

6
A65

1118

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Доц., канд. техн. наук Э. М. МОСКАЛЕНКО

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ БИОХИМИЧЕСКОГО
И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО
СПОСОБОВ БОРЬБЫ С МЕТАНОМ
В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ**

(Диссертация выполнена на русском языке)

Специальность 05.311 — «Подземная разработка и эксплуатация
угольных, рудных и нерудных месторождений»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Министерство высшего и среднего специального образования СССР
МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Доц., канд. техн. наук Э. М. МОСКАЛЕНКО

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ БИОХИМИЧЕСКОГО
И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО СПОСОБОВ
БОРЬБЫ С МЕТАНОМ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

(Диссертация выполнена на русском языке)

Специальность 05.311 — «Подземная разработка и эксплуатация
угольных, рудных и нерудных месторождений»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора технических наук

МОСКВА — 1971



ВВЕДЕНИЕ

В Программе Коммунистической партии Советского Союза отмечается, что «...дальнейшее быстрое увеличение производства металла и топлива, составляющих фундамент современной промышленности, по-прежнему остается одной из важнейших народнохозяйственных задач».

Директивами XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971—1975 гг. предусматривается дальнейший рост годовой добычи угля с 624 (1970 г.) до 685—695 млн. т (1975 г.) при увеличении производительности труда в 1,4 раза за счет завершения в основном технического перевооружения предприятий на основе комплексной механизации и автоматизации производственных процессов, перехода на узкозахватную выемку угля в шахтах, повышения к концу пятилетки удельного веса добычи угля на пластах пологого и наклонного падения с применением выемочных комплексов и механизированных крепей не менее чем до 60% общей добычи его.

Современное состояние горной науки, технологии разработки угольных месторождений, производственные достижения в угольной промышленности и машиностроении позволяют в широких масштабах осуществлять концентрацию горных работ и достигать высоких нагрузок на очистные забои с использованием этих факторов в качестве основных путей повышения производительности труда.

Рост метанообильности угольных шахт с увеличением глубины, концентрации и интенсификации горных работ уже в настоящее время в целом ряде случаев не позволяет обычными средствами вентиляции снижать содержание метана в рудничной атмосфере до норм, установленных действующими Правилами безопасности в угольных и сланцевых шахтах даже при предельно допустимых скоростях движения воздушной струи.

Наличие «вентиляционного барьера» и значительные трудности в его преодолении средствами вентиляции сдерживают внедрение высокомеханизированной техники и прогрессивной технологии, оказывая соответствующее влияние и на технико-экономические показатели работы угольных шахт.

Несмотря на большие усилия и успехи ученых и специалистов как в СССР, так и за рубежом, направленные на разработку эффективных способов и средств борьбы с метаном в угольных шахтах, проблема борьбы с ним приобретает все большую актуальность. Уже в настоящее время эффективность существующих способов и средств борьбы с газом во многих случаях оказывается недостаточной, что предопределяет наряду с их дальнейшим совершенствованием необходимость разработки новых способов и средств борьбы с метаном.

Одним из возможных подходов к этой проблеме является привлечение для ее решения новейших достижений химии, физики, микробиологии и других основополагающих наук. Настоящая работа посвящена исследованию возможности использования процессов биологического окисления метана и физико-химического воздействия на газоносные угольные пласты с целью снижения метановыделения в атмосферу горных выработок.

Работа выполнялась в Московском ордена Трудового Красного Знамени горном институте в отделе биохимических и химических методов борьбы с метаном в угольных шахтах отраслевой научно-исследовательской лаборатории процессов, кибернетических систем управления и безопасности угледобычи. Научный консультант — лауреат Государственной премии СССР, докт. техн. наук, проф. А. С. Бурчаков. Основная экспериментальная часть работы выполнена под научным руководством и при непосредственном участии автора коллективом сотрудников отдела, за что автор выражает им большую искреннюю благодарность.

Считаю своим долгом отметить большую помощь, неиссякаемую энергию и научное руководство постановкой и развитием этих работ в Московском горном институте со стороны засл. деят. науки и техники РСФСР, проф.

А. И. Ксенофонтовой.

Автор признателен руководству МагНИИ, комбинатов «Донбассантрацит» и «Краснодонуголь», шахты «Суходольская» № 2, командованию Военизированных горноспасательных частей Ворошиловградской области, 7-го горноспасательного отряда г. Краснодона, сотрудникам кафедры промышленной вентиляции и техники безопасности Тульского политехнического института, газобиохимической лаборатории Всесоюзного научно-исследовательского института ядерной геофизики и геохимии, кафедры органической химии МГУ за оказание практической помощи при выполнении настоящей работы.

Большую благодарность за научную помощь и ценные консультации автор выражает академикам Н. В. Мельникову, А. А. Имшенецкому, В. А. Каргину, чл.-корр. АН СССР С. И. Кузнецову, канд. техн. наук Н. К. Гринько, горн. инж.

В. В. Вильчицкому, докторам биол. наук М. В. Иванову, И. Л. Работновой, докт. мед. наук Б. А. Фихтману, докт. техн. наук В. Б. Тихомирову, докт. физ.-мат. наук Г. П. Черепанову, канд. геол.-мин. наук Г. А. Могилевскому, канд. техн. наук С. С. Лихтерману, кандидатам хим. наук В. Б. Лукьянову и П. А. Чукаловскому.

В первой главе излагаются результаты анализа исследований по борьбе с метаном в угольных шахтах, исследований, проведенных автором, по каталитическому окислению метана из воздуха, формулируется цель и задачи работы.

Особую значимость вопросы борьбы с метаном стали приобретать с 30-х годов в связи с широким развитием работ по механизации, реконструкции и широкому строительству угольных шахт.

В связи с этим в стране начались и в дальнейшем расширялись работы по изучению масштабов и форм выделения метана в горные выработки, источников его в шахтах, газоносности угольных пластов и пород, их коллекторских свойств и форм связи метана, по разработке способов борьбы с ним. Основоположителем и руководителем этих работ был выдающийся советский ученый акад. А. А. Скочинский, создатель школы рудничной аэрологии.

Крупный вклад в становление и развитие этой школы внесли известные ученые — соратники и ученики акад. А. А. Скочинского: проф. В. Б. Комаров, проф. Ф. А. Абрамов, проф. А. И. Ксенофонтова, проф. Г. Д. Лидин, проф. Л. Н. Быков, проф. В. В. Ходот, проф. И. М. Печук, воспитавшие целую плеяду специалистов в вопросах борьбы с газом, среди которых: Е. Д. Алидзаев, А. Т. Айруни, В. Л. Божко, К. К. Бусыгин, А. Г. Зеин, Г. М. Кричевский, К. А. Корепанов, Ф. С. Клебанов, А. И. Кравцов, А. А. Мясников, Б. И. Медведев, А. М. Морев, В. И. Николин, Н. В. Ножкин, Е. И. Преображенская, А. Э. Петросян, В. Т. Пальвелев, А. М. Поелуев, М. Я. Рапорт, Л. И. Рыжих, Н. П. Соловьев, Л. А. Скляр, И. В. Сергеев, К. З. Ушаков, А. С. Цирульников, О. И. Чернов, И. Л. Эттингер, М. М. Элинсон, И. М. Яровой и др.

Массовое проявление явлений газовыделений, постоянно возрастающие потребности практики обусловили необходимость привлечения больших научных коллективов для решения задач борьбы с метаном. Трудно найти в настоящее время научно-исследовательский институт или высшее учебное заведение горного профиля, которые в той или иной степени не занимались бы вопросами управления газовыделением. Наиболее концентрированно эти исследования выполняются в ИГД им. А. А. Скочинского, МагНИИ, ВостНИИ и их филиалах, ДонУГИ, ИФЗ АН СССР, ПечорНИУИ и в вузах: ДГИ, ДПИ, КПИ, ЛГИ, НПИ, МГИ.

Выполненный анализ литературных и фондовых материалов по изысканию и практическому применению различных методов уменьшения газовыделения из газоносных угольных пластов и предотвращения возможных опасных последствий присутствия метана в рудничной атмосфере показал, что современные масштабы его выделения являются одним из основных факторов, лимитирующих увеличение нагрузки на очистные забои и осложняющих решение вопросов непрерывного улучшения охраны труда при подземной разработке угольных месторождений. Интенсификация добычи угля и концентрация горных работ, все увеличивающиеся дебиты газа и неравномерность его распределения в вентиляционной сети, большие депрессии и расходы энергии на проветривание не позволяют эффективно решать задачу борьбы с метаном путем еще большей подачи воздуха в шахту.

Возможности вентиляции, одного из основных способов нормализации атмосферных условий, в целом ряде случаев уже не соответствуют потребностям практики.

Появление «вентиляционного барьера» и все расширяющаяся область его ограничивающего влияния предопределили необходимость широкого применения других инженерных средств борьбы с газом. Внедрение в практику борьбы с газом дегазации и в первую очередь пластов-спутников позволило значительно понизить газовыделение из них. Однако применяемые в настоящее время способы уменьшения метановыделения из тонких и средней мощности разрабатываемых угольных пластов, особенно в условиях Донецкого бассейна вследствие недостаточной их эффективности, не могут в целом ряде случаев обеспечить высокий уровень концентрации и интенсификации горных работ, предусмотренный основными техническими направлениями развития угольной промышленности.

Вместе с тем в структуре газового баланса с учетом тенденций ее изменения при углублении горных работ метановыделение из разрабатываемого угольного пласта было и остается в значительной степени определяющим газообильность добычных участков фактором.

Выполненные нами исследования по каталитическому окислению метана из воздуха на пиролюзите показали, что эффективность этого процесса достигает 93—98% при концентрации метана 0,5—4,0%, однако снизить его температуру ниже 380°C не представляется возможным.

Расчеты масштабов процесса при дебите воздуха, например, 100 м³/мин и концентрации метана в нем 3% показывают, что для его протекания требуется 15 м³ катализатора, и он сопровождается уменьшением концентрации кислорода в газовом потоке с 20 до 17%.

Таким образом, вследствие высоких температур процесса, потребных больших количеств удельного содержания катализатора, уменьшения концентрации кислорода в потоке воздуха практические применения каталитического окисления метана в условиях угольных шахт в настоящее время крайне затруднительны.

На современном уровне знаний метанопотребляющие микроорганизмы являются единственным средством, способным к низкотемпературному окислению метана в широких масштабах. Успехи химии высокомолекулярных соединений позволяют в практических масштабах осуществлять процессы перевода растворов из жидкого состояния в твердое в различных условиях, в том числе и в пористых средах.

В связи с этим целью настоящей работы является исследование возможности и эффективности практического применения биохимического и физико-химического воздействия на газоносный угольный пласт для уменьшения газовыделения при его разрушении и на этой базе разработка научных основ принципиально новых биохимического и физико-химического способов борьбы с метаном.

Поставленной целью определяются и задачи работы:

1. Разработка методик исследования биохимического и физико-химического способов борьбы с газом в угольном пласте.
2. Представление гипотез разрабатываемых способов как сложных процессов.
3. Изучение и выбор активных комплексов метанопотребляющих микроорганизмов и растворов с управляемыми свойствами.
4. Установление аналитических и экспериментальных зависимостей с целью определения эффективных параметров изучаемых процессов.
5. Исследование возможности протекания процессов в пористой структуре угля.
6. Экспериментальные исследования эффективности разрабатываемых способов.
7. Исследование экономической целесообразности их применения для борьбы с метаном.
8. Апробация теоретических и экспериментальных исследований.
9. Разработка рекомендаций по практическому применению биохимического и физико-химического способов борьбы с метаном.

Для решения поставленных задач использовались следующие методы:

1. Методы теоретического анализа.
2. Аналитические методы (математическое планирование физических экспериментов, статистические методы, дискретное программирование и технико-экономический анализ).

3. Лабораторные методы (моделирование).
4. Натурные методы экспериментальных исследований.
5. Экспериментально-аналитические.
6. Методы логического и интуитивного мышления.

Кроме этого, использовались методы биологического, химического, авторадиграфического и хроматографического анализа.

В качестве объектов исследований приняты жирные угли с различной газоносностью для лабораторных и шахта «Суходольская» № 2 комбината «Краснодонуголь» для натурных исследований.

В главе второй излагаются разработанные автором методики: создания искусственной газоносности угольных кернов; лабораторных исследований биохимического окисления метана в угле на основе математического планирования экспериментов; лабораторных исследований влияния физико-химической обработки на изменение газовыделения, газоносности и проницаемости угля и натурных исследований по определению возможности и эффективности биохимического и физико-химического воздействия на угольный пласт с целью снижения газовыделения при его разработке.

Особенностью методик лабораторных исследований биохимического окисления метана в угле и физико-химического воздействия на систему метан—уголь является возможность изучения изменений газоносности угольных образцов, газовой динамики при гидравлическом (био- и физико-химическом) и пневматическом воздействии на газоносные угольные образцы в режиме фильтрации с воспроизведением в лабораторных условиях элементарных участков угольного пласта в объемном напряженном состоянии. С целью оптимизации параметров биохимического окисления метана в угле применен метод математического планирования экспериментов.

Методикой лабораторных исследований биохимического окисления метана в угле предусматривалась оценка эффективности циклического процесса и изучение влияния основных, определяющих его факторов.

Методика лабораторных исследований изменения газовыделения и газоносности образцов при физико-химическом воздействии на них и воздействии водой в сопоставлении с величинами этих параметров у необработанных кернов позволила изучить влияние механизма перевода раствора высокомолекулярного соединения из жидкого состояния в твердое в пористой структуре угля на систему метан—уголь и оценить эффективность этого процесса.

В связи с тем, что сохранить природную газоносность угля при изготовлении из него образцов правильной формы практически невозможно, разработана методика создания заданной искусственной газоносности угольных образцов, находящихся

в объемном напряженном состоянии, позволяющая проводить лабораторные исследования различных воздействий на систему метан—уголь при любой заданной газоносности образцов вплоть до предельных ее значений по газоемкости данной марки угля. Для выполнения лабораторных исследований по этим методикам разработаны фильтрационные и зарядные стенды, в основу которых положен принцип фильтрационного стенда МакНИИ.

Методикой натурных исследований предусматривалось изучение возможности и эффективности протекания биохимического и физико-химического процессов в неразгруженном от горного давления газоносном угольном пласте.

Учитывая, что на изменения газодинамических характеристик пласта оказывают влияние технологические составляющие биохимического и физико-химического способов, такие, как нагнетание в пласт жидкости, пневматическая его обработка, естественная его дегазация и в процессе бурения скважины, предусматривалось поэтапное проведение исследований с промежуточной оценкой после каждого этапа возможных изменений контролируемых газодинамических параметров на значительном участке угольного пласта по простиранию. Объектом исследования при этом являлся газоносный угольный пласт с обработкой его из забоя подготовительной выработки, проводимой по простиранию, через длинные скважины и оценкой эффективности при ее движении по участкам пласта, подвергнутым тому или иному воздействию.

На первом этапе исследовались исходные характеристики пласта: газовыделение с обнаженной поверхности, газоносность на кромке забоя и запыленность атмосферы.

На втором этапе дифференцированно оценивалась эффективность воздействия на пласт водой и воздухом (пневмообработка).

На третьем этапе осуществлялся процесс биохимического окисления метана в угле, протекание которого контролировалось как по изменению газоносности, так и по наличию газообразных продуктов жизнедеятельности микроорганизмов и их развитию в пористой структуре пласта.

На четвертом этапе предусматривалась оценка эффективности процесса перевода раствора из жидкого состояния в твердое в пористой структуре пласта с контролем изменения газовыделения, газоносности и запыленности атмосферы.

Наряду с этим оценивались параметры нагнетания растворов сопоставлением с аналогичными для воды с целью изучения возможности использования для биохимического и физико-химического способов серийно выпускаемого для увлажнения угольных пластов оборудования и осуществлялся систематический контроль температуры угольного массива при его пневматической обработке.

В главе третьей излагаются результаты теоретических и экспериментальных исследований по разработке биохимического способа борьбы с метаном.

Рассматриваются теоретические предпосылки для разработки способа; результаты исследований: наличия микроорганизмов в угленосных толщах; выбора накопительного комплекса и оптимизации жидкой фазы среды обитания; основных параметров процесса биохимического окисления метана в фильтрационном потоке возможности проникновения метанопотребляющих бактерий в пористую структуру угля и способности развития в ней; влияние декомпрессии на целостный состав клеток и темпов пневмообработки на обеспеченность процесса кислородом; степени влияния основных параметров на эффективность процесса окисления метана метанопотребляющими микроорганизмами в угле и возможности получения больших количеств биологически активной суспензии.

Успехи мировой микробиологической науки дали возможность использовать высокую биохимическую активность микроорганизмов в промышленном масштабе в самых различных областях производственной деятельности человека.

Особое место среди вопросов, решаемых технической микробиологией, занимает проблема получения белка при культивировании метанопотребляющих бактерий на метане.

Первое предложение об использовании метанопотребляющих бактерий для борьбы с метаном в шахтах было сделано А. З. Юровским с сотрудниками лаборатории химии угля Всесоюзного угольного научно-исследовательского института в 1938 г.

В 1966 г. А. И. Ксенофонтовой, А. С. Бурчаковым, Н. В. Ножкиным (МГИ) и Г. А. Могилевским (ВНИИЯГГ) при активном участии автора и дальнейшем развитии им этой идеи был предложен принципиально новый метод борьбы с метаном при помощи метанопотребляющих бактерий, закачиваемых в пласт вместе с питательной средой.

На основании анализа теоретических предпосылок автором была разработана гипотеза биохимического способа снижения природной метаносности угольных пластов, сущность которой заключается в следующем.

Минерализованный водный раствор, содержащий метанопотребляющие бактерии заданной плотности, по технологии предварительного увлажнения закачивается в угольный пласт, чем обеспечивается его насыщение микроорганизмами и жидкой фазой питательной среды. Фильтрация суспензии приводит к смещению равновесия в системе метан — уголь, вызывая вытеснение свободного газа и его десорбцию. Десорбируемый газ, растворяясь в биологической суспензии, усваивается клетками метанопотребляющих бактерий в режиме низкотемпературного окисления при наличии в пористом пространстве

молекулярного кислорода, подача которого в воздушном соотношении с азотом осуществляется путем пневматической обработки пласта в режиме фильтрации. Образующийся в процессе биохимического окисления метана углекислый газ частично сорбируется углем и выносится из массива фильтрующимся воздухом. При потреблении метана часть углерода расходуется на построение клеточного вещества микроорганизмов, следствием чего является увеличение их численности и масштабов потребления газа.

Теоретическим анализом физиологических потребностей, морфологии, метаболизма метанопотребляющих микроорганизмов и естественных условий угольных пластов как среды их обитания установлена принципиальная возможность биохимического окисления метана непосредственно в газоносном угольном пласте.

Проведенные обследования 19 угольных шахт, в том числе 4 шахт Подмосковного и 15 шахт Донецкого бассейнов, показали широкое распространение метанопотребляющих микроорганизмов на угольных контактах при наличии их аэрации и в шахтных водах.

Эти обследования не выявили в условиях угольных шахт факторов отрицательного воздействия на метанопотребляющую микрофлору. Положительно охарактеризованы и угольные пласты как среда обитания микроорганизмов при искусственном воспроизведении в них процесса биохимического окисления метана.

Наряду с метанопотребляющей в угольных шахтах выявлена газообразующая микрофлора: метанобразующая, водородобразующая и тионовая. Учитывая появление метана в атмосфере заперемыченных выработанных пространств шахт Подмосковного угольного бассейна, в лабораторных условиях проведено изучение этого явления, показавшее возможность протекания современных процессов генерации метана при участии метанобразующих бактерий в специфических условиях, создающихся в угольных шахтах, что обуславливает необходимость дальнейших исследований этого вопроса.

В результате проведенного обследования угольных шахт выделено 14 накопительных комплексов метанопотребляющих бактерий, в основном, из шахтных вод.

Для выявления наиболее активных культур проведены сравнительные исследования интенсивности их развития и потребления метана на питательных средах Мюнца, Таусона и Бушнелла-Хааса. Из всех полученных культур предъявляемым требованиям в наибольшей степени соответствовал метанопотребляющий накопительный комплекс № 19, полученный из воды шахты № 9 Донецкого бассейна, который и был принят в качестве основного при дальнейших исследованиях. Для его характеристики проведено выделение чистых культур путем по-

лучения отдельных бактериальных колоний на соответствующих питательных средах.

Изучены их морфологические, культуральные признаки и физиологические свойства.

Проведенные исследования позволили установить, что накопительный комплекс № 19 представлен главным образом бактериями родов: *Micobacterium*, *Pseudomonas* и *Arthrobacter* размером 0,5—0,9 мк в поперечнике и 1—3 мк по длине.

Выполненная для этого комплекса оптимизация жидкой питательной среды методом математического планирования экспериментов показала лучшее развитие и потребление метана при работе клеток в растворе полученного состава (г/л): азотнокислый калий — 1,3; двузамещенный фосфат калия — 1,2; хлористый кальций — 0,2; следы железа и микроэлементы.

Исследования основных параметров процесса биохимического окисления метана в фильтрационном потоке показали, что на один объем потребляемого метана расходуется 0,8—1,3 объема кислорода с выделением 0,2—0,4 объема углекислого газа. При этом средняя активность накопительного комплекса № 19 составляет $2 \cdot 10^{-8}$ мл/кл·час, изменения РН среды в процессе окисления не выходят из пределов, благоприятных для жизнедеятельности метанпотребляющих бактерий значений. Установлена возможность полного окисления метана из газовой смеси, показано, что содержание в ней кислорода менее 2% лимитирует процесс окисления.

Изучены особенности протекания процесса в пленочной влаге в течение длительного времени (22 суток) моделированием фильтрационных потоков выработанных пространств.

Результаты этих исследований показали возможность осуществления процесса в пористых структурах при внесении в них метанпотребляющих микроорганизмов в пленочной влаге. Аналитическим рассмотрением процесса окисления и экспериментальными исследованиями установлена зависимость его эффективности от соотношения исходных компонентов кислорода и метана в газовой фазе питательной среды, что подтверждается и результатами исследований З. С. Смирновой. Показано, что при практическом осуществлении биохимического окисления метана концентрация клеток в суспензии не должна быть менее $1 \cdot 10^6$ кл/мл.

Определение эффективной пористости углей по биологической суспензии показало, что ее величина составляет 1,5—1,7%. Это указывает на способность метанпотребляющих микроорганизмов занимать объем макропор в угле.

Исследованиями фильтрации биологической суспензии через уголь в лабораторных и натуральных условиях установлено, что клетки метанпотребляющих бактерий способны не только проникать в пористую структуру угля, но и насыщать ее до не-

обходимой плотности. Концентрация микроорганизмов, профильтровавшихся через уголь, нарастает с увеличением времени и темпа закачки. Бактерии, профильтровавшиеся через участок угольного пласта в натуральных (при расстоянии между скважинами 20 м) и через угольные образцы в лабораторных условиях не теряли жизнеспособности. При культивировании они давали хороший рост и активное развитие.

Анализами профильтровавшейся суспензии установлено, что часть клеток метанпотребляющих бактерий при этом разрушается. Изучение этого вопроса показало, что причиной нарушения целостного состава клеток является газовая декомпрессия, максимальные градиенты которой развиваются в прискважинной зоне пласта при формировании контура увлажнения по его мощности с учетом анизотропных свойств. Влияние газовой декомпрессии на целостный состав микроорганизмов сказывается при увеличении ее градиентов более 0,2 атм/мин.

Расчеты градиентов декомпрессии при фильтрации суспензии от контура питания по мощности пласта, т. е. определение максимальных их значений, можно выполнять по предлагаемой в работе аналитической зависимости.

В лабораторных условиях на угольных образцах изучены особенности жизнедеятельности клеток в пористой структуре угля. При этом установлено, что метанпотребляющие бактерии при наличии в угле продуктов, необходимых для их жизнедеятельности, активно развиваются. Так, например, при начальной концентрации клеток $(3,6—4,4) \cdot 10^4$ в 1 г угля число их к исходу 10 суток увеличивалось до $(1—3,5) \cdot 10^6$. При этом осуществлялся процесс биохимического окисления метана, сопровождавшийся выделением углекислого газа.

Средняя активность метанпотребляющего комплекса составляла $(0,78—1,15) \cdot 10^{-8}$ кл/мл·час, т. е. имела незначительное отличие от аналогичной величины при окислении метана из фильтрационного потока газовой смеси в макропористых средах. Длительный, в течение 10 суток, контакт суспензии с углем не оказывает влияния на способность микроорганизмов к развитию и потреблению метана.

В соответствии с разработанной методикой были проведены исследования степени влияния основных параметров на эффективность биохимического окисления метана в угле методом математического планирования экспериментов, применение которого позволило получить математические модели съема газа за счет увлажнения с пневмообработкой u_1 и жизнедеятельности микроорганизмов в угле u_2 , т. е. получить представление о двух функциях отклика в зависимости от изменений четырех факторов: концентрации микроорганизмов в суспензии x_1 , исходной газоносности угля x_2 , темпа x_3 и времени x_4 пневмообработки.

Специальным рассмотрением вопроса и лабораторными исследованиями установлены уровни варьирования переменных: концентрации микроорганизмов в суспензии 10^4 — 10^7 кл/мл; исходной газоносности 10 — 20 м³/т; темпа пневмообработки 3 — 19 л/т·мин; времени пневмообработки 7 — 15 суток.

Проведение полного факторного эксперимента позволило с 90% достоверностью получить математическую модель процесса съема газа за счет увлажнения и пневмообработки угольного образца;

$$y_n = 42,6 + 3,48x_2 + 3,24x_3 + 2,5x_4 - 0,9x_2 \cdot x_3,$$

где x_2 , x_3 , x_4 —кодированные значения переменных.

Анализ полученной зависимости показал, что концентрация микроорганизмов в исходной суспензии не оказывает влияния на эффективность процесса. Увеличение газоносности, темпа и времени пневмообработки увеличивает эффективность процесса. Влияние газоносности и темпа пневмообработки оказывает большее влияние на процесс, чем его длительность.

Эффект межфакторного взаимодействия газоносности и темпа уменьшает величину выхода процесса, однако в исследуемой области его влияние невелико, что дает возможность рассматривать модель процесса как линейную. Двухмерными сечениями поверхности отклика в принятых интервалах варьирования переменных установлено, что максимальная его эффективность составляет 50%.

Описание процесса биохимического окисления метана линейной математической моделью показало ее неадекватность. Поэтому его исследование осуществлялось планированием второго порядка с использованием метода центрального ротационного композиционного планирования.

Анализ полученной модели второго порядка двухмерными сечениями поверхности отклика:

$$y_6 = 22 + 6,62x_1 - 2x_3 + 5,22x_4 + 1,89x_1x_4 - 2,45x_1^2 - 5,8x_3^2 - 2,2x_4^2$$

показал, что биохимическое окисление метана в угле является сложным процессом, определяемым не только основными факторами, но и межфакторными взаимодействиями.

Увеличение исходной плотности суспензии увеличивает выход процесса, и это влияние соизмеримо с влиянием времени. Потребление метана микроорганизмами прямо пропорционально исходной газоносности. Увеличение или уменьшение темпа пневмообработки за пределы 11 л/т·мин уменьшает эффективность процесса. Наиболее рациональная длительность осуществления процесса в циклическом режиме составляет 15 суток.

Максимальный съем газа за счет собственно жизнедеятельности микроорганизмов в циклическом режиме осуществления процесса находится в пределах 30 — 32 %.

Поскольку биохимический способ борьбы с метаном технологически соединяет влияние увлажнения, пневмообработки и жизнедеятельности микроорганизмов, совокупная его эффективность исследовалась графическими решениями компромиссных задач методом совмещения аналогичных сечений поверхностей откликов процессов увлажнения, пневмообработки и окисления метана микроорганизмами.

При этом эффективность процесса биохимического окисления метана при газоносности угля 20 м³/т, продолжительности его 15 суток и темпах пневмообработки 3 и 11 л/мин составила соответственно 65 и 80 %.

Изучена возможность получения необходимых количеств биологически активной суспензии требуемой концентрации. Установлено, что потребность, например, шахты с добычей 3000 т/сут в суспензии плотностью 10^6 кл/мл обеспечивается выращиванием ее на двух ферментерах в режиме непрерывного культивирования с автоматическим управлением процессом (при культивируемом объеме 20 л каждый) в объеме 29 л/сут, плотностью 10^9 кл/мл с кратностью последующего разведения $1:1000$. Возможен и второй путь получения суспензии необходимой плотности, при котором используется биологически активная паста максимальной удельной плотности микроорганизмов, изготавливаемая централизованно и используемая с кратностью разведения $1:1000$. Такая паста может храниться в течение месяца при температуре $+4^\circ\text{C}$.

Для шахты с добычей 3000 т/сут при биохимической обработке всего добываемого угля из расчета удельного насыщения его 15 л/т требуется $22,5$ г биологической пасты в сутки.

В главе четвертой излагаются теоретические исследования процесса пневматической обработки угольных пластов. Пневматическая обработка угольных пластов, являясь необходимым средством обеспечения процесса биохимического окисления метана, вместе с этим приводит к смещению равновесия в системе метан — уголь, вызывая десорбцию метана и вынос его из угольного пласта движущимся потоком воздуха, следствием чего является снижение природной газоносности.

При пневматической обработке пласта в угле протекают следующие основные физические процессы:

- фильтрация метано-воздушной смеси в порах и поровых каналах;
- фильтрация метана в порах и его вытеснение воздухом;
- десорбция метана из ультрапор и его диффузия;
- диффузия и сорбция углем кислорода из воздушного потока;
- окисление угля.

В процессе фильтрации воздуха в массиве угля вышеперечисленные физические явления проявляются совокупно в тесной взаимосвязи друг с другом, что представляет, учитывая новизну постановки задачи и отсутствие теоретических и экспериментальных исследований в этой области, известную сложность при теоретическом их рассмотрении.

Для аналитического представления рассматриваемых явлений использованы известные дифференциальные уравнения, описывающие движение газовой смеси в пористой структуре, сохранение массы газового потока, диффузию метана и кислорода, теплопроводность газовой смеси и угольного массива.

С учетом граничных условий и стационарности процесса получена система уравнений, позволяющая при ее решении на ЭВЦМ определять вынос метана движущимся потоком воздуха, температурные условия пласта при сорбции углем кислорода и задаваемых режимах пневмообработки по биологическим параметрам. Преобразованием и упрощением этой системы получены аналитические уравнения для инженерных расчетов по определению выноса метана из обрабатываемого массива потоком воздуха, температурных условий пласта и сорбции углем кислорода воздуха в период пневмообработки:

$$M_m = \frac{\xi_m a C'_{M_0}}{1 + \xi_m t} S t; \quad (1)$$

$$T = T_{0 \text{ exp}} \left(\frac{q \lambda_0 \rho_0 R T_y}{\varepsilon v M_0} \right) x; \quad (2)$$

$$M_k = \rho_0 v S t e^{-\frac{\xi_0 \varepsilon a}{v}}; \quad (3)$$

где M_m — вынос метана воздушным потоком из обрабатываемого массива угля за время t ;

M_k — сорбция углем кислорода из газового потока за время пневмообработки;

T — температура обрабатываемого участка пласта на удалении x от контура питания;

ξ_m — коэффициент парциального массообмена метана;

a — расстояние между нагнетательной и отточной скважинами;

C'_{M_0} — средняя концентрация метана в ультрапорах;

S — поперечное сечение обрабатываемого участка пласта;

t — время процесса пневмообработки;

T_0 — начальная температура газового потока;

q — удельная теплота окисления угля (в расчете на единицу массы кислорода);

λ_0 — теплопроводность газовой смеси;

ρ — плотность газовой смеси;

ρ_0 — плотность кислорода в смеси;

R — газовая постоянная;

T_y — средняя температура угля;

ε — фильтрационная пористость угля;

v — расход газовой смеси через единицу площади;

M_0 — грам-моль кислорода;

x — расстояние от контура питания;

ξ_0 — коэффициент парциального массообмена кислорода.

В главе пятой излагаются результаты теоретических и экспериментальных исследований по разработке физико-химического способа борьбы с метаном в угольных шахтах.

Рассматриваются результаты теоретических исследований возможности физико-химического воздействия на газоносный угольный пласт, исследований физико-химических свойств растворов, способных к изменению фазового состояния, лабораторных исследований влияния физико-химической обработки угля на изменение газовой выделенности, газопроницаемости, пылеобразования и крепости. В СССР и за рубежом широкое распространение получило увлажнение угольных пластов водой как способ борьбы с пылью. В последнее время он начал применяться и для борьбы с газом.

Теоретическое рассмотрение механизма взаимодействия системы жидкость — метан — уголь показало, что значительное повышение эффективности обработки пласта по уменьшению газовой выделенности может быть достигнуто осуществлением в пористой структуре угля процесса перевода жидкости в твердое состояние.

Исходя из этого нами предложен физико-химический способ уменьшения газовой выделенности из угольного пласта в атмосферу горных выработок, основу которого составляет применение для этой цели водных растворов органических соединений, близких по своей природе к природе угля, обладающих способностью к изменению фазового состояния путем перевода их из жидкого в твердое непосредственно в пористой структуре угля с использованием процессов полимеризации, поликонденсации или отверждения.

Сущность физико-химического способа уменьшения газовой выделенности из угольного пласта заключается в следующем.

Для изменения фазового состояния используется водный раствор высокомолекулярного соединения, способный при введении катализатора в заданное время переходить из жидкого состояния в твердое. При нагнетании этого раствора в пласт происходит нарушение в равновесии системы метан — уголь за счет вытеснения свободного газа и развивающегося процесса адсорбции раствора на поверхности угля, приводящих к десорбции метана. После качественного насыщения обрабатываемого объема угля раствор переводится в твердое состояние в объеме макро- и переходных пор, перекрывая устья микро-

пор и образуя твердый продукт низкой газопроницаемости с развитием процессов полимолекулярной адсорбции и адгезии, удерживающих его в занимаемом объеме. Фазовый переход сопровождается, в случае проведения процесса отверждения, сшивкой молекул с включением в сшиваемую структуру растворителя, свободного метана и угольной пыли как наполнителей. Твердый продукт блокирует основной сорбционный объем метана и фильтрационные пути его выхода, а адгезионные силы агрегируют угольную пыль, следствием чего является уменьшение газовыделения и пылеобразования при разрушении угольного пласта в процессе разработки.

Гетерополярность водорастворимых полимеров обуславливает доступность им всей поверхности угля. Растворяясь в воде, они понижают ее поверхностное натяжение, улучшая условия смачиваемости угля и, как следствие этого, качество насыщения пласта. Если в случае воды и минеральных растворов основными силами, удерживающими жидкость в поровом объеме, являются капиллярные давления, то в случае растворов высокомолекулярных органических соединений наряду с этим развиваются и адгезионные силы, не зависящие от диаметра пор, а определяющиеся природой макромолекул.

Гибкость цепей и независимость поведения их отдельных звеньев определяют суммарный энергетический эффект взаимодействия молекул раствора с углем. Специфика природы макромолекул проявляется и при их адсорбции на твердой поверхности. В отличие от адсорбции воды и солей, приводящей к истощению объемной фазы, адсорбция полимеров в порах не вызывает во времени освобождение фильтрационного объема, что связано со структурированием растворов и полимолекулярным ее характером. При проведении поперечной сшивки (в процессе отверждения) молекулярные цепи полностью теряют подвижность, образуя сетку, внутри которой заключаются молекулы растворителя, а при наличии в порах твердых частиц и газа и они как наполнитель.

Проведенная Б. И. Медведевым оценка величины сорбционной поверхности, обнажаемой при измельчении угля до фракционного состава 1 мк, показала, что при этом закрытая сорбционная поверхность пор уменьшается с 200 до 194 м²/см³. Это дает основание считать, что при насыщении угля раствором с последующим отверждением и блокированием микроструктуры его разрушение не приведет к большому увеличению газоотдачи. Уменьшение газоотдачи будет и следствием низкой газопроницаемости твердого продукта вследствие трехмерной структуры полимера и его стеклообразного состояния.

Теоретическое рассмотрение вопросов перевода растворов в твердое состояние и механизма взаимодействия в системе раствор — газ — уголь с учетом практики крепления грунтов позволило сформулировать основные требования, предъявляе-

мые к ним, и на этой основе в качестве рабочей жидкости, способной к фазовому переходу, выбрать водный раствор мочевино-формальдегидной смолы и ее разновидностей (крепителей).

Химизм отверждения таких растворов заключается в снижении РН среды, при котором происходит полное и глубокое отверждение.

Исследование физико-химических свойств поликонденсации мочевины с формальдегидом показало, что регулирование времени отверждения в широких интервалах его изменения, необходимых для качественного насыщения угольного пласта, затруднительно. Продукт поликонденсации в этом случае характеризуется небольшими адгезионными связями с угольной пылью.

Значительно лучше репулируется время отверждения при использовании разновидностей мочевино-формальдегидной смолы, представляющих собой стабилизированные продукты ее поликонденсации (крепители) с отвердителем хлористым аммонием, характеризующиеся хорошими адгезионными связями с угольной пылью. Они относятся к числу наиболее дешевых серийно выпускаемых продуктов (10 коп. — 1 л), имеют большие перспективы роста производства, изготавливаются из легкодоступного химического сырья, отличаются большой активностью и способностью к отверждению при избытке влаги, не опасны в отношении токсического действия, а в отвержденном состоянии — не растворимы в воде и не плавки.

Исследованиями водных растворов крепителей различной концентрации, исходя из технико-экономических требований к ним, установлено, что, начиная от промышленно выпускаемой (42%) до минимально возможной, при которой еще не наступает расслоение раствора (для различных марок 20—24%), все они способны изменять фазовое состояние при соответствующем воздействии отвердителя. Причем период отверждения в этом случае репулируется в широких пределах: от нескольких до сотен часов, что вполне достаточно для качественной обработки пласта.

Процесс отверждения растворов на типичных по составу пробах шахтных вод по критическим значениям РН не отличается от соответствующих величин в растворах на дистиллированной воде, аналогичен и характер получаемых при этом зависимостей.

Вышесказанное доказывает возможность использования в качестве растворителя шахтной воды.

С целью изучения влияния на процесс отверждения основных, определяющих его факторов проведены исследования методом математического планирования экспериментов.

При этих исследованиях были приняты следующие уровни варьирования основных факторов:

концентрация крепителя x_1 от 23 до 36% по сухому остатку (исходя из технико-экономических соображений);

концентрация отвердителя x_2 от 0,01 до 0,03 г/г. с. о (исходя из возможности качественного насыщения пласта раствором);

температура процесса x_3 от 20 до 50°C (соответственно температурам угольного массива);

РН среды x_4 — от 6,5 до 7,5 с учетом того, что типичные показатели РН шахтных вод отличаются небольшими отклонениями от нейтральных значений.

На основании проведенных исследований получено уравнение процесса в кодированных переменных, описывающее влияние на период отверждения изучаемых факторов:

$$y = 41,47 - 4,6x_1 - 14,45x_2 - 37,01x_3 + 3,33x_1x_3 + 12,48x_2x_3.$$

Его анализ показывает, что на длительность периода отверждения (время от введения в раствор отвердителя до потери им текучести) оказывают влияние концентрации крепителя и отвердителя в растворе, причем степень влияния последнего превышает влияние концентрации крепителя. Это указывает на то, что в практических условиях варьировать концентрацию крепителя в растворе не целесообразно и эту величину можно принимать на минимальном уровне, что соответствует и предъявляемым к растворам технико-экономическим требованиям.

Для получения необходимой по условиям качественного насыщения пласта продолжительности процесса достаточно варьировать концентрацию отвердителя, оказывающую сильное воздействие на его длительность.

РН среды в пределах принятых изменений не оказывает влияния на длительность процесса. Степень влияния температуры в два с лишним раза превышает влияние концентрации отвердителя. В практических условиях недооценка этого влияния может привести к тому, что отверждение раствора наступит в процессе его нагнетания в пласт.

Для исключения этого при расчетах периода отверждения температуру среды необходимо принимать по максимальным ее значениям (температура рудничной атмосферы или массива угля).

Для определения времени между окончанием нагнетания раствора в пласт и его разрушением в процессе разработки исследовалась кинетика процесса твердения при помощи пластометра П. А. Ребиндера. Анализ полученных результатов показал, что процесс твердения происходит в сравнительно не продолжительные отрезки времени (20—24 часа) после потери раствором свойств текучести и характер полученных зависимостей не изменяется при изменении концентрации крепителя и отвердителя в нем. С учетом этого при расчетах интервала

времени между окончанием обработки пласта и началом его разрушения эту величину необходимо принимать как сумму длительности периодов отверждения и твердения.

Авторадиографические исследования характера протекания отверждения раствора на контакте с углем показали, что он характеризуется поверхностно-объемным процессом сшивки и контакт раствора с углем заметного влияния на него не оказывает. Рассмотрен вопрос о возможной токсичности раствора крепителя при контакте его с углем в процессе нагнетания в пласт. Показано, что высокая сорбционная способность угля, сравнительно небольшое содержание формальдегида и метилового спирта в нем практически исключают возможность их перехода в атмосферу горных выработок.

В лабораторных условиях изучено влияние обработки образцов угля водным раствором крепителя и водой в сравнительном плане с необработанными на изменение газовыделения, остаточной газоносности, газопроницаемости, фракционного состава пыли и крепости. Анализ полученных результатов показал, что обработка образцов угля раствором крепителя с отверждением его в пористой структуре приводит к уменьшению газовыделения из них на 66%, в то время как при использовании воды эта величина понижается на 25% в сравнении с необработанными. Термовакuumной дегазацией из образцов, обработанных этим раствором, не удается полностью извлечь содержащийся в них метан и в среднем 30% его остается в измельченном угле, тогда как при их увлажнении водой коэффициент извлечения составляет в среднем 0,95%, а у необработанных метан извлекается полностью. При увлажнении угольных образцов водой коэффициент их газопроницаемости уменьшается в среднем в 45 раз, а в случае обработки образцов раствором крепителя — в 1300 раз по сравнению с необработанными.

Полученные результаты показывают, что обработка угля раствором крепителя приводит к развитию значительно больших блокирующих эффектов к метану и снижению газопроницаемости среды, чем при его увлажнении водой. Исследования изменения крепости образцов и дисперсного состава пыли при различной их обработке, проведенные по методикам М. М. Протодьяконова и В. А. Сипягина и А. Ф. Сачкова, показали, что воздействие на образцы химически активным раствором приводит к снижению крепости их в среднем на 30% или по сравнению с увлажнением водой — дополнительно на 8—10%. В процессе разрушения образцов выход наиболее мелкой фракции (до 1 мк) пыли при физико-химической обработке уменьшается на 39—40%, тогда как при использовании воды эта величина составляет 19%. Уменьшение мелких фракций пыли (до 2 мк) сопровождается увеличением фракций 5—20 мк в среднем на 15—20%, что подтверждает развитие адге-

зионных связей химически активного раствора с пылью, содержащейся в пористой структуре угольного пласта.

В главе шестой излагаются результаты исследований в натурных условиях биохимического и физико-химического способов борьбы с метаном в угольном пласте.

Натурные исследования новых биохимического и физико-химического способов борьбы с метаном, проведенные впервые в отечественной и зарубежной практике, выполнялись на шахте «Суходольская» № 2 комбината «Краснодонуголь» в Донецком бассейне на разрабатываемом пласте l_6 . На выбранном участке (Восточное крыло шахты) пласт имел простое строение, выдержанную мощность 0,75 м и природную газоносность 10 м³/т. Исследования проводились на участке пласта протяженностью 222 м по простиранию. Обработка пласта водой, воздухом, биологически активной суспензией и раствором высокомолекулярного соединения (крепителем) осуществлялась из забоя Восточного откаточного штрека через длинные скважины, пробуренные по простиранию пласта. В течение 12 месяцев проведения этих исследований было осуществлено более 500 наблюдений за изменениями основных контролируемых параметров в соответствии с разработанной методикой.

Анализ полученных результатов показал следующее. На всем протяжении исследуемых участков за пределами зон гидравлических и пневматических воздействий значительных естественных изменений основного контролируемого параметра (газоносности пласта на кромке забоя) зафиксировано не было, что указывает на стабильность природной газоносности выбранного объекта исследований. Биохимическое воздействие на газоносный угольный пласт в циклическом (продолжительностью 150 час) режиме его осуществления понизило величину газоносности на кромке забоя на 57,7% (результаты первого и третьего этапов исследований).

Поскольку технология биохимического способа включает гидравлическое (увлажнение) и пневматическое (пневмообработка) воздействия на угольный пласт, с целью установления эффективности низкотемпературного окисления метана собственными микроорганизмами выполнена дифференцированная оценка влияния этих факторов на изменения газоносности пласта на кромке забоя. При этом анализом результатов первого, второго и третьего этапов установлено, что увлажнение пласта водой совместно с дегазирующим влиянием скважин понижает величину газоносности пласта на кромке забоя на 18,5%, а пневматическая обработка — на 7,5%.

Собственно биохимическое окисление метана метанопотребляющими микроорганизмами накопительного комплекса № 19 обеспечило снижение величины основного контролируемого параметра на 31,7%.

Снижение газоносности угольного пласта при биохимическом воздействии на него является необходимым, но не достаточным условием для вывода о протекании процесса биохимического окисления метана микроорганизмами.

Протекание процесса считается непреложно доказанным, если в сфере предполагаемой деятельности микроорганизмов обнаружены: вещества, необходимые для нормальной жизнедеятельности данного вида бактерий; вещества, являющиеся продуктом их жизнедеятельности и жизнеспособные клетки данного вида микроорганизмов. Анализ соблюдения первого условия на третьем этапе исследований показал, что условия жидкой фазы и пласта как среды обитания бактерий были благоприятными для их жизнедеятельности. При рассмотрении газообразной фазы как среды обитания установлено, что минимальные концентрации метана и кислорода как необходимых продуктов жизнедеятельности микроорганизмов, исходящие из отточной скважины в течение всего периода пневмообработки, составляли соответственно 0,3 и 19,6%, что характеризует полное соблюдение первого условия.

Основным продуктом жизнедеятельности метанопотребляющих микроорганизмов является углекислый газ. При выполнении третьего этапа из массива выделилось 11,2 м³ углекислого газа, тогда как на втором этапе исследований при увлажнении пласта водой без участия микроорганизмов и пневмообработке он сорбировал весь углекислый газ, содержащийся в воздухе, и его выделений из отточной скважины не наблюдалось, что указывает на соблюдение и второго условия.

После нагнетания в пласт биологической суспензии по нему была пробурена отточная скважина и взяты пробы на содержание в угле метанопотребляющих бактерий. Их анализ показал, что в зону герметизации скважин проникают лишь единичные клетки микроорганизмов. Плотность распределения бактерий в обработанном массиве находилась в пределах $10^3 \div 10^5$ кл/г. По окончании процесса биохимического окисления во время проведения выработки по обработанному массиву после взрывания шпуров по углю на очередном цикле отбирались пробы угля на микробиологический анализ. Его результаты показали наличие жизнеспособной микрофлоры в массиве угля, что свидетельствует о том, что в течение всего эксперимента клетки бактерий оставались жизнеспособными. Это свидетельствует о соблюдении третьего условия.

В процессе пневмообработки на втором и третьем этапах происходило поглощение массивом кислорода. Если на втором этапе было сорбировано 26,5 м³ кислорода, то на третьем поглощено 62,5 м³, что подтверждает потребление его микроорганизмами при осуществлении процесса биохимического окисления метана. На втором и третьем этапах при пневматической

обработке пласта повышение его температуры зафиксировано не было.

Таким образом, на третьем этапе экспериментальных исследований в угольном пласте был осуществлен и протекал процесс биохимического окисления метана, совокупная относительная эффективность которого при продолжительности осуществления 150 час составила 57,7%.

На четвертом этапе исследований была осуществлена обработка пласта раствором крепителя (концентрация 25% по сухому остатку, отвердитель — хлористый аммоний) с последующим отверждением его в пористой структуре угля, что обусловило значительное уменьшение газовыделения с обнаженной поверхности забоя и снижение запыленности атмосферы. Так, при проведении штрека по необработанной зоне (первый этап) газоотдача со свежееобнаженной его поверхности составляла $8 \text{ м}^3/\text{м}^2$ в сутки, а после обработки пласта раствором — $0,07 \text{ м}^3/\text{м}^2$ в сутки, что показывает ее уменьшение на 99%. Величина газоносности на кромке забоя с $3,5 \text{ м}^3/\text{т}$ снизилась до $0,03 \text{ м}^3/\text{т}$. Однако полученное ее значение может характеризовать лишь ту часть метана, которая извлекается термовакуумным способом дегазации образцов.

Результатами лабораторных исследований установлено, что при фазовом переводе раствора высокомолекулярного соединения в твердое состояние около 30% метана не удается извлечь при дегазации. В натурных условиях, как видно из сопоставления значений газоносности угля на первом и четвертом этапах, эта величина составляет 34,7%, что указывает на удовлетворительное согласование результатов лабораторных и натурных исследований.

Осуществление на четвертом этапе перевода раствора из жидкого состояния в твердое в массиве угля привело к снижению запыленности атмосферы с 146 до $30 \text{ мг}/\text{м}^3$, или на 79,5%. Параметры нагнетания воды, суспензии и раствора высокомолекулярного соединения, достигнутое удельное влагонасыщение в сопоставимых условиях второго, третьего и четвертого этапов исследований практически идентичны, что указывает на принципиальную возможность при расчетах параметров нагнетания суспензии и растворов высокомолекулярных соединений использования основных аналитических зависимостей, предложенных для расчетов параметров увлажнения пласта водой.

Проведенные исследования в натурных условиях показали также возможность использования при биохимическом и физико-химическом способах борьбы с газом серийного технологического оборудования, выпускаемого для нагнетания в угольные пласты воды. Рассмотрение механизмов биохимического и физико-химического воздействия на метан в угле показало, что их различие обеспечивает при необходимости возможность

комплексного их применения для резкого уменьшения газовыделения в рудничную атмосферу.

Определениями значений доверительной вероятности полученных результатов натурных исследований установлена высокая степень их надежности.

В главе седьмой изложены рекомендации по использованию и результаты технико-экономического анализа целесообразности применения биохимического и физико-химического способов.

Биохимический и физико-химический способы на данной стадии их разработки рекомендуются для уменьшения газоносности и газовыделения из разрабатываемых угольных пластов. Они могут применяться в условиях любого залегания и различной мощности угольных пластов, гидравлические и фильтрационные свойства которых допускают увлажнение их водой.

Ограничивающим условием применения биохимического способа является показатель РН углей менее 5 и более 9, т. е. углей с ярко выраженными кислотными и щелочными характеристиками. Область рационального применения способа по температурному фактору находится в пределах температур массива от $+15$ до $+50^\circ\text{C}$. На физико-химический способ эти ограничения не накладываются, однако влияние вышеупомянутых факторов необходимо учитывать при расчете времени перевода раствора в твердое состояние путем выбора концентрации отвердителя.

В работе даются рекомендации по приготовлению биологической суспензии и раствора высокомолекулярного соединения. Для борьбы с метаном в условиях разрабатываемого угольного пласта рекомендуется схема нагнетания растворов через длинные скважины, параллельные плоскости очистного забоя. Практические рекомендации анализируются для условий перспективных проектируемых комплексно-механизированных и автоматизированных угольных шахт при темпах продвижения очистных забоев $10—15 \text{ м}/\text{сут}$.

Разработанные рекомендации по применению биохимического и физико-химического способов борьбы с метаном в разрабатываемом угольном пласте практически используются в технологических проектах комплексно-механизированных и автоматизированных шахт «Ильинская» в Кузнецком и им. В. И. Ленина и 1/2 «Вертикальная» в Карагандинском бассейнах.

Технико-экономический анализ целесообразности применения биохимического и физико-химического способов борьбы с метаном в разрабатываемом угольном пласте выполнен для типичных условий разработки тонких пологопадающих пластов с газоносностью $20 \text{ м}^3/\text{т}$ шахтами с суточной производи-

тельностью 3000 т применительно к условиям Донецкого бассейна.

В качестве критерия при анализе принята условная прибыль по добычным участкам.

Расчеты максимально возможной производительности добычных участков по газовому фактору, числа их, а также увеличения добычи при применении биохимического и физико-химического способов уменьшения газовыделения выполнены по методике «Временной инструкции по прогнозу метанообильности угольных шахт СССР» для типичных и перспективных структур газового баланса добычных участков 60 : 40 и 30 : 70 при условии, что уменьшение газовыделения из выработанных пространств и пластов-спутников специальными способами не производится.

Анализ выполнялся методом дискретного программирования с бинарными переменными.

Полученные результаты показали, что при структурах газового баланса 60 : 40 и 30 : 70, т. е. в пределах типичных их изменений в настоящее время и на ближайшую перспективу, снижение газовыделения из разрабатываемого пласта биохимическим и физико-химическим методами экономически целесообразно. Применение этих способов уменьшения газовыделения из разрабатываемого пласта даже при значительном удельном весе в газовом балансе добычных участков метановыделения из выработанных пространств и пластов-спутников обеспечивает возможность значительного увеличения предельно допустимой по газовому фактору нагрузки на очистные забои, следствием чего является возрастание концентрации горных работ за счет сокращения числа добычных участков без существенного изменения производственной мощности шахты.

При биохимическом способе борьбы с метаном и удельных затратах на его осуществление, составляющих 0,546 руб/т запасов, условная прибыль шахты при изменении структуры газового баланса с 30 : 70 до 60 : 40 увеличивается с 0,73 руб/т до 1,15 руб/т добычи.

Применение физико-химического способа при удельных затратах 0,806 руб/т запасов приводит к увеличению условной прибыли по шахте соответственно на 0,48 руб/т и 0,88 руб/т добычи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных теоретических, лабораторных и натурных исследований разработаны научные основы принципиально новых высокоэффективных биохимического и физико-химического способов борьбы с метаном в угольных шахтах с целью улучшения охраны труда и повышения технико-эконо-

мических показателей работы предприятий при подземной разработке угольных месторождений.

Для решения поставленной задачи использованы достижения технической микробиологии, химии высокомолекулярных соединений, математики и рудничной аэрологии.

Представляя в основном в виде законченной системы комплекс вопросов по уменьшению газовыделения в горные выработки низкотемпературным биохимическим окислением метана и физико-химическим блокированием его в пористой структуре угля, исследование в целом ведет к формированию нового направления в рудничной аэрологии — биохимическим и физико-химическим средствам борьбы с метаном в угольных шахтах. Основные его результаты заключаются в следующем.

1. На основании исследований установлена основная физическая сущность не изученных ранее сложных процессов низкотемпературного окисления метана микроорганизмами и блокирования его переводом раствора из жидкого состояния в твердое при био- и физико-химическом воздействии на газоносный угольный пласт.

2. Исследован механизм и сформулированы получившие экспериментальное подтверждение гипотезы биохимического и физико-химического способов уменьшения газовыделения в рудничную атмосферу.

3. По результатам исследования комплекса вопросов взаимодействия биологически и химически активных растворов с природной равновесной системой метан — уголь установлено, что:

физико-химические и фильтрационные условия угольных пластов являются в основном благоприятными для протекания в них процессов биохимического окисления метана и изменения фазового состояния растворов;

для снижения метаноносности угольных пластов и уменьшения метановыделения при их разрушении должны использоваться накопительные комплексы метанопотребляющих бактерий и водные растворы органических высокомолекулярных стабилизированных соединений с инициированием процессов их отверждения;

в качестве растворителя и жидкой фазы питательной среды может использоваться шахтная вода, в последнем случае дополнительно минерализованная;

метанопотребляющие микроорганизмы способны не только проникать в пористую структуру угля и насыщать ее до необходимой плотности, но и развиваться в ней с осуществлением процесса биохимического окисления метана;

для протекания процесса биохимического окисления метана необходим молекулярный кислород, подача которого в пласт должна осуществляться пневматической его обработкой в режиме фильтрации;

растворы высокомолекулярных органических соединений по своей природе более близки к углю, чем вода, что обеспечивает в условиях повышенной их вязкости качественное насыщение пористой структуры пласта;

процесс перевода раствора из жидкого состояния в твердое при сшивке отдельных цепей молекул сопровождается заключением в сшиваемую структуру продуктов отверждения, газа и угольной пыли, развитием полимолекулярной адсорбции, агрегации и резким понижением проницаемости среды, что приводит к возникновению больших блокирующих эффектов к метану, уменьшению выхода наиболее вредной тонкодисперсной пыли, общему снижению уровня запыленности рудничной атмосферы и понижению крепости угольного пласта.

4. Аналитически исследован процесс пневматической обработки угольных пластов. Для типичных краевых условий даны решения дифференциальных уравнений, позволяющие определять вынос воздушным потоком метана, убыль из него кислорода и изменение температуры обрабатываемого участка пласта.

5. Получены математические модели процессов биохимического окисления метана и отверждения водного раствора высокомолекулярного соединения, позволяющие производить их расчеты в пределах типичных изменений основных определяющих факторов.

6. Установлено, что биохимический способ окисления метана в циклическом режиме его применения обеспечивает снижение газосодержания угля на 60—80%.

7. Эффективность физико-химического способа по уменьшению газовыделения составляет 65—99%, а по снижению уровня запыленности рудничной атмосферы — 80%.

8. Апробация биохимического и физико-химического способов в натурных и лабораторных условиях и в проектных решениях и технико-экономический анализ показали целесообразность их практического применения для борьбы с метаном в условиях разрабатываемого пласта.

9. Применение биохимического и физико-химического способов борьбы с метаном в разрабатываемом угольном пласте должно осуществляться по технологическим схемам и с использованием расчетных параметров нагнетания воды через длинные скважины, параллельные очистному забою.

Ориентация на биохимический и физико-химический способы как прогрессивные решения вопросов борьбы с метаном в угольных шахтах одобрена бюро научно-технического совета Министерства угольной промышленности СССР и Государственным Комитетом Совета Министров СССР по науке и технике, а также экспертными оценками при обсуждении вопроса о способах преодоления «вентиляционного барьера» в дискуссии о «шахте будущего».

Отдельные разделы работы в разное время докладывались на:

конференции Московского общества испытателей природы (Москва, 1966 г.);

Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции по вентиляции и вентиляторостроению (Днепропетровск, 1968 г.);

Всесоюзных научных конференциях вузов СССР с участием научно-исследовательских институтов по физике горных пород и процессов (Москва, 1969, 1971 гг.);

Ученом совете Государственного научно-исследовательского института по безопасности работ в горной промышленности (Макеевка, 1970 г.)

технических советах угольных комбинатов «Артемуголь», «Краснодонуголь», «Южкузбассуголь» (Горловка, Краснодон, Новокузнецк, 1970, 1971 гг.).

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Лабораторные исследования процесса потребления метана бактериями в макропористой среде. «Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело», 1968, № 5. (соавторы: Молчанов И. А., Нестеров А. И., Харьковский Б. Т.).

2. Изучение фильтрации бактериальной суспензии через угольный керн. «Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело», 1968, № 6 (соавторы: Молчанов И. А., Харьковский Б. Т.).

3. К вопросу изыскания новых способов борьбы с метаном в угольных шахтах. Тезисы докладов конференции МОИП. М., 1966 (соавторы: Ксенофонтова А. И., Панина Е. Ф., Харьковский Б. Т.).

4. О возможности применения некоторых низко- и высокомолекулярных соединений для снижения газоотдачи и пылеобразования угольного пласта при его разработке. Тезисы докладов на Всесоюзной конференции по физике горных пород и процессов. М., 1969 (соавторы: Александрова А. Н., Смольянинов Н. Г., Старостина М. К.).

5. Каталитическое окисление метана кислородом воздуха в динамических условиях. Тезисы докладов на Всесоюзной конференции по физике горных пород и процессов. М., 1969 (соавтор Мочалова Ю. З.).

6. О возможном участии микроорганизмов в современном образовании метана в заперемыченных пространствах шахт Подмосковья. Тезисы докладов на Всесоюзной конференции по физике горных пород и процессов. М., 1969 (соавтор Нестеров А. И.).

7. Результаты работ и направления дальнейших исследований по разработке биохимических и химических методов борьбы с метаном в угольных шахтах. Тезисы докладов на Всесоюзной конференции по физике горных пород и процессов. М., 1969 (соавтор Бурчаков А. С.).

8. Способ создания искусственной газоносности кернов. Авторское свидетельство № 281367, бюлл. № 29, 1970 (соавторы: Молчанов И. А., Харьковский Б. Т., Перминов Б. Н., Смольянинов Н. Г.).

9. Создание искусственной газоносности угольных образцов. «Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело», 1969, № 8 (соавторы: Молчанов И. А., Харьковский Б. Т., Смольянинов Н. Г., Перминов Б. Н.).

10. Определение оптимальных характеристик некоторых растворов мономеров и полимеров для нагнетания их в пласт с целью борьбы с газовыделением и пылеобразованием. В сб. «Научные основы создания высокопроизводительных комплексно-механизированных и автоматизированных шахт с вычислительно-логическим управлением», вып. III. М., 1970 (соавторы: Александрова А. Н., Смольянинов Н. Г., Старостина М. К.).

11. К вопросу о методике натурных исследований пожароопасности и дегазации угольных пластов при их пневмообработке. Там же (соавторы Молчанов И. А., Кучма Н. А.).

12. Окисление метана в потоке воздуха на окисных катализаторах. Там же (соавторы: Руденко А. П., Лукьянов В. Б., Мочалова Ю. З.).

13. Научные основы создания новых способов борьбы с метаном в угольных шахтах на основе биохимического и физико-химического методов. Тезисы докладов на Всесоюзной конференции по физике горных пород и процессов. М., 1971.

14. Характеристика шахтных вод и углей как среды для обитания метанооксиляющих бактерий. Там же (соавтор Панина Е. Ф.).

15. Исследование влияния основных факторов на эффективность процесса биохимического окисления метана в угле. Там же (соавтор Перминов Б. Н.).

16. О разработке научных основ шахты будущего. «Уголь», 1970, № 5 (соавторы: Бурчаков А. С., Бобылев А. П., Воробьев Б. М., Килячков А. П., Солод В. И., Спиваковский А. О., Тулин В. С., Ушаков К. З., Малкин А. С., Моссаковский Я. В., Ножкин Н. В., Харченко В. А.).

17. Участие микроорганизмов в образовании метана в угольных шахтах Подмосковского бассейна. «Прикладная биохимия и микробиология», 1971, том 7, вып. 3 (соавторы: Нестеров А. И., Молчанов И. А., Черемисина Е. Д.).

18. Результаты исследований по биохимическому окислению метана в условиях угольных шахт. В сб. «Научные основы создания высокопроизводительных комплексно-механизированных и автоматизированных шахт с вычислительно-логическим управлением», 1971, вып. 4.

19. Основные результаты работ по исследованию возможности и эффективности применения физико-химического способа борьбы с газовыделением и пылеобразованием при разработке угольного пласта. Там же.

Л 44141 27/IX 1971 г.

Объем 2 п. л.

Зак. 567, тир. 200

Типография Московского ордена Трудового Красного Знамени горного института.
Ленинский проспект, 6