Механизм развязывания внезапных выбросов угля и газа в горных выработках // *Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа*. — М.: Недра, 1978. — С. 140–161.
22. **Kim T., Dyrdin V., Smirnov V., and Nesterov V.** Gas hydrates in coal seams and their impact on gas-dynamic processes in underground mining, *E3S Web of Conferences*, 1022, The 1st International Innovative Mining Symposium, 2017, Vol. 15. — P. 1–7.
23. **Ким Т. Л., Дырдин В. В.** Математическое моделирование загазирования выработок при диссоциации кристаллогидратов в угольных пластах // *Изв. вузов. Горн. журн.* — 2011. — № 2. — С. 131–134.
24. **Христианович С. А.** О волне дробления // *Изв. АН СССР*. — 1953. — № 12. — С. 1689–1699.
25. **Ким Т. Л., Дырдин В. В., Шепелева С. А.** Газовыделение в выработку с учетом изменяющейся проницаемости угольного пласта // *Изв. вузов. Горн. журн.* — 2013. — № 2. — С. 128–130.
26. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014612640 РФ. Расчет показателя выбросоопасности при подземной разработке угольных пластов / Т. Л. Ким, В. В. Дырдин, С. А. Шепелева; заявл. 10.01.2014; зарег. 03.03.2014.
27. **Опарин В. Н.** К теоретическим основам описания взаимодействия геомеханических и физико-химических процессов в угольных пластах // *ФТПРПИ*. — 2017. — № 2. — С. 3–19.
28. **Жоу Айтао, Кай Ванг, Киряева Т. А., Опарин В. Н.** О закономерностях движения двухфазного газового потока при внезапных выбросах угля и газа в шахтах // *ФТПРПИ*. — 2017. — № 3. — С. 119–130.
29. **Опарин В. Н., Киряева Т. А., Потапов В. П.** Разработка методов и моделей расчета сорбционной метаноемкости углей на основе их физико-химических характеристик // *ФТПРПИ*. — 2017. — № 4. — С. 14–32.

*Поступила в редакцию 28/VIII 2017*