

ХАУТИЕВ АДАМ МАГОМЕТ-БАШИРОВИЧ

**Обоснование и разработка метода дегазации угольного  
пласта на основе циклического газодинамического воздействия**

Специальности:

25.00.20 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная  
аэрогазодинамика и горная теплофизика»

05.26.03 – «Пожарная и промышленная безопасность (в горной  
промышленности)»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

МОСКВА 2015

Работа выполнена в ФГАОУ ВПО Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ "МИСиС") Минобрнауки России

**Научный руководитель:**

Каркашадзе Гиоргий Григолович - доктор технических наук, профессор кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (МГИ НИТУ «МИСиС»)

**Официальные оппоненты:**

Забурдяев Виктор Семенович - доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Отдела №2 «Стратегии освоения и сохранения недр», ФГБУН ИПКОН РАН

Серегин Александр Сергеевич - кандидат технических наук, ассистент кафедры Безопасности производств, ФГБОУ ВПО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ УНИВЕРСИТЕТ «ГОРНЫЙ»

**Ведущая организация:**

ФГБОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет» им. Т.Ф. Горбачева (г. Кемерово).

Защита диссертации состоится «. . .» \_\_\_\_\_ 201 г. в . . . . часов на заседании диссертационного совета Д 212.132.16 при НИТУ «МИСиС» (Горный институт) по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИТУ «МИСиС» и на сайте <http://misis.ru/>.

Автореферат разослан «. . .» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
д-р техн. наук, проф.

А.С. Вознесенский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Повышение технико-экономической эффективности работы угольных шахт в современных условиях связано с ростом нагрузок на очистной забой, которые сдерживаются в связи с увеличением притоков метана из угольных пластов. По мере углубления горных работ ситуация осложняется вследствие повышения газоносности угольных пластов. Дегазация угольных пластов через скважины, пробуренные из подземных выработок, рекомендуется к применению при газоносности угля более  $13 \text{ м}^3/\text{т}$ . Однако эффективность пластовой дегазации без дополнительных технологических мероприятий по интенсификации притоков метана в скважины не дает ожидаемого результата, что связано в первую очередь с низкой природной газопроницаемостью угольных пластов. Изменение коллекторских свойств пластов может быть достигнуто более рациональными техническими решениями на основе изучения закономерностей сорбционных и механических деформаций угля и целенаправленного использования энергетического потенциала породного массива. Разработка эффективного метода дегазации угольных пластов перед их отработкой является актуальной для угольной отрасли задачей, решение которой представляет большой научный и практический интерес.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Соглашения № 14.575.21.0025 от 23.06.2014 о предоставлении субсидии. Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57514X0025.*

**Целью работы** являются обоснование и разработка метода дегазации угольного пласта на основе циклического газодинамического воздействия, позволяющего снизить газообильность выработок и повысить производительность добычных работ в допустимых по газу пределах.

**Идея работы** заключается в интенсификации метаноотдачи угольного пласта за счет повышения газопроницаемости путем реализации гистерезиса сорбционных деформаций в процессе циклического газодинамического воздействия через дегазационные скважины.

**Научные положения, разработанные лично соискателем, и новизна:**

1. Повышение газопроницаемости угольного пласта и интенсификация массопереноса метана достигаются за счет реализации гистерезиса деформаций, вызванного горным давлением и сорбционными процессами в угле на основе циклического газодинамического воздействия путем изменения пластового давления метана.

2. Изменение давления метана в неразгруженном от горного давления угольном пласте приводит к возникновению геомеханических напряжений, существенно превышающих изменение давления метана, вызвавшего сорбционные деформации.

3. Циклическое изменение давления метана в дегазационных скважинах интенсифицирует дегазацию разрабатываемого угольного пласта, что приводит к повышению безопасности горных работ с высокими нагрузками на очистной забой.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:**

– использованием в аналитических описаниях фундаментальных законов массопереноса метана в угольных пластах и геомеханики, современных средств компьютерного моделирования, согласующихся с результатами шахтных измерений;

– представительным объемом шахтных исследований по определению свойств углегазонасного массива, фактической оценкой эффективности пластовой дегазации, применяемой на шахте им. С.М. Кирова, ОАО «СУЭК-Кузбасс»;

– количественным анализом полученных данных с использованием методов математической статистики;

– удовлетворительной сходимостью длин скважин, рассчитанных по разработанному способу, с фактическими данными по пластам

«Болдыревский» и «Поленовский» шахты им. С.М. Кирова ОАО «СУЭК-Кузбасс» (расхождение не более 5-8%).

**Научное значение работы** заключается в установлении механизма повышения газопроницаемости угля в процессе пластовой дегазации на основе циклического газодинамического воздействия путем изменения давления метана для разработки рациональных параметров предварительной дегазации.

**Практическое значение работы** состоит в разработке методики определения основных параметров циклического газодинамического воздействия на пласт через дегазационные скважины, а также методики оперативного определения длины скважин пластовой дегазации.

**Реализация выводов и рекомендаций работы.** Технология интенсификации дегазации угольного пласта в процессе циклического газодинамического воздействия была успешно апробирована и испытана в условиях шахты им. С.М. Кирова ОАО «СУЭК-Кузбасс» на выемочных участках 24-55 и 25-94, 25-95 пластов «Болдыревский» и «Поленовский» соответственно.

**Апробация работы.** Основное содержание диссертационной работы докладывалось на Международных научных симпозиумах «Неделя Горняка» (2012-2015 гг.), научно-практической конференции «Подземные горные работы - 21 век» в г. Ленинск-Кузнецкий (2013г.), научных семинарах и заседаниях кафедр «Физические процессы горного производства и геоконтроль» и «Горнопромышленная экология» НИТУ «МИСиС» (Горный институт) (2014-15 гг.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано семь работ, пять из них в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ, и один патент РФ.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 15 таблиц, 33 рисунка, список литературы из 134 наименований.

## **Основное содержание работы**

Мировое производство угля развивается в направлении повышения нагрузок на очистной забой с перспективой добычи более 10 тыс.т/сут, что требует разработки и внедрения эффективных способов дегазации угольных пластов, без которых высокопроизводительная и безопасная подземная добыча угля будет невозможна. Необходимо максимально снижать выделение метана в горные выработки за счет интенсификации дегазации разрабатываемого пласта. С увеличением глубины разработки угольных пластов понижается эффективность пластовой дегазации из подземных выработок по причине снижения газопроницаемости угля, что негативно отражается на работе очистного забоя с позиций безопасности по газовому фактору.

В изучение физических процессов при подземной разработке газоносных угольных пластов и проблем угольного метана большой вклад внесли ведущие советские и российские ученые: А.Т. Айруни, А.Д. Алексеев, В.А. Бобин, А.С. Бурчаков, Ю.Ф. Васючков, В.С. Забурдяев, Б.М. Иванов, Н.О. Каледина, Г.Г. Каркашадзе, К.С. Коликов, В.Н. Королева, Г.Д. Лидин, О.Н. Малинникова, Н.В. Ножкин, А.Э. Петросян, Л.А. Пучков, А.Д. Рубан, И.В. Сергеев, А.А. Скочинский, С.В. Сластунов, Н.И. Устинов, К.З. Ушаков, Г.Н. Фейт, В.В. Ходот, С.А. Христианович, О.И. Чернов, И.Л. Эттингер, С.А. Ярунин и др.

Исследования ученых заложили основу технологий подземной разработки газоносных угольных пластов с высокими нагрузками на очистной забой. Однако, как свидетельствует мировой и отечественный опыт разработки месторождений, весомым сдерживающим фактором являются большие затраты на реализацию способов дегазации неразгруженных от горного давления угольных пластов и недостаточно высокая их эффективность.

В этой связи актуальными остаются исследования, направленные на совершенствование технологии пластовой дегазации угольных пластов на

основе изучения физических свойств и состояния углепородного массива, а также на поиск оперативных и эффективных методов интенсификации дегазации угольного пласта.

Для достижения поставленной цели в настоящей диссертационной работе были решены следующие задачи:

1. Проанализированы передовые технологии воздействия на угольный массив с целью повышения газопроницаемости угольных пластов путем различных физических воздействий.

2. Определены параметры циклического газодинамического воздействия на угольный пласт через дегазационные скважины для увеличения его газопроницаемости на стадии предварительной дегазации.

3. Смоделирован процесс пластовой дегазации с учетом гистерезиса механических деформаций, вызванного горным давлением и сорбционными процессами в угле, на основе циклического газодинамического воздействия путем изменения пластового давления метана.

4. Разработан способ определения объема и длины дегазационных скважин, дополняющий технологию циклического газодинамического воздействия на угольный пласт с целью интенсификации дегазации.

5. Разработаны рекомендации по применению и оценке эффективности циклического газодинамического воздействия на угольные пласты при предварительной дегазации выемочных участков угольных шахт.

В диссертации проанализированы научные исследования и опыт работ по дегазации и борьбе с газом на угольных шахтах мира. Исходя из особенностей поставленных задач специалистами предложено множество методов воздействия на углепородный массив, которые позволяют решать задачи по добыче метана из газоносных угольных пластов, так и проблемы пластовой дегазации с учетом горно-геологических и горнотехнических факторов. Принято во внимание, что из неразгруженного углепородного массива без применения специальных способов интенсификации притоков

метана в пластовые скважины практически невозможно достичь эффективной предварительной дегазации.

Можно выделить два направления развития способов интенсификации дегазации: ускорение перехода метана из связанного в свободное состояние и повышение газопроницаемости угольных пластов.

Вполне естественно, что предлагаемые способы воздействия на газоносный угленосный массив с целью эффективной дегазации или снижения вредного воздействия метана не должны усложнять процесс добычи угля. Применяемые рабочие агенты не должны обладать токсичными или агрессивными свойствами, методы и средства воздействия не должны быть дорогими. Технологические мероприятия должны интенсифицировать процессы дегазации и способствовать повышению нагрузок на забой.

Обзор известных способов извлечения угольного метана показал, что наиболее часто применяют прямые гидродинамические или пневмогидродинамические воздействия или созданные с их помощью силовые нагрузки на пласт.

В научных исследованиях большое внимание уделяется изучению процессов сорбции и десорбции метана в структуре углей, что сопровождается явлениями набухания или усадки. В процессе сорбционной усадки угля изменяется напряженно-деформированное состояние пласта и уменьшается занимаемый объем структурных элементов, следствием которого является повышение газопроницаемости угля.

Рассмотрена аналитическая модель сорбционных деформаций угольных матриц в комбинации с действующими напряжениями от горного давления. Используются физические уравнения, описывающие величину результирующих напряжений при совместном проявлении механических и сорбционных деформаций. На основе принципа простой суперпозиции напряжений записана следующая система уравнений:



$$\begin{aligned}
\sigma_x &= \lambda(\theta + \theta_c) + 2G(\varepsilon_x + \theta_c/3); \quad \tau_{xy} = G\gamma_{xy}, \\
\sigma_y &= \lambda(\theta + \theta_c) + 2G(\varepsilon_y + \theta_c/3); \quad \tau_{yz} = G\gamma_{yz}, \\
\sigma_z &= \lambda(\theta + \theta_c) + 2G(\varepsilon_z + \theta_c/3); \quad \tau_{zx} = G\gamma_{zx},
\end{aligned} \tag{1}$$

где  $\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\tau$ ,  $\gamma$  – компоненты тензора напряжений и деформаций;  $\theta$  – объемная деформация под действием механических напряжений;  $\theta_c$  – объемная сорбционная деформация;  $G$  – модуль сдвига;  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ ;  $\lambda$  – постоянная Ламе,  $\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ ;  $E$  – модуль деформации;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

При описании механизма неупругого деформирования после цикла изменения механической нагрузки и сорбционного процесса усадки или разбухания угля предполагается, что составные частицы угля не возвращаются в исходное состояние и возникают остаточные деформации. Для учета эффекта геомеханического гистерезиса в виде остаточных деформаций в уравнениях (1) используют переменную величину модуля деформаций, зависящую от ранее действовавших напряжений и деформаций.

Компьютерное моделирование таких задач на современном уровне развития метода вычислительных технологий вполне доступно для прикладных расчетов. Диаграмма упруго-пластических деформаций среды с эффектом *геомеханического гистерезиса* представлена на рисунке 1. Модель проявляет следующие свойства:

- при нарастании сжимающего механического напряжения происходит нелинейный рост относительных деформаций (участок 1 на рисунке 1);
- при понижении сжимающего напряжения деформации уменьшаются по линейному закону, а затем – при последующем увеличении напряжения – также возрастают по линейному закону с модулем деформации  $E_0$  (участок 2);

- при увеличении напряжения до предыдущего максимального значения в точке 3 дальнейшее деформирование происходит в соответствии с первоначальной кривой нелинейной деформации (участок 4);
- при последующих циклах понижения и увеличения напряжений картина линейного уменьшения и увеличения деформаций повторяется (участки 5).

По представленной модели модуль деформации среды на участках 2 и 5 проявляет линейную упругость с модулем  $E_0$  и является постоянным. Предположительно, такой же модуль упругости характеризует и начало деформирования.

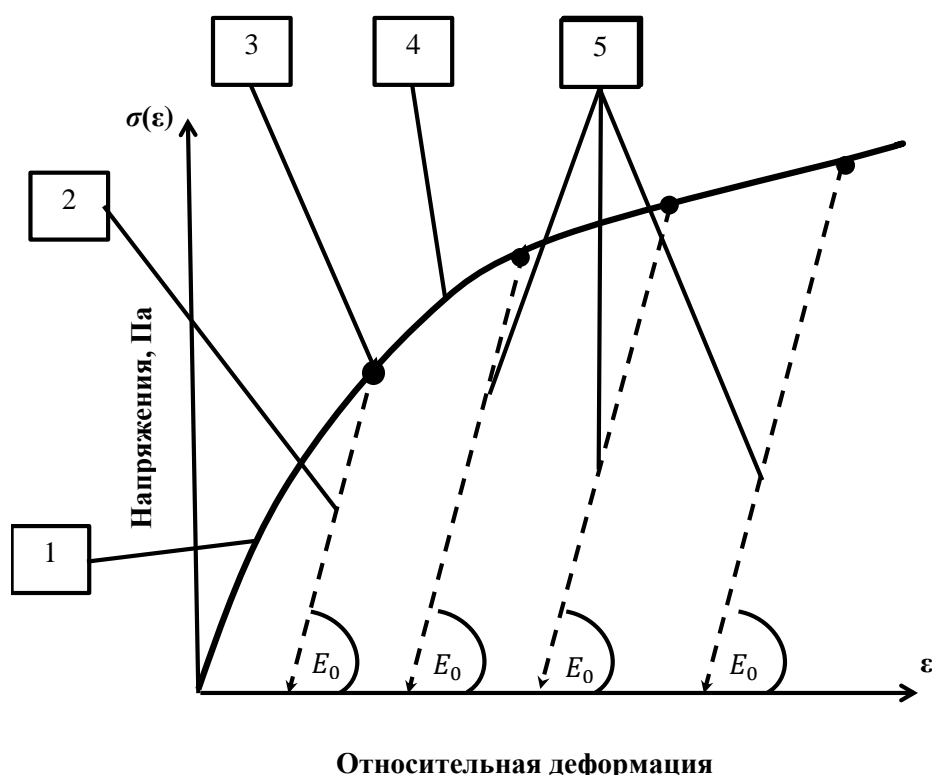


Рисунок 1 – Нелинейная диаграмма напряжений и деформаций с эффектом памяти напряжений на линейном участке деформирования

Для описания нелинейной диаграммы деформаций с эффектом памяти ранее действовавших напряжений необходимо учитывать динамику изменения напряжений в течение всего времени рассматриваемого процесса. Для этого в основополагающем физическом уравнении (1) используют функцию, учитывающую нелинейный и временной характер модуля

деформаций, отраженный на рисунке 2. В течение времени  $0 \dots t_1$  происходит увеличение напряжений до первого максимума. В этом интервале нелинейный модуль деформации составляет  $E(t)$ . Далее в течение времени  $t_1 \dots t_2$  происходит сначала уменьшение, а затем увеличение напряжений, при этом модуль деформации составляет  $E_0$ . Затем в течение времени  $t_2 \dots t_3$  имеет место нарастание напряжений до следующего максимума. При этом модуль деформации, так же как в предыдущем цикле, соответствует функции  $E(t)$ . Аналогичные закономерности деформирования в дальнейшем повторяются.

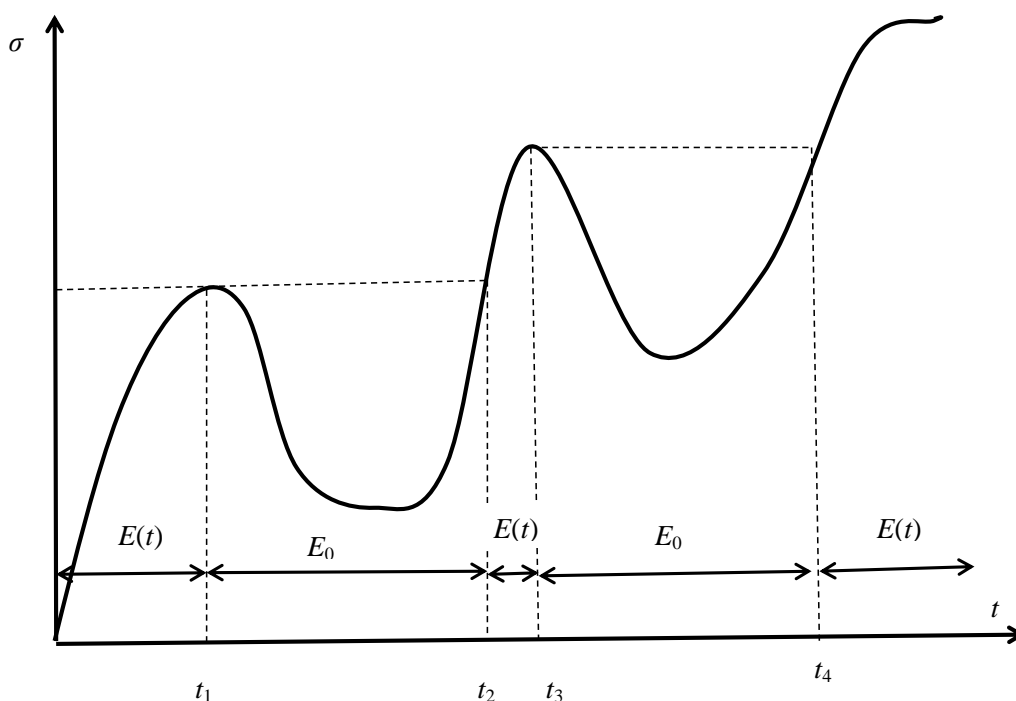


Рисунок 2 – Неравномерно возрастающие во времени напряжения

Таким образом, логическое условие для выбора функции модуля деформаций должен отвечать следующим требованиям: *если производная действующего напряжения от времени больше нуля, напряжение положительное и больше максимального предшествующего наибольшего значения, то следует использовать нелинейную функцию модуля деформаций, в противном случае - использовать линейную функцию. Справедливо для всех участков - до наступления предельно*

деформированного состояния, при наступлении которого модуль деформации стремится к нулю.

Математическое описание условия в булевых операторах имеет вид:

$$E(t) = E_1(t) + E_2(t), \quad (2)$$

$$E_1(t) = E_0 \cdot F(t) \cdot \left[ \frac{d\sigma(t)}{dt} > 0 \right] \cdot [\sigma(t) > 0] \cdot \{\sigma(t) > \max[\sigma(t)]\}, \dots \quad (3)$$

$$E_2(t) = E_0 \cdot [\sigma(t) < \sigma_{\text{сж}}] \cdot \{\sigma(t) \leq \max[\sigma(t)]\} + E_{00} \cdot [\sigma(t) > \sigma_{\text{сж}}], \quad (4)$$

где  $E(t)$  – комплексный модуль деформаций, Па;  $E_1(t)$  – функция модуля на нелинейном участке деформаций, Па;  $E_2(t)$  – функция модуля на линейных участках гистерезиса деформаций, Па;  $E_0$  – модуль линейной упругости (модуль Юнга), Па;  $F(t)$  – функция, описывающая нелинейную форму диаграммы напряжений и деформаций до наступления предельного состояния, например, в виде:

$$F(t) = \left[ 1 - \left( \frac{\sigma(t)}{n \cdot \sigma_{\text{сж}}} \right)^2 \right] \cdot [\sigma(t) < \sigma_{\text{сж}}],$$

$\sigma(t)$  – механическое напряжение во времени, Па;  $\sigma_{\text{сж}}$  – предел прочности при сжатии, Па;  $n$  – параметр аппроксимации;  $\max[\sigma(t)]$  – максимальное напряжение на предыдущих участках, Па;  $E_{00}$  – модуль деформации на запредельном участке деформирования, Па.

Что касается поведения среды в условиях действия растягивающих напряжений, то в первом приближении предполагаем, что картина диаграммы деформирования будет качественно такой же, но с другими значениями модулей упругости по сравнению с условиями сжатия.

Физические уравнения связи между напряжениями и деформациями описывают закономерности сорбционной усадки и разбухания угля в зависимости от давления метана. Объемная деформация угля в процессе сорбционной усадки или разбухания при полном замещении молекул метана углеродом составляет:

$$\theta_c = \Delta G \cdot \rho_{CH_4} \cdot \frac{\mu_{CH_4}}{\mu_c}, \quad (5)$$

$$\Delta G = G_0 - G, \quad (6)$$

где  $\Delta G$  – относительная величина объемной сорбции или десорбции молекул метана в структуре угля; м<sup>3</sup>/кг;  $G_0$  – начальная газоносность угля (объем метана в нормальных условиях, отнесенный к массе угля), м<sup>3</sup>/кг;  $G$  – текущая газоносность угля, м<sup>3</sup>/кг;  $\rho_{CH_4}$  – объемный вес метана в нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_{CH_4}$  и  $\mu_c$  – молярные массы метана и угля соответственно, кг/моль.

При выводе формулы (5) предполагается, что в процессе десорбции метана под действием молекулярных сил снижается расстояние между атомами углерода и по этой причине происходит усадка угля. В формуле (5) использовано следующее правило знаков: при десорбции метана деформация имеет знак плюс (усадка,  $\Delta G > 0$ ) и, наоборот, при сорбции – знак минус (разбухание,  $\Delta G < 0$ ).

Начальная газоносность угля вычисляется при известном пластовом давлении метана с использованием изотермы Ленгмюра:

$$G_0 = \left( \frac{a \cdot b \cdot P_{пл}}{1 + b \cdot P_{пл}} \right) \cdot \frac{1}{\rho_c \cdot \rho_{CH_4}}, \quad (7)$$

где  $a$  – максимальная сорбционная емкость в уравнении Ленгмюра, кг/м<sup>3</sup> (масса метана в килограммах, отнесенная к объему угля в кубических метрах);  $b$  – коэффициент Ленгмюра, Па<sup>-1</sup>;  $P_{пл}$  – пластовое давление метана, Па;  $\rho_c$  – объемная масса угля, кг/м<sup>3</sup>.

Аналогично запишем выражение для текущей газоносности угля:

$$G = \left( \frac{a \cdot b \cdot P}{1 + b \cdot P} \right) \cdot \frac{1}{\rho_c \cdot \rho_{CH_4}}. \quad (8)$$

Использование в уравнениях переменного модуля деформации, отражающего фактор гистерезиса в диаграмме деформирования, позволяет моделировать процессы деформации при циклических механических воздействиях на угольный пласт с учетом сорбции, что важно для обоснования параметров предварительной дегазации угольных пластов, или при выборе метода воздействия на угольный пласт с целью обеспечения необходимой интенсивности дегазации.

Выполнена оценка средних сорбционных напряжений в условиях зажатой среды:

$$\sigma_{\text{ср}} = \chi \frac{E_0}{3(1-2\mu)} \left( \frac{a \cdot b \cdot P}{1+b \cdot P} - \frac{a \cdot b \cdot P_{\text{пл}}}{1+b \cdot P_{\text{пл}}} \right) \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \frac{\mu_{\text{сн4}}}{\mu_c}, \quad (9)$$

где  $\chi$  – поправочный коэффициент, меньший единицы, определяемый в лабораторных испытаниях; по предварительной оценке  $\chi = 0,8 \dots 0,9$ .

Расчётами установлено, что при уменьшении давления метана на величину 0,5 МПа в структуре угля возникают значительные растягивающие напряжения, сравнимые с прочностью угля и способные вызвать развитие микротрещиноватости. Данный эффект открывает перспективу реализации технических решений, направленных на повышение газопроницаемости угля и снижение потенциальной энергии горного давления. Это особенно актуально при производстве очистных работ в опасных по горным ударам зонах. Из-за сложной структуры и неоднородности угольного пласта, а также анизотропии свойств угля физические уравнения отражают процесс в первом приближении. При этом уравнения позволяют анализировать и прогнозировать важные для практики закономерности изменения газопроницаемости с учетом совместного действия горного давления и сорбционных деформаций.

В технологии разработки длинными столбами угольный пласт

дегазируют через скважины, пробуренные из вентиляционного и откаточного штреков. При предварительной дегазации пластовые дегазационные скважины подключают к шахтному газопроводу, по которому метан отбирают на дневную поверхность с использованием вакуум-насосной станции. В предложенном нами техническом решении осуществляют дополнительную технологическую операцию, включающую циклическое открытие и закрытие устья дегазационных скважин. Рекомендуемая длительность цикла закрытия пластовых скважин при дегазации выемочного столба составляет 1-3 сут. Длительность дегазации устанавливается в зависимости от текущего дебита метана по принципу: если дебит метана в следующем цикле стал меньше, чем в конце предыдущего цикла, то скважину следует закрывать, реализуя тем самым очередной акт повышения газопроницаемости за счет сорбционных деформаций угля.

Теоретически обосновано, что циклы повышения давления метана в скважине величиной около 5 бар способны вызвать деформации, сравнимые с предельными деформациями угля при сжатии или растяжении. Этот вывод имеет практическое подтверждение – в шахтных экспериментах на десяти дегазационных скважинах нами были получены результаты повышения дебита метана в 1,5-5 раз на время более месяца. Причем наибольший эффект наблюдался при перепадах давлений в скважине более 5 бар.

Фактор повышения газопроницаемости и соответствующего повышения дебита метана представлен на рисунке 3, полученном в результате компьютерного моделирования в среде «Comsol Multiphysics». Исходные данные расчета соответствовали условиям отработки угольного пласта «Болдыревский» на шахте им. С.М. Кирова ОАО «СУЭК-Кузбасс».

При компьютерном моделировании процесс массопереноса метана в угольном пласте описывается нелинейным дифференциальным уравнением с учетом механизма сорбции Ленгмюра. В рассмотренной модели после одного цикла закрытия и открытия скважины проницаемость угля в области сорбционных деформаций возрастает в среднем в 5 раз. На рисунке 3

представлен результат моделирования, совпадающий с экспериментальным результатом, полученном в шахтном эксперименте. В цикле закрытия скважины измеренное значение давления метана составляет 5 бар.

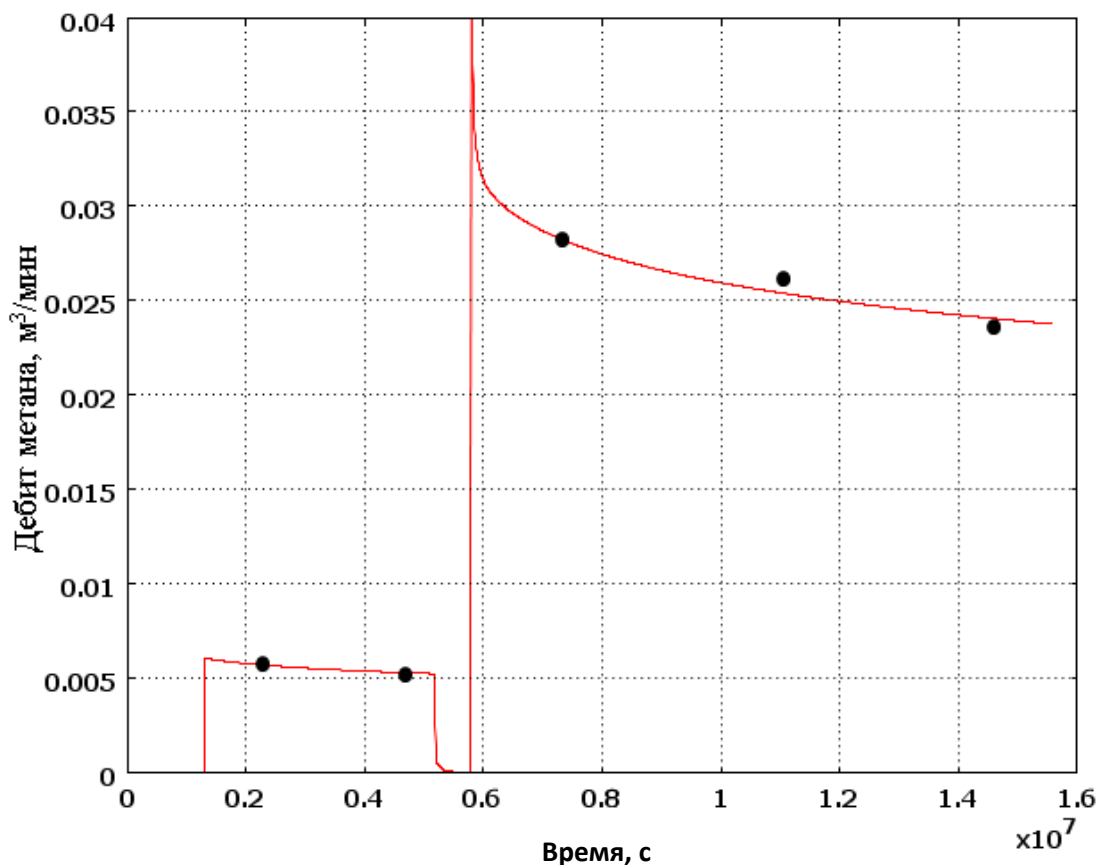


Рисунок 3 - Дебит метана до и после акта циклического воздействия

На рисунке 4 представлена зависимость съема метана в течение времени дегазации в пространстве между скважинами. Если в базовом варианте через 6 месяцев дегазации максимальный съем метана не превышает  $0,35 \text{ м}^3/\text{т}$ , то в предлагаемом эта величина выше и достигает  $1,1 \text{ м}^3/\text{т}$ . Представленное техническое решение, направленное на интенсификацию дегазации методом циклического воздействия, и методика расчета параметров дегазации средствами компьютерного моделирования, способствуют решению задачи безопасной отработки газоносного угольного пласта.



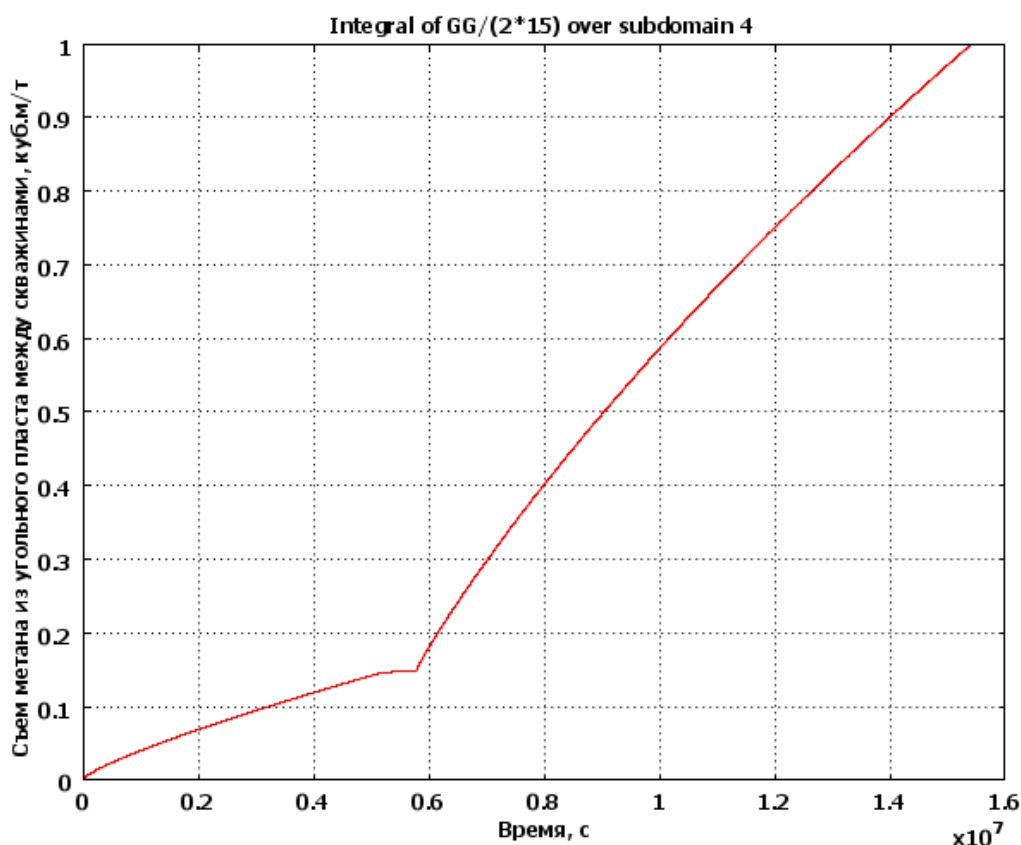


Рисунок 4 - Съем метана из угольного пласта в течение 6 месяцев

Одновременно с технологической операцией циклического газодинамического воздействия нами разработан новый способ, позволяющий оперативно измерять объем и длину горизонтальных дегазационных скважин. Актуальность данной технической разработки состоит в необходимости осуществлять оперативный контроль за длиной скважин с целью повышения качества дегазационных работ.

По результатам выполненных нами шахтных измерений дебита метана из дегазационных скважин вдоль выемочного столба по пластам «Болдыревский» и «Поленовский» шахты им. С.М. Кирова было установлено, что примерно 30% скважин являются малодебитными и практически не участвуют в дегазации. Не исключены варианты, когда вместо паспортной длины скважины на самом деле пробурены длиной существенно меньшей, что может иметь место из-за отсутствия метода контроля за длиной ранее пробуренных дегазационных скважин. На практике контроль длины скважины осуществляют путем подсчета количества

буровых штанг, которые извлекают в конце проходки скважины. Других средств контроля длины горизонтальных скважин в выемочном столбе до настоящего времени не существовало. В ходе проведения научных исследований нами поставлена и решена на изобретательском уровне вспомогательная техническая задача – измерение объема и длины функционирующих дегазационных скважин. Способ поясняется рисунком 5.

Главная идея способа заключается в целенаправленном заполнении полости скважины газом и измерении его давления в течение времени. В одном варианте осуществляют операцию закрытия устья продуктивной скважины на время, обеспечивая нарастание избыточного давления метана.

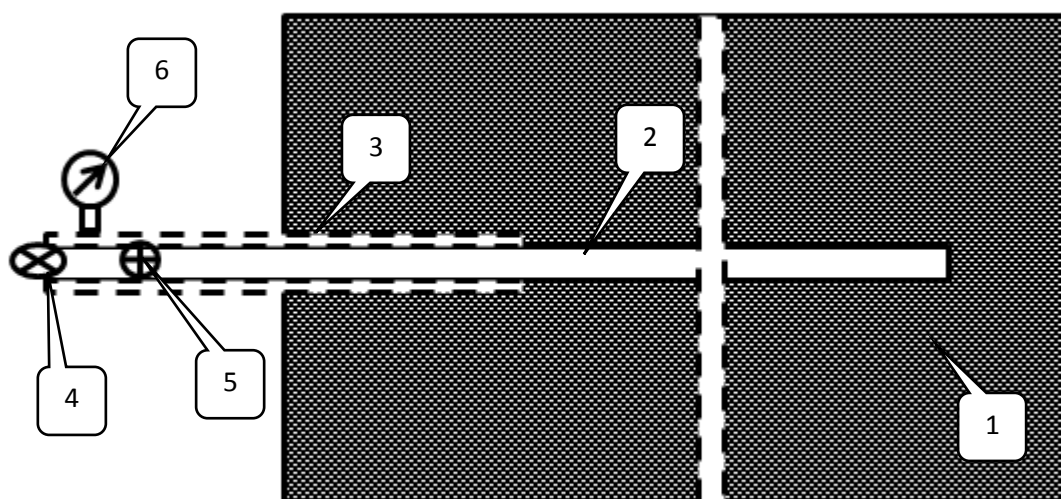


Рисунок 5 – Способ измерения объема скважины

1 – породный массив; 2 – дегазационная скважина; 3 – обсадная труба;  
4 – расходомер; 5 – шаровой кран; 6 – манометр

В другом варианте осуществляют нагнетание в скважину воздуха, фиксируя давление газа. Контролируя давление и расход газа в процессе его перепуска из скважины, замеряют значения, необходимые для расчета объема скважины по формуле:

$$V = \frac{P_{\text{ат}}}{P_1 - P_2 + (P_0 - P_1 + P_2 - P_3) \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1 + \Delta t_3}} G \cdot \Delta t_2, \quad (8)$$

где  $P_{\text{ат}}$  – атмосферное давление;  $P_0$  – давление в скважине в момент времени до перепуска газа;  $P_1$  – давление в скважине в момент времени начала перепуска газа;  $P_2$  – давление в скважине в момент времени окончания перепуска газа;  $P_3$  – давление в скважине в момент времени после перепуска газа;  $\Delta t_1$  – время между измерениями значений  $P_0$  и  $P_1$ ;  $\Delta t_2$  – длительность перепуска газа;  $\Delta t_3$  – время между измерениями значений  $P_2$  и  $P_3$ ;  $G$  – объемный расход перепускаемого газа в устье скважины.

Технико–экономическая эффективность разработанных технических решений базируется на использовании на практике простых технических средств, обеспечивающих интенсификацию дегазации угольного пласта с использованием потенциальных возможностей массива и особенностей гистерезиса деформирования в процессе сорбционной усадки и разбухания угля при циклических газодинамических воздействиях. Разработанный способ измерения объема и длины дегазационных скважин позволяет повысить качество подготовительных работ при предварительной дегазации угольных пластов. Способ циклического газодинамического воздействия позволяет решить задачу повышения дебита метана из дегазационных скважин простыми техническими средствами, доступными на каждом угольном предприятии, что открывает возможность широкого использования разработанных технологических рекомендаций. В целом разработанные технические решения обеспечивают повышение безопасности очистных работ при разработке газоносных угольных пластов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной для угольной отрасли задачи эффективной дегазации газоносных угольных пластов на основе разработки метода циклического газодинамического воздействия, что имеет значение для безопасной отработки угольных пластов с высокими нагрузками на очистной забой.

Основные научные результаты и выводы по выполненным в диссертации исследованиям заключаются в следующем:

1. Установлен и обоснован механизм повышения газопроницаемости угольного пласта в процессе дегазации путем циклического изменения пластового давления метана, основанный на реализации гистерезиса геомеханических деформаций, вызванного горным давлением и сорбционными процессами в угле.

2. Установлено, что изменение пластового давления метана в угольном пласте приводит к возникновению в нем геомеханических напряжений, существенно превышающих изменение давления метана, вызвавшего сорбционные деформации.

3. Обоснована технология интенсификации дегазации угольного пласта за счет повышения его газопроницаемости в результате реализации гистерезиса механических деформаций, вызванного сорбционными процессами в угле, на основе циклического газодинамического воздействия путем изменения давления метана в результате закрытия и открытия устья дегазационных скважин.

4. Обосновано, что циклическое изменение пластового давления метана в дегазационных скважинах интенсифицирует дегазацию разрабатываемого угольного пласта, что приводит к повышению безопасности горных работ с высокими нагрузками на очистной забой.

5. Обоснованы режимные параметры предварительной пластовой дегазации выемочного столба с применением экспериментально подтвержденного метода циклического газодинамического воздействия, позволяющего повысить дебит метана в 1,5-5 раз за счет увеличения проницаемости угля вокруг скважины в результате расширения каналов фильтрации.

6. Разработан и предложен способ определения объема и длины дегазационных скважин путем измерения параметров давления и расхода газа в процессе истечения из скважины, позволяющий повысить качество подготовительных работ на стадии предварительной дегазации угольных пластов.

7. Дано технико-экономическое обоснование работ по совершенствованию пластовой дегазации выемочного столба на основе циклического газодинамического воздействия на угольный пласт при подготовке выемочных участков к эффективной отработке.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Каркашадзе Г.Г., Хаутиев А.М.-Б., Поляков В.В. Исследование дебита метана в зависимости от притока воды в скважину // Современные проблемы шахтного метана. – М.: ИД ООО Роликс, 2014. – С.166-172.
2. Каркашадзе Г.Г., Хаутиев А.М.-Б. Описание механизма повышения проницаемости угля при циклическом изменении напряженного состояния и пластового давления // В мире научных открытий. – Красноярск.: ООО «Научно – инновационный центр», 2014. – № 4 (52). – С.22-29.
3. Каркашадзе Г.Г., Хаутиев А.М.-Б. Физические уравнения остаточных деформаций в процессе циклической сорбционной усадки угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: – 2014. - № 6. – С. 23 – 29.
4. Каркашадзе Г.Г., Хаутиев А.М.-Б. Моделирование процесса дегазации угольного пласта через скважины с учетом геомеханических напряжений // Горный информационно-аналитический бюллетень. -М.: – 2015. – № 2. – С. 235 – 243.
5. Каркашадзе Г.Г., Хаутиев А.М.-Б., Садов А.П.. Способ определения длины пластовых дегазационных скважин в процессе пневматического воздействия // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: – 2015. – № 4. – С. 255– 260.
6. Каркашадзе Г.Г., Хаутиев А.М.-Б. Механизм повышения газопроницаемости угольного пласта в процессе циклической сорбционной усадки и разбухания угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: – 2015. – № 4. – С. 249– 255.

7. Каркашадзе Г.Г., Хаутиев А.М.-Б., Поляков В.В. Метод измерения дебита метана из пластовых скважин выемочного столба // Сборник научных трудов: «Пути повышения эффективного и безопасного освоения пластовых месторождений полезных ископаемых подземным способом». Выпуск 2 – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2014. – С.283-286.
8. Пат. 2558563 Российская Федерация МПК *E21B 47/08*. Способ определения объема скважины / Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Коликов К.С., Хаутиев А.М.-Б.; заявитель и патентообладатель НИТУ «МИСиС». – №2014108704/03; заявл. 07.03.2014; опубл. 10.08.15, Бюл. № 22. – 8 с.