

На правах рукописи

СКОПИНЦЕВА Ольга Васильевна

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДА
СНИЖЕНИЯ ПЫЛЕВОЙ И ГАЗОВОЙ ОПАСНОСТЕЙ
В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва 2011

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Московский государственный горный университет» на кафедре «Аэрология и охрана труда»

Научный консультант КОЛИКОВ Константин Сергеевич,
доктор технических наук,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
горный университет»,
заместитель заведующего кафедрой ИЗСОС

Официальные оппоненты: КУДРЯШОВ Валерий Викторович
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник
УРАН ИПКОН РАН;

ТЕРЕНТЬЕВ Борис Дмитриевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
горный университет», профессор кафедры ПРПМ;

КАЧУРИН Николай Михайлович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Тульский государственный
университет», заведующий кафедрой
геотехнологий и СПС

Ведущая организация: ФГУП «ННЦ ГП - Институт горного дела
им. А.А. Скочинского» (МО, г. Люберцы)

Защита диссертации состоится 28 марта 2012г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.128.06 в Московском государственном горном университете по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинский пр., 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного горного университета.

Автореферат разослан «_____» февраля 2012г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук

КОРОЛЕВА
Валентина
Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Интенсификация производственных процессов при подземной добыче угля в условиях постоянного увеличения глубины горных работ сопровождается учащением проявлений природных опасностей в шахтах, среди которых особое место по катастрофичности последствий занимают газовая и пылевая опасности, внезапные выбросы угля и газа. Масштабные катастрофы в угольных шахтах за последние годы в результате взрывов метановоздушных смесей показали несовершенство существующей концепции обеспечения взрывобезопасности горных работ на высокогазоносных угольных пластах и потребовали фундаментальных исследований для ее усовершенствования.

В решении проблемы борьбы с взрывами метана и угольной пыли на больших глубинах выбросоопасных пластов остаются неопределенными механизмы газодинамических явлений, генерации углеводородов угольным веществом, образования и самовоспламенения взрывоопасной среды в горных выработках. Отсутствуют исследования динамики стратифицированных по плотности воздушных потоков, определяющей их диффузионные свойства и процессы выноса вредных примесей. Не учитываются динамические условия движения воздуха и переноса многокомпонентных пылегазовых смесей в горных выработках, осложняющиеся процессами аэродинамического старения выработок. Вследствие этого эффективность вентиляционных потоков часто оказывается недостаточной. Общеизвестны случаи образования опасных слоевых скоплений метана в выработках при среднем удовлетворительном состоянии их вентиляции. В результате несовершенства действующей системы обеспечения взрывобезопасности шахт в Кузбассе ежегодно происходит от 6 до 21 случаев вспышек и взрывов газа и пыли.

В связи с вышеизложенным проблема повышения безопасности горных работ путем комплексного управления пылегазовыделением в очистных и проходческих забоях за счет снижения пылеобразующей способности угля и повышения остаточной газоносности угольного массива и отбитого угля на основе разработки технологических решений по термовлажностной обработке газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ, являются актуальными, имеющими важное народнохозяйственное значение.

Целью работы является теоретическое и экспериментальное обоснование комплексного метода пылегазоподавления при разработке высокогазонос-

ных угольных пластов, опасных по взрывам пыли, путем активного воздействия на угленосный массив газонаполненных растворов ПАВ, обеспечивающего повышение безопасности угледобычи при внедрении высокопроизводительной горной техники в шахтах.

Идея работы заключается в возможности изменения сорбционных характеристик угольного пласта за счет использования механизма замещения газа в сорбционном объеме угля и снижения пылеобразующей способности за счет повышения смачиваемости и равномерности увлажнения при термовлажностной обработке газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Опасность высокогазобильных угольных шахт по взрывам газа и пыли должна оцениваться по всему спектру горючих примесей: метану, тяжелым углеводородам и угольной пыли, одновременно присутствующих в горных выработках.

2. С возрастанием метаноносности угольного пласта и глубины разработки увеличивается содержание тяжелых углеводородов в угле, что повышает взрывопожароопасность угольной пыли. Количество сорбированных пылью тяжелых углеводородов, нелинейно зависит от фракционного состава пыли.

3. Термовлажностная химреагентная обработка угольного пласта обеспечивает управление газовыделением на основе использования установленных закономерностей взаимодействия флюидов системы жидкость – газ с углем. Нелинейные зависимости десорбции углеводородов свидетельствуют о блокировании газов при низких и высоких концентрациях смачивателя.

4. Взаимодействие флюидов системы жидкость – газ с углем при нагнетании в угольный пласт нагретых дисперсионно-подвижных газонаполненных поверхностно-активных сред с высокими смачивающе-связывающими свойствами, обеспечивает перестройку пористо-трещиноватой структуры и связывание пыли за счет термодинамических и поверхностных явлений, протекающих на границах раздела фаз: уголь, жидкость, газ.

5. Газонаполнение растворов поверхностно-активных веществ инертными газами способствует образованию воздушно-механической пены на поверхности трещин при разрушении предварительно увлажненного угольного пласта, что позволяет повысить эффективность связывания пыли при добыче угля.

6. Рациональные параметры воздействия: концентрация смачивателя, удельный расход и температура жидкости, давление газонаполненного раство-

ра, концентрация газа в растворе ПАВ определяются на основе установленных зависимостей пылеобразующей способности угля от концентрации и давления газонаполненного раствора ПАВ и времени контакта угля с раствором.

7. При управлении пылегазовыделением в очистном забое необходимо учитывать наличие динамически активных газов, формирующих стратифицированные по плотности воздушные потоки, и особенности старения горных выработок, приводящие к росту их аэродинамических сопротивлений.

8. Комплексный метод пылегазоподавления, базирующийся на использовании закономерностей аэрогазодинамических процессов в горных выработках и термодинамических, сорбционных и диффузионных процессов в трещиновато-пористой среде, позволяет существенно снизить уровень запыленности и загазованности воздуха, что способствует повышению безопасности работ при использовании высокопроизводительной горной техники.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

представительным объемом лабораторных и натуральных измерений при исследовании динамики запыленности и загазованности воздуха в очистных забоях и вентиляционных штреках выемочных участков шахт (более 22000 измерений);

удовлетворительной сходимостью результатов аналитических исследований сорбционных и прочностных характеристик угля с результатами лабораторных и натуральных экспериментов по снижению загазованности и запыленности воздуха, а также полученными другими авторами (расхождение не превышает 15 - 20%);

высокими значениями показателей тесноты статистической связи в полученных уравнениях регрессии - зависимости пылеобразующей способности угля от концентрации смачивателя и давления газонаполненного раствора ПАВ (коэффициент корреляции не ниже 0,8);

положительными результатами шахтных испытаний термовлажностной химреагентной обработки угольного массива на шахтах «Осинниковская» и «Алардинская» ОАО «ОУК «Южкузбассуголь».

Научная новизна работы заключается в следующем:

установлены закономерности взаимодействия флюидов системы жидкость – газ с углем при термовлажностной обработке угля газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ, определены оптимальные кон-

центрации раствора смачивателя, установлены зависимости десорбции углеводородов;

выявлен механизм тепловлагообменных процессов, протекающих в угольном массиве при термовлажностной обработке угля газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ, главная роль в котором принадлежит диффузионному переносу газов и жидкостей, движущей силой которого является разность концентраций смачивателя и инертного газа, а также температурный градиент;

научно обоснована повышенная взрывопожароопасность угольной пыли в зависимости от фракционного состава пыли и сорбированных ею тяжелых углеводородов, имеющих меньшую по сравнению с метаном температуру воспламенения и большую теплоту сгорания;

установлены рациональные параметры термовлажностной обработки угольного массива газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ: концентрация смачивателя, удельный расход и температура жидкости, давление газонаполненных растворов, концентрация газа в растворе ПАВ, время смачивания, прирост влаги в массиве, стойкость и кратность воздушно-механической пены;

обоснована методика обработки угольного массива газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ, применение которых позволит повысить смачиваемость угля и равномерность распределения нагнетаемой газонаполненной рабочей жидкости в угольном пласте с целью снижения пылевой и газовой опасностей угольных шахт.

Научное значение работы заключается в обосновании технических и технологических решений по комплексному управлению пылегазоподавлением при разработке высокогазоносных угольных пластов, опасных по взрывам пыли, на основе установленных закономерностей взаимодействия флюидов системы жидкость – газ с углем при термовлажностной обработке угля газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ, что позволяет повысить безопасность разработки угольного месторождения.

Практическое значение работы:

разработана и согласована в Ростехнадзоре методика промышленных испытаний обеспыливающей влагохимреагентной тепловой обработки (ВХТО) угольного массива;

разработана методика промышленных испытаний обработки угольного массива газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ;

даны научно обоснованные рекомендации по применению технологии комплексного пылегазоподавления в очистных забоях высокогазообильных выемочных участков угольных шахт, разрабатывающих пласты, опасные по взрывам пыли;

разработана технологическая документация для обработки высокогазонасыщенных угольных пластов газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ в условиях Ленинского района Кузбасса.

Реализация результатов работы. На основе выполненных исследований разработана и согласована в Ростехнадзоре методика промышленных испытаний обеспыливающей влагохимреагентной тепловой обработки (ВХТО) угольного массива (2005 г.); разработана и утверждена методика промышленных испытаний обработки угольного массива газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ (2011 г.). Результаты научных исследований и рекомендации были использованы: при шахтных испытаниях обеспыливающей химреагентной обработки угольного массива на шахтах «Осинниковская» и «Алардинская» ОАО «ОУК «Южкузбассуголь» (2005 г.); в принятой к реализации Технологической части проекта предварительной дегазации пласта «Болдыревский» из подготовительных выработок выемочного участка 24-55 на поле шахты им. С.М. Кирова ОАО «СУЭК-Кузбасс», утвержденного в установленном порядке (2011 г.); при испытаниях технологии обеспыливания горных выработок на полигоне ОБР ВГСЧ России (г. Новомосковск, 2011 г.).

Апробация работы. Основное содержание и отдельные положения работы докладывались на III республиканской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов (Донецк: ВНИИГД, 1982 г.); на Всесоюзной научно-технической конференции (Москва, МГИ, 1988 г.), на 23-й Международной конференции научно-исследовательских институтов по горной безопасности (Вашингтон, 1989 г.); на 2-й международной конференции «Безопасность и экология горных территорий» (Владикавказ, 1995 г.); при чтении лекций в Пекинском технологическом университете (1995 г.); на научных симпозиумах «Неделя горняка» (1999-2011 гг.); на совместных научных семинарах кафедр АОТ и БЖГО, АОТ и ИЗОС (МГГУ, 2009-2011 гг.); на 17-й Международной конференции «ENGINEERING MECHANICS 2011», Svratka, Czech Republic, 9-12 May, 2011; на 2-й Международной конференции «Second IJAS conference at

Cambridge, Massachusetts, proud home of Harvard university. Science and Technology» (May 29- Jun 2, 2011). - Кембридж, 2011.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 42 научные работы, основными из которых являются 28, в том числе 19 статей, опубликованных в научных журналах и изданиях, входящих в перечень ВАК РФ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, содержит список литературы из 193 наименований, 62 рисунка, 32 таблицы и 3 приложения.

Автор выражает благодарность советнику ректора д.т.н., проф. А.П. Дмитриеву, научному консультанту д.т.н. К.С. Коликову, сотрудникам кафедр «Аэрология и охрана труда», «Инженерная защита окружающей среды», «Безопасность жизнедеятельности и гражданская оборона», «Химия» МГГУ: зав. каф., д.т.н., проф. Н.О. Калединой, зав. каф., д.т.н., проф. С.В. Сластунову; зав. каф., д.э.н., проф. В.А. Умнову, д.т.н., проф. Т.А. Харламовой; сотрудникам кафедры «Защита окружающей среды и БЖД» Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе: зав. каф., д.т.н., проф. Н.В. Демину, д.г.-м.н., проф. В.С. Лебедеву; д.т.н., проф. С.В. Иляхину; сотрудникам кафедры «Экологическая химия и технология» Дагестанского государственного университета: зав. каф., д.т.н., проф. З.М. Алиеву; инженерно-техническим работникам шахты «Осинниковская» ОАО «ОУК «Южкузбассуголь» и шахты им. С.М. Кирова ОАО «СУЭК-Кузбасс» за содействие и методическую помощь при выполнении работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

За последние годы на высокопроизводительных шахтах России происходили катастрофические взрывы метана и угольной пыли, сопровождавшиеся экзогенными пожарами: шахта им. Шевякова (Кузбасс, 1992 г.), «Воркутинская» (Печорский бассейн, 1995 г.), «Баренцбург» (о. Шпицберген, 1996 г.), «Зыряновская» (Кузбасс, 1997 г.), «Центральная» (Печорский бассейн, 1998 г.), «Юбилейная» (Кузбасс, 2007 г.), «Ульяновская» (Кузбасс, 2007 г.), «Распадская» (Кузбасс, 2010 г.) и др. При этом аварии носили комплексный характер, т.е. в них реализовывалось несколько опасных факторов: газ, пыль и пожар, тогда как в системе профилактики взрывов основной акцент сделан на метан.

На угольных шахтах России очистные забои, оборудованные современной выемочной техникой, способны по технической характеристике добывать

10-15 тыс. т угля в сутки и более. Однако обильное метановыделение из обрабатываемых высокогазоносных пластов угля и высокая запыленность выработок сдерживают возможности угледобывающей техники, что существенно влияет на рентабельность подземной угледобычи.

Дегазация угольных пластов и управление газовыделением, имеющие целью предотвратить опасность загазирования выработок, повышают эндогенную пожароопасность и увеличивают пылеобразующую способность угля и запыленность воздуха в шахтах. Предварительное физико-механическое воздействие на пласт при дегазации приводит, как правило, к повышению склонности угля к самовозгоранию, а использование способов управления газовыделением с помощью дренажных штреков и отсоса метановоздушной смеси из выработанного пространства – к усилению проветривания выработанного пространства и интенсификации окислительных процессов, являющихся причиной самовозгорания угля. Следовательно, профилактические меры различных опасных явлений должны быть комплексными.

Исходя из анализа общего состояния данных проблем, теоретических и экспериментальных исследований в указанных областях и в соответствии с поставленной в диссертации целью осуществлялось решение ряда задач, основными из которых являются:

- анализ состояния проблемы борьбы с пылегазовоздушными смесями в угольных шахтах; исследование состава и количества углеводородных газов угольных пластов и угольной пыли как показателей газовой и пылевой опасностей угольных шахт;

- установление причин и механизма образования пылегазоопасных зон на выемочных участках угольных шахт на основе анализа структуры газового и пылевого балансов призабойного пространства лавы при существующих технологических схемах проветривания выемочных участков;

- выявление закономерностей взаимодействия флюидов системы жидкость – газ с углем при термовлажностной обработке угольного массива газонаполненными растворами ПАВ для разработки комплексного метода снижения пылевой и газовой опасностей выемочного участка;

- разработка комплексного метода пылегазоподавления при добыче угля, технологии и методики расчета рациональных параметров комплексного пылегазоподавления при разработке высокогазоносных угольных пластов;

- разработка рекомендаций по практической реализации комплексного метода снижения пылевой и газовой опасностей в угольных шахтах.

Основоположником научной школы рудничной аэрологии является выдающийся ученый – академик А. А. Скочинский. В области исследования осредненного движения воздуха в горных выработках можно считать решенными вопросы аэродинамического сопротивления (работы Ф.А. Абрамова, В.Н. Воронина, Л.Д. Ворониной, В.Б. Комарова, А.И. Ксенофонтовой, П.И. Мустеля и др.). Процессы диффузии газов в выработках и выработанных пространствах исследовались Ф.А. Абрамовым, А.И. Бобровым, В.А. Бойко, В.Н. Ворониным, Н.О. Калединой, А.И. Ксенофонтовой И.И. Медведевым, И.М. Местером, Л.А. Пучковым, В.В. Скобуновым, Р.Б. Тяном, Н.И. Устиновым, А.С. Цырюльниковым, П. Бэкке и др.

Теория и практика исследования фильтрационных движений в шахтах получили достаточно большое развитие в работах Н.М. Качурина, Ф.С. Клебанова, А.Ф. Милетича, М.А. Патрушева, И.М. Печука, К.З. Ушакова и др. Решением проблем слоевых скоплений метана занимались А. И. Бобров, А.Л. Сурков, К.З.Ушаков, М.А.Фролов, С.Дж. Лич, Д.С. Тернер, Т. Х. Эллисон и др.

Современные представления о газодинамических процессах в угленосной толще обоснованы и развиты в трудах А.Т. Айруни, С.К. Баймухаметова, Ю.Ф. Васючкова, А.В. Джигрина, В.С. Забурдяева, Г.Д. Лидина, К.С. Коликова, В.Н. Королевой, В.А. Малашкиной, Н.Г. Матвиенко, В.И. Мурашова, В.Н. Пузырева, А.Д. Рубана, К.Н. Трубецкого, Н.В. Ножкина, И.В. Сергеева, С.В. Сластунова, Б.Д. Терентьева, В.В. Ходота, И.Л. Эттингера, С.А. Ярунина и др.

Решением проблем борьбы с пылью в угольных шахтах занимались ученые: А.С. Бурчаков, В.Н. Воронин, Л.Д. Воронина, Н.Ф. Гращенков, Г.С. Гродель, В.И. Дремов, С.Ю. Ерохин, В.П. Журавлев, Г.С. Забурдяев, И.Г. Ищук, Б.Ф. Кирин, В.В. Кудряшов, Л.Я. Лихачев, М.И. Нецепляев, Е.И. Онтин, Г.Е. Панов, А.Е. Пережилов, П.М. Петрухин, С.Н. Подображин, Г.А. Поздняков, В.В. Ткачев, А.А. Трубицын, А.В. Трубицын, Н.В. Трубицына, М.И. Феськов, М.А. Фролов, М.К. Шуринова, В. Кортней, Л. Манделл, Р. Сальман, В.Дж. Томас и др.

В Российской Федерации из 105 действующих угольных шахт 82 отнесены к метанообильным, в их числе 50 шахт III категории, сверхкатегорных и

опасных по внезапным выбросам угля и газа. В 2009 г. с применением дегазации работали около 20% шахт.

Уровень запыленности практически по всем угольным шахтам значительно превышает предельно допустимые концентрации, а применяемые способы и средства пылеподавления малоэффективны и не являются составной частью технологических процессов, в связи с чем пылевая опасность остается крайне высокой. Проводимый в настоящее время на шахтах контроль запыленности рудничной атмосферы и пылевзрывоопасности горных выработок также не обеспечивает необходимой надежности.

В угольных шахтах увеличение пылеобразования связано дополнительно с тем, что: все применяемые системы разработки предполагают обнажение угольного пласта на всей площади отработки; угольная пыль обладает высокой витаемостью и низкой смачиваемостью; интенсивное проветривание вызывает захват большого количества пыли турбулентным воздушным потоком; рост энерговооруженности при механическом отделении и дроблении горных пород (угля) непосредственно в активно проветриваемом рабочем пространстве горных выработок приводит к непрерывному интенсивному запылению атмосферы горных выработок на всем их протяжении.

Комплексное обеспыливание воздуха в очистных и проходческих забоях угольных шахт предусматривает предупреждение пылеобразования и подавление выделившейся в процессе работы комбайна пыли. К первым относятся совершенствование горных машин по пылевому фактору и профилактическая обработка угольного массива нагнетанием в пласт жидкостей. Ко вторым – обеспыливающее проветривание, различные способы орошения и пылеулавливание.

Одним из наиболее распространенных на угольных шахтах России методов предупреждения пылеобразования является профилактическая обработка угольных пластов жидкостями. В настоящее время разработаны, испытаны и внедрены различные технологические схемы и средства нагнетания жидкости. Однако существующие технологические схемы и оборудование не обеспечивают требуемой эффективности увлажнения.

Причинами образования взрывоопасной метановоздушной среды являются высокая природная газоносность и, следовательно, высокое пластовое давление, что при поверхности обнажения угленосной толщи во всей сети горных выработок, измеряемой десятками квадратных километров, предопределяет значительное газовыделение, несмотря на низкую газопроницаемость уголь-

ных пластов и вмещающих пород. На глубинах 700 -1000 м природная газоносность угольных пластов достигает 25-30 м³/т. Пиковое газовыделение, фиксируемое при определении категорийности шахт, достигает 120 – 160 м³ на 1 т добычи.

В угольных шахтах воспламенение метано- и пылевоздушной смеси происходит в основном от теплового импульса, создаваемого взрывными работами, электрическим током и фрикционным искрением. Для предупреждения фрикционного искрения пока не найдены надежные технические решения. Самовозгорание также не всегда может быть предсказано и выявлено с необходимой точностью. Все другие источники теплового импульса технически устранимы. Их наличие во многих случаях является результатом нарушений технологической дисциплины персоналом.

Анализ статистических данных за последние годы в целом показывает что в Кузбассе ежегодно происходит от 6 до 21 случаев вспышек газа и пыли, в том числе взрывов, количество погибших человек составляет в среднем 30 чел/год. Средний ущерб от аварий по вспышкам газа и пыли, в том числе взрывам, составляет 405200 тыс. руб/год.

Распределение взрывов метанопылевоздушных смесей по местам происшествий следующее: в очистных забоях – 20% случаев; в подготовительных – 51,4%; в прочих действующих выработках – 14,2%; в выработанных пространствах – 11,4%; в подземных скважинах – 2,8% .

Таким образом, рассмотрение причин образования взрывоопасной среды в горных выработках показывает, что мероприятия пылегазового режима должны быть направлены на изменение свойств и состояния продуктивной толщи, особенно разрабатываемого пласта или залежи, с целью уменьшения отрицательных их проявлений, т.е. подготовку месторождения к безопасной разработке; а также на проведение технических мероприятий в шахте по пылегазоподавлению.

Основные технологические процессы по добыче угля подземным способом связаны с образованием большого количества пыли. Пылеобразующая способность угля зависит от его вещественного состава, степени метаморфизма, влажности, крепости, наличия минеральных включений и степени перемятости (в зоне геологических нарушений), что влияет на запыленность воздуха в очистных и проходческих забоях при разработке угольных пластов. При увеличении крепости угля возрастают удельные энергозатраты на его разрушение, что

ведет к дополнительному переизмельчению угля и выделению тонкой пыли. При выемке угля комбайнами с увеличением коэффициента крепости с 0,6 до 1,4 запыленность воздуха увеличивается, например в Кузбассе, в 3 раза. С повышением содержания различного вида влаги значительно уменьшается склонность угля к пылеобразованию. С увеличением естественной влажности угля с 1,5 до 8% запыленность воздуха снижается в Кузбассе в 9 раз. По данным каталога шахтопластов Кузнецкого, Донецкого, Подмосковного бассейнов построен график зависимости пластовой влажности угля и удельного пылевыделения от выхода летучих веществ (рис. 1).

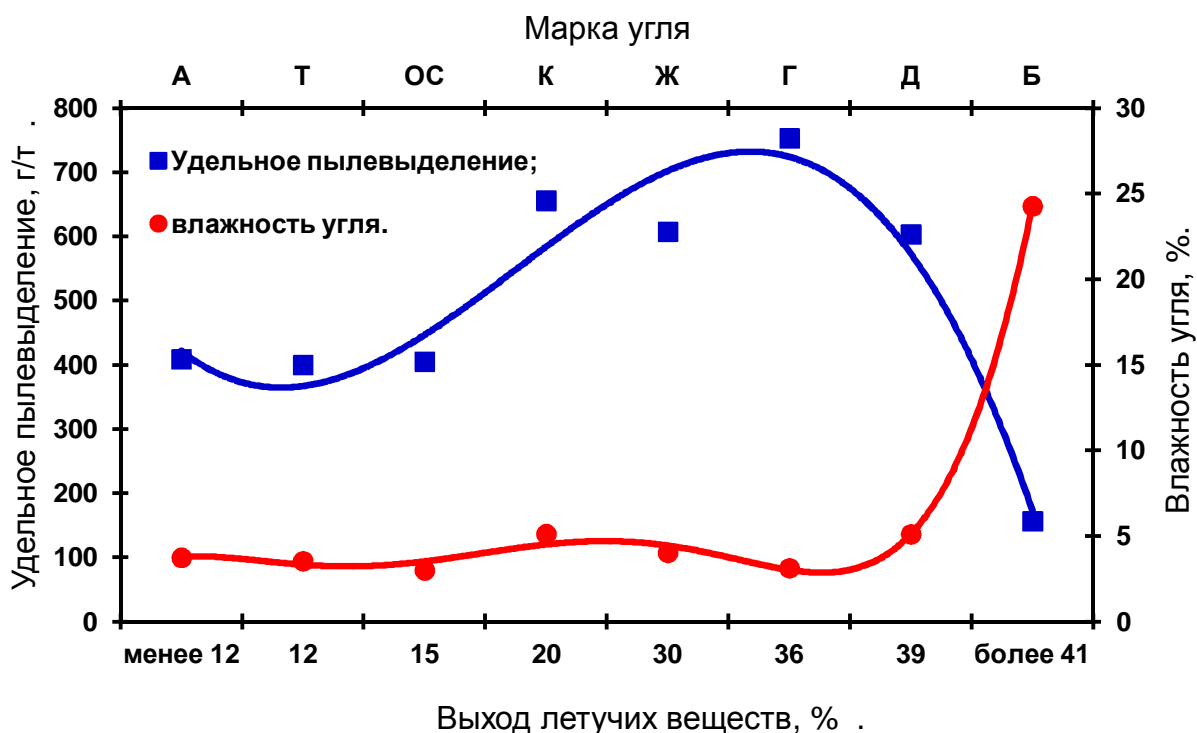


Рис. 1. Изменения удельного пылевыделения и влажности угля в ряду метаморфизма Кузнецкого, Донецкого, Подмосковного бассейнов

Из полученных данных следует, что на участке средней стадии метаморфизма (*ОС, К, Ж, Г*) уровень удельного пылевыделения остается весьма высоким. При переходе к длиннопламенным (*Д*) и бурым (*Б*) углям (низкая стадия метаморфизма) удельное пылевыделение резко падает.

Изучение опыта применения предварительного увлажнения угля в массиве позволило установить, что основными причинами недостаточной эффективности метода являются: низкая смачиваемость угля, а также неравномерность распределения нагнетаемой жидкости в пласте.

Для связывания пыли в массиве и, следовательно, снижения пылеобразования необходимо повысить смачиваемость угля за счет введения в воду

ПАВ, подать в массив достаточное количество воды на тонну угля, повысить равномерность увлажнения массива за счет переноса влаги от магистральных трещин к периферии. Последнее достигается за счет капиллярного впитывания жидкости в узкие трещины и поры, перемещения влаги в направлении температурного градиента и градиента концентрации смачивателя. Однако, если эффективность взаимодействия жидкости с углём будет высокой, а пласт будет увлажнен неравномерно, то остаточная запыленность воздуха будет оставаться высокой.

Исследования процесса увлажнения угольного пласта как способа пылеподавления показали, что удельный расход жидкости является основным параметром. Из анализа литературных источников следует, что при малых удельных расходах жидкости q (от 0 до 5 л/т) кратность снижения запыленности воздуха относительно слабо растет с их увеличением. Затем идет интенсивное возрастание и, начиная с $q = 30$ л/т, изменение концентрации пыли с ростом удельного расхода замедляется, приближаясь к некоторой постоянной величине. Обычно эту величину принимают за остаточную запыленность воздуха, которая обусловлена неравномерностью увлажнения массива угля, даже при очень больших удельных расходах жидкости и разрушении кусков угля, куда вода не могла проникнуть. Таким образом, рациональный удельный расход жидкости лежит в пределах 25 - 35 л/т.

Внутри влажного материала под действием температурного градиента влага перемещается от нагретой части к холодной. Перемещение влаги в материале под действием температурного градиента может происходить как в виде жидкости, так и в виде пара. Наиболее интенсивно процессы термовлагопереноса протекают, когда поры не полностью заполнены влагой и в достаточной мере развита поверхность раздела жидкость – газ. Если жидкость, находящаяся в капилляре, на концах имеет разную температуру, то поверхностное натяжение на холодной стороне больше, чем на теплой. Соответственно давление на холодной стороне будет меньше, и жидкость будет перемещаться к холодному концу капилляра.

В работах проф. В.В. Кудряшова показано, что эффективность метода резко возрастает с повышением температуры жидкости (раствора) до 20 °С, а затем при температуре 30 °С и выше рост эффективности замедляется. Повышение температуры с +10 °С до +20÷30 °С позволило повысить эффективность термовлажностной химреагентной обработки угля в 2-2,5 раза.

Вязкость жидкости очень сильно зависит от температуры. Вязкость воды например, уменьшается в 2 раза при нагреве с 10 до 40 °С. Отсюда скорость и равномерность пропитки массива возрастут с повышением температуры жидкости.

Чтобы увеличить отрицательное давление над вогнутой поверхностью, перемещающей жидкость в трещинах, а также, чтобы увеличить скорость движения воды в трещинах – скорость пропитки угольного пласта, необходимо уменьшить поверхностное натяжение на границе раздела твердое тело – жидкость $\sigma_{ТЖ}$. Уменьшить $\sigma_{ТЖ}$ можно введением смачивающих добавок – поверхностно-активных веществ (ПАВ). Использование ПАВ необходимо потому, что уголь по природе – вещество, плохо смачиваемое водой, особенно в области средней стадии метаморфизма. Добавление смачивателя к воде повышает эффективность увлажнения до 1,5 раз и снижает коэффициент крепости угля в 1,8 раз.

Для повышения равномерности и эффективности увлажнения угольного массива предлагается использовать для нагнетания в массив газонаполненные растворы поверхностно-активных веществ. В процессе предварительного увлажнения угольных пластов нарушается равновесное состояние в системе уголь – метан. Фактическое замещение метана жидкостью зависит от скорости движения жидкости по порам и трещинам.

Вытеснение (замещение) метана жидкостью в поровом и трещинном объеме возможно при следующих видах переноса жидкости в угле: вязком течении за счет градиентов внешних и капиллярных давлений в порах и трещинах; растекания по стенкам пор и трещин за счет физико-химических сил взаимодействия жидкости с углем; объемной (нормальной) диффузии молекул жидкости в газовой смеси с метаном в поровом пространстве угля под действием градиента концентраций или температур; молекулярной (кнудсеновской) диффузии; поверхностной диффузии молекул воды или другой жидкости по стенкам капилляров и трещин; капиллярной конденсации в микропорах.

В процессе вязкого течения происходит «поршневое» вытеснение метана из трещин. Скорость течения определяется геометрическими размерами канала, градиентом давлений и вязкостью жидкости. Взаимодействие жидкости с углем в данном случае несущественно. В остальных видах переноса скорость процес-

са определяется в значительной степени взаимодействием поверхности угля с нагнетаемой жидкостью.

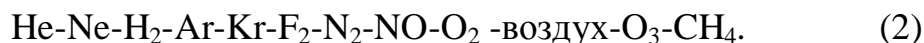
Под воздействием давления жидкости свободный газ вытесняется из крупных трещин и пор в более мелкие, где газ находится в сорбированном и в свободном состоянии.

В каждый момент времени функция распределения давления (P) в жидкости будет удовлетворять уравнению фильтрации капельной жидкости

$$\operatorname{div}[K \operatorname{grad} P(x, y, z, t)] = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 0, \quad (1)$$

где $K(x, y, z)$ – проницаемость.

Интенсификация выделения газа из сорбционного объема угля с использованием механизма замещения термодинамически возможна при обработке пласта такими веществами, которые являются более термодинамически стабильными по отношению к данному газу. В соответствии с термодинамической закономерностью, установленной проф. Ю.Ф. Васючковым, вещества по замещающей способности располагаются в ряд:



Чем больше термодинамическая стабильность, тем больше сорбция вещества при одних и тех же условиях. Газы, способные замещать метан, находятся левее его в ряду (2).

Увлажнение угольного массива газонаполненными растворами сопровождается совместным движением двух фаз по капиллярам. По структуре смеси режим течения в капилляре можно определить как пузырьковый режим, который имеет место при малых газосодержаниях потока и характеризуется движением газа в виде отдельных, малых по сравнению с радиусом капилляра, пузырей.

Законы движения газонаполненных растворов сложнее законов движения однородных жидкостей в трубах и изучены хуже. Если при движении однофазного потока приходится иметь дело с одним опытным коэффициентом трения, то при движении двухфазного потока газонаполненных растворов ПАВ приходится прибегать к нескольким опытным характеристикам потока, которые в свою очередь зависят от разнообразных условий движения.

Рассмотрим простую линейную систему движения газонаполненного раствора. При продвижении фронта воды в пласте примем поршневое вытесне-

ние газа водой. В области, занятой водой и газом, течение описывается уравнением Лапласа, которое в рассматриваемом случае линейного течения имеет вид

$$\frac{d^2 P}{dx^2} = 0, \quad (3)$$

где P – давление на границе раздела газ – вода.

Градиент давления

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{P_3 - P_{пл}}{L}, \quad (4)$$

где P_3 – давление на забое скважины, МПа; $P_{пл}$ – пластовое давление на границе контура питания, МПа; L – длина трещины, м.

На перемещающейся границе при $x=L$ будет соблюдаться динамическое условие

$$-m \frac{dl}{dt} = \frac{K}{\mu_{газ}} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{x=L} = \frac{K}{\mu_{вода}} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{x=L}, \quad (5)$$

где l – протяженность трещины, заполненной газом, м; K – проницаемость пористой среды, m^2 ; μ – вязкость текучего, Па·с; m – фильтрующий объем пор, m^3 .

Закачиваемый в пласт под высоким давлением газонаполненный раствор ПАВ, перемещаясь по трещинам и макропорам, будет увеличивать их гидропроводимость, вытеснять и блокировать находящийся в них свободный метан. После прекращения закачки газонаполненного раствора ПАВ и снятия давления с поверхности скважин заблокированные жидкостью метан и инертный газ оказываются под воздействием капиллярных сил. Капиллярная пропитка является функцией давления, которая для одного капилляра определяется формулой Лапласа

$$P_k = \frac{2\sigma}{r_k} \cos\theta, \quad (6)$$

где P_k – капиллярное давление, Н/м²; σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м; r_k – радиус капилляра, м; θ – краевой угол смачивания, град.

Для проникновения смачивающей жидкости в микропористую структуру угля необходимо, чтобы капиллярное давление превышало пластовое. При этом возможны две схемы движения жидкости:

- 1) жидкость из фильтрующего объема проникает в «тупиковую» или «открытую» пору постоянного сечения;
- 2) жидкость попадает в «открытую» пору переменного сечения.

При первой схеме газ сжимается жидкостью до давления поверхностного натяжения в газовый пузырек, а при второй – передвигается по поре в сторо-

ну уменьшения ее сечения. Уменьшение радиуса поры на границе раздела фаз вызывает уменьшение радиуса кривизны и создание добавочного давления поверхностного натяжения, направленного в сторону уменьшения радиуса поры.

Величина добавочного давления поверхностного натяжения, способствующего вытеснению газа из поры, рассчитывается по формуле

$$\Delta P_k = P_{k1} - P'_{k2} = \sigma \left(\frac{1}{R_2'} - \frac{1}{R_1} \right), \quad (7)$$

где R_1, R_2' – радиусы кривизны на границе раздела фаз газ – жидкость, м; P_{k1} – давление поверхностного натяжения жидкости со стороны большего сечения поры, Па; P'_{k2} – давление поверхностного натяжения жидкости со стороны меньшего сечения поры, Па. Действительно, в случае уменьшения радиуса поры нижеприведенное выражение будет больше нуля:

$$\frac{1}{R_2'} - \frac{1}{R_1} > 0, \quad (8)$$

и, следовательно, избыток давления поверхностного натяжения вытесняет газ в сторону меньшего сечения поры. При равенстве

$$R_1 = R_2' \implies \Delta P_k = 0, \quad (9)$$

которое соответствует положению газового пузырька в цилиндрической поре постоянного диаметра, добавочное давление $\Delta P_k=0$ и газовый пузырек блокируется в поре жидкостью.

Диффузионный перенос, характерный как для газов, так и для компонентов жидких растворов, является преобладающим в процессах увлажнения угля при термовлажностной обработке газонаполненными растворами ПАВ, при этом движущей силой является разность концентраций смачивателя и инертного газа, а также температурный градиент.

Динамика влагонасыщения угля, поверхностного натяжения и вязкости рабочей жидкости, пылеобразующей способности угля, десорбции сорбированных газов при термовлажностной химреагентной обработке угля изучалась на основе лабораторных исследований. В качестве рабочих жидкостей для увлажнения образцов угля в режиме капиллярного насыщения использовали воду и водные растворы смачивателей «Неолас» и ДБ. Исследовалось влияние температуры рабочей жидкости на процессы влагонасыщения угля. При этом сравнивались значения влагосодержания угля при обработке его чистой водой и растворами смачивателя «Неолас» разных концентраций (0,15%, 0,5%, 1,0%, 3%) и при разных температурах (20 °С, 40 °С, 60 °С).

Исследования показали, что кинетика адсорбционного и капиллярного насыщения для одних и тех же углей пластов К-1, Е-5 различна при разной температуре раствора смачивателя. Максимальное влагонасыщение исследуемых образцов угля наблюдалось при температуре 40 °С. При этом значение коэффициента влагонасыщения составило 4,1%, что в 1,5 раза больше значения этого же коэффициента при температуре 20 °С и в 1,6 раза больше, чем при температуре 60 °С.

Кроме этого, были проведены измерения поверхностного натяжения рабочей жидкости с различной концентрацией смачивателя «Неолас» методом отрыва капель. Наибольший эффект снижения поверхностного натяжения наблюдался на интервале концентраций 0,05÷0,2% (почти 2,1 раза по сравнению с поверхностным натяжением воды).

Исследовалась кинематическая вязкость чистой воды и рабочего раствора со следующими концентрациями смачивателя «Неолас»,%: 0,05; 0,15; 0,2; 0,3; 0,5; 0,7; 1,0 при температурах этих растворов 20 °С и 40 °С. Коэффициент кинематической вязкости водного раствора «Неоласа» с концентрациями от 0,05 до 1,0% при температуре 20 °С находился в пределах 0,788÷1,033 мм²/с; при температуре 40 °С – 0,788÷0,833 мм²/с. Наибольшее снижение коэффициента кинематической вязкости наблюдалось для чистой воды при нагревании от 20 до 40 °С и составило почти 20%.

Для определения оптимальной концентрации смачивателя в рабочей жидкости при увлажнении угля был выполнен хроматографический анализ неувлажненных образцов угля пласта Е-5 (марка Ж, угольный пласт кольчугинской серии пермского возраста, Кузбасс) и образцов угля этого же пласта, обработанных химреагентным способом при температурах 25 и 60 °С.

Графические характеристики процесса десорбции газов из угля, обработанного при температуре 25 °С (рис. 2) имеют вид параболы с оптимальной концентрацией раствора смачивателя, равной 0,5÷0,6%, при которой остаточная газоносность для всех трех исследуемых газов является минимальной по сравнению с чистой водой и концентрацией смачивателя 1%. Следовательно, для чистой воды и 1%-ной концентрации смачивателя наблюдается блокирование углеводородных газов рабочей жидкостью, в результате чего остаточная газоносность угля повышается по отношению к необработанному углю.

Представленные на рис. 2 графики десорбции углеводородов относительно их количества в необработанном образце угля аппроксимируются следующими зависимостями соответственно для метана, этана, пропана:

$$\frac{I}{I_0} = 4,989 \cdot C^2 - 4,757 \cdot C + 1,812; \quad (10)$$

$$\frac{I}{I_0} = 3,544 \cdot C^2 - 3,531 \cdot C + 1,306; \quad (11)$$

$$\frac{I}{I_0} = 3,605 \cdot C^2 - 3,453 \cdot C + 1,166, \quad (12)$$

где I – количество десорбированного газа из угля, увлажнённого раствором смачивателя, см³/кг; I_0 – количество десорбированного газа из необработанного угля, см³/кг; C – концентрация смачивателя, %.

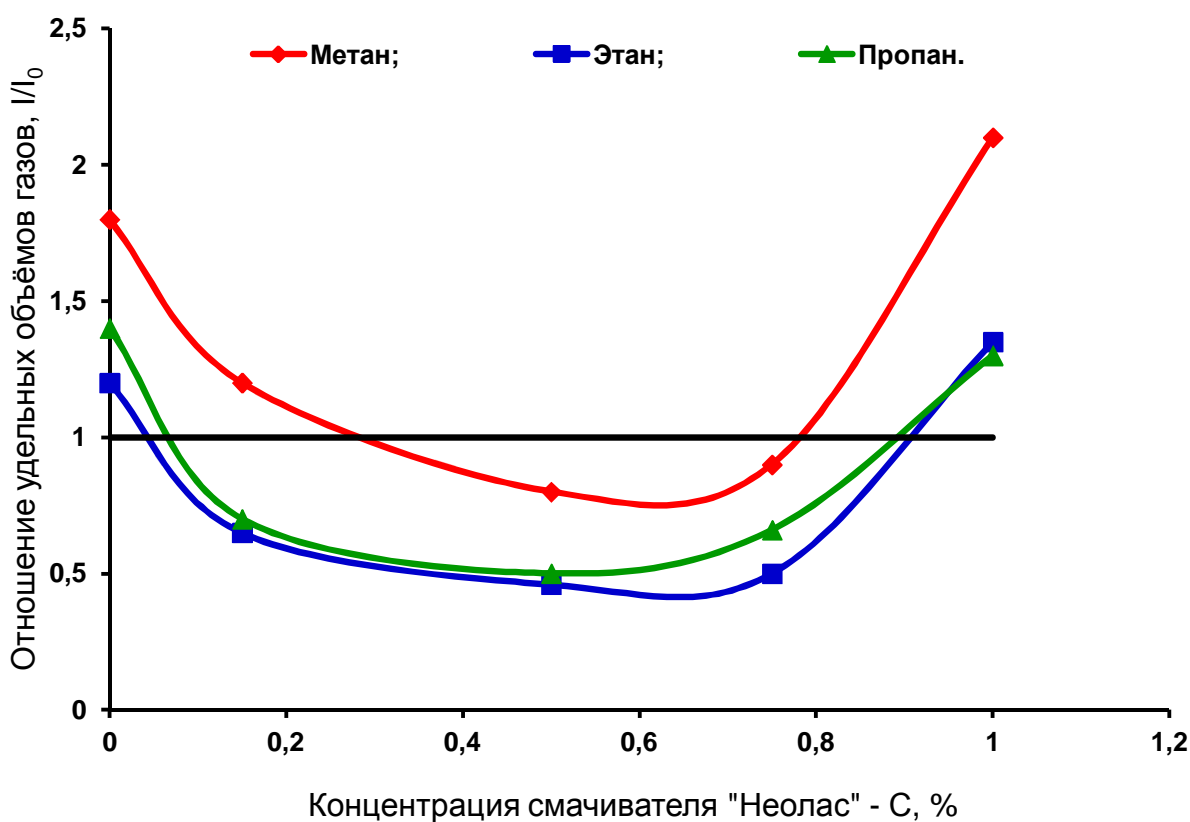


Рис. 2. Десорбция газов угля, увлажненного при температуре 25 °С

На рис. 3 приведены аналогичные графики для угля, обработанного при температуре 60 °С. Результаты существенно отличаются тем, что при температуре обработки 60 °С для всех концентраций смачивателя остаточная газоносность угля почти для всех углеводородных газов уменьшилась по сравнению с необработанным углем.

Графики отношений удельных объемов десорбированного газа из угля после термовлажностной химреагентной обработки при температуре 60 °С и до

обработки, представленные на рис. 3, хорошо аппроксимируются полиномом четвертой степени соответственно для метана, этана, пропана:

$$\frac{I}{I_0} = -18,26 \cdot C^4 + 33,806 \cdot C^3 - 19,133 \cdot C^2 + 3,838 \cdot C + 0,55 \quad (13)$$

$$\frac{I}{I_0} = -12,495 \cdot C^4 + 22,408 \cdot C^3 - 11,785 \cdot C^2 + 1,972 \cdot C + 0,6; \quad (14)$$

$$\frac{I}{I_0} = -6,505 \cdot C^4 + 10,529 \cdot C^3 - 4,0499 \cdot C^2 + 0,126 \cdot C + 0,6. \quad (15)$$

Из приведенных результатов можно сделать вывод, что для смачивания угля лучше всего выбирать концентрации смачивателя от 0,15 до 0,5% при температуре обработки до 25 °С.

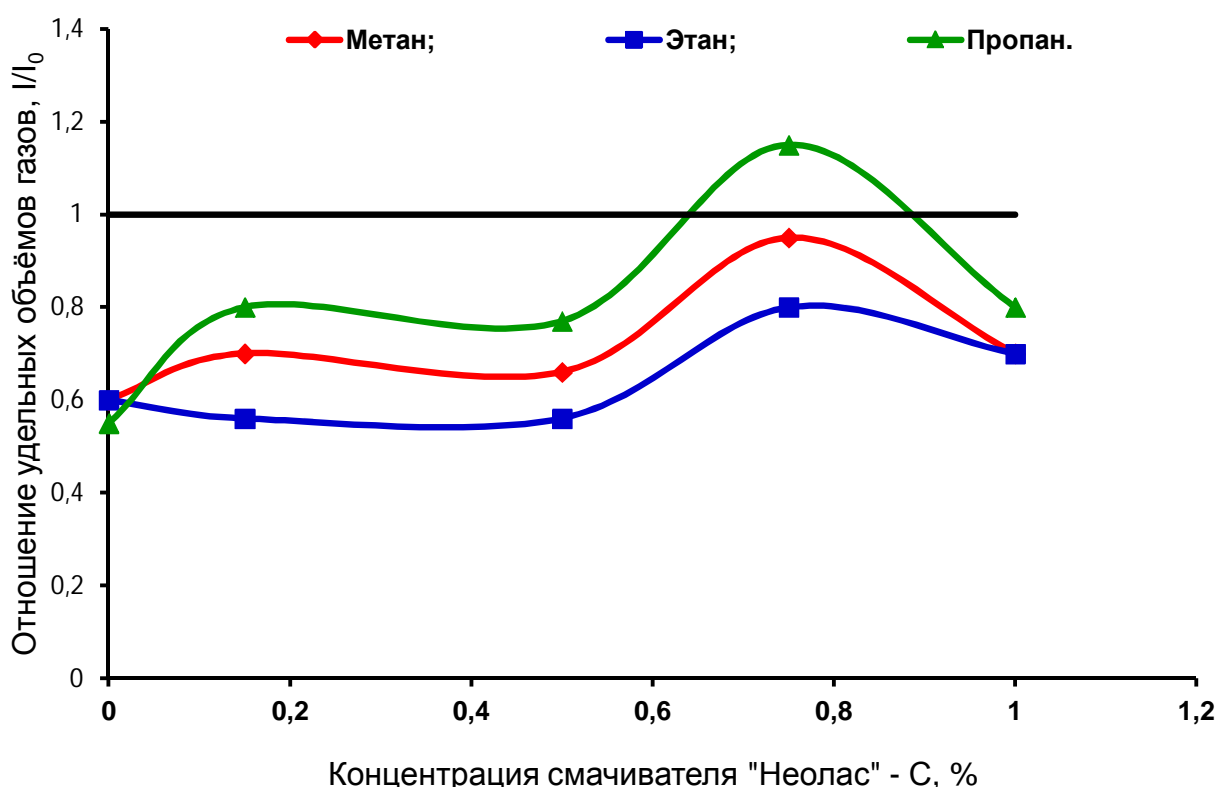


Рис. 3. Десорбция газов угля, увлажненного при температуре 60 °С

Для оценки пылеобразующей способности угольных пластов необходимо знать закономерности образования гранулометрического состава разрушенного угля. За критерий оценки эффективности различных жидкостей в режиме капиллярного насыщения угля был принят выход тонкодисперсной пыли при постоянной энергоёмкости процессов разрушения. Навески угля подвергали толчению в копре методом сбрасывания груза, затем просеивали через сита с целью определения гранулометрического состава продуктов разрушения. Из анализа полученных данных следует, что выход пыли размером менее 0,07 мм в

образце угля, обработанном раствором с концентрацией смачивателя 0,2%, уменьшился в 2,19 раз по сравнению с образцом, обработанным чистой водой, и уменьшился в 1,96 раза по сравнению с образцом, обработанным раствором с концентрацией 0,05%. При этом выход пылевых фракций размером 0,07÷0,25 мм уменьшился в 1,88 раза.

Рассчитанные значения пылеобразующей способности угля (ρ) при увлажнении чистой водой и раствором смачивателя (рис. 4) с концентрациями, %: 0,05; 0,2; 0,5; 0,7; 1,0 хорошо аппроксимируются полиномом третьей степени

$$\rho(C) = 10^{-5} \cdot C^3 + 0,0014 \cdot C^2 - 0,012 \cdot C + 0,0378. \quad (16)$$



Рис. 4. Зависимость пылеобразующей способности угля от концентрации смачивателя

Таким образом, пылеобразующая способность угля имеет минимальное значение в интервале концентраций смачивателя 0,2 – 0,6%, после чего с ростом концентрации смачивателя пылеобразующая способность угля увеличивается.

Вспененная жидкость обладает меньшей вязкостью и большей проникающей способностью в мельчайшие поры и трещины, что повышает равномерность и качество увлажнения угля. В лабораторных условиях с использованием автоклава исследовались процессы увлажнения угля газонаполненными растворами ПАВ. Исследовался уголь пласта Е-5, марки Ж; масса кусков угля составляла около 40 г. Объем автоклава - 1000 мл, объем раствора смачивателя – 100 мл. Увлажнение производили при следующих давлениях азота, МПа: 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0. Концентрации смачивателя составляли, %: 0; 0,5, 1,0.

По рассчитанным коэффициентам влагонасыщения были построены графики зависимости коэффициента влагонасыщения от давления азота (рис.5). Графики представлены линейной зависимостью, которая может быть аппроксимирована уравнением:

$$k_w = k \cdot P + b, \quad (17)$$

где P – давление азота, МПа; k –коэффициент пропорциональности, b – константа.

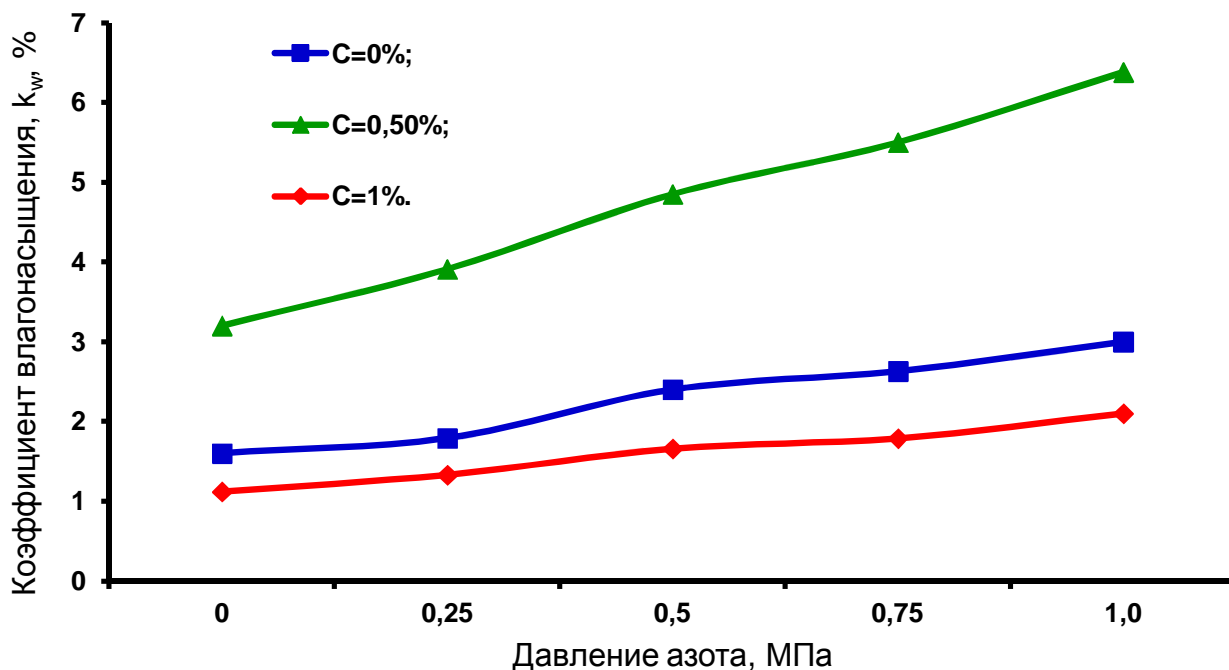


Рис. 5. Зависимость коэффициента влагонасыщения угля от давления азота

Максимальное приращение влажности составляет 6,38%, при концентрации смачивателя 0,5% и давлении азота 1,0 МПа. Рассчитаны значения коэффициентов влагонасыщения k_w в зависимости от давления азота. Анализ расчетных данных показывает, что рекомендуемыми параметрами при увлажнении газонаполненными растворами ПАВ являются концентрации ПАВ 0,2÷0,5% и давления азота 1,0÷2,0 МПа. Коэффициент пропорциональности k , позволяющий определять необходимое давление азота для получения требуемого прироста влажности угля, для чистой воды равен 1,4; $b=1,6$; для концентрации смачивателя 0,5% $k=3,18$; $b=3,2$; для концентрации смачивателя 1,0% $k=0,98$; $b=1,12$.

Установлено, что увлажнение угля газонаполненными растворами ПАВ с концентрацией смачивателя 0,5% по сравнению с концентрацией 1% увели-

чивает сорбционную способность угля в отношении ПАВ в среднем на 4%, что равносильно увеличению давления азота с 0 до 1,0 МПа.

Эффективность обеспыливающей обработки угольного массива газонаполненными растворами ПАВ обусловлена снижением пылеобразующей способности угля и повышением эффективности пылеулавливания при отбойке угля за счет воздушно-механической пены, формируемой как в микротрещинах угольного массива, так и при его отбойке на поверхности отбитого угля. Благодаря применению технологии обработки угля газонаполненными растворами ПАВ (ОГНР) происходит равномерная пропитка угольного пласта.

Пылеобразующая способность угля, обработанного газонаполненными растворами чистой воды и с концентрацией смачивателя 0,5% при давлениях, МПа: 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0 (рис. 6), хорошо аппроксимируется линейными функциями

$$\rho(P)_{c=0\%} = -0,001 \cdot P + 0,030; \quad (18)$$

$$\rho(P)_{c=0,5\%} = -0,002 \cdot P + 0,014. \quad (19)$$

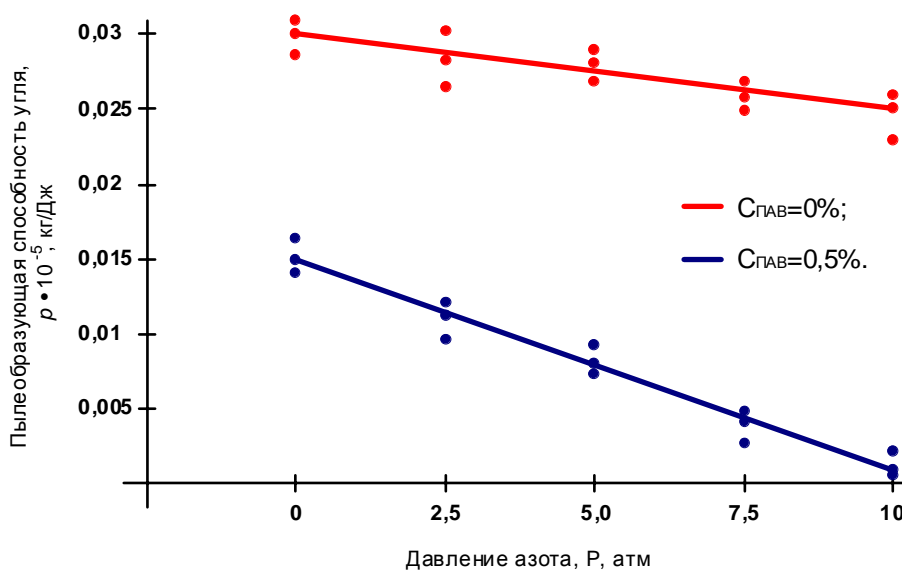


Рис. 6. Зависимость пылеобразующей способности угля от давления газа

Безопасность работ на газовых шахтах существенным образом зависит от концентрации метана в рудничной атмосфере, которая строго нормируется Правилами безопасности. Присутствие в рудничной атмосфере гомологов метана создает повышенную опасность, так как эти газы образуют взрывчатые смеси с воздухом при более низких концентрациях, чем метан, и, кроме того, являются высокотоксичными веществами. Пределы взрываемости в смеси с воздухом составляют, например, для этана 3,2-2,5%, для пропана 2,4-9,5% и для

бутана 1,9-8,4%. Однако в Правилах безопасности угольных шахт до настоящего времени не установлены значения предельно-допустимых концентраций в воздухе для гомологов метана.

Минимальное содержание в смеси (%) нескольких близких по составу горючих компонентов (например, метана, этана, водорода и др.), при котором смесь взрывается, определяется по формуле Ле Шателье. Расчеты, выполненные по этой формуле показывают, что наличие бутана в рудничном воздухе от 10 до 20%, может снизить концентрационный предел взрываемости газоздушнoй смеси от 4,2 до 3,7%.

Тяжелые углеводороды наряду с метаном входят в состав газов угленосных отложений. В процессе углефикации генерируется огромное количество газов, преимущественно углеводородов. Как известно, ископаемые угли относятся к своеобразному классу природных сорбентов, которые получили название «молекулярных сит». Для них характерна пористая структура с преобладанием главным образом микропор диаметром 1,0-1,5 нм. Поэтому скорость свободной десорбции из угля последовательно снижается от CH_4 к его гомологам, т.к. диаметр молекул в ряде CH_4 - C_5H_{12} возрастает от 0,42 до 0,8 нм.

Изучению физико-химического состояния природной системы уголь-метан и формам связи метана с углем посвящены работы А.Т. Айруни, Ю.Ф. Васючкова, Г.Д. Лидина, А.А. Скочинского, Г.Н. Фейта, И.Л. Эттингера и др. Ими выделяются следующие формы связи метана с углем: свободная, сорбированная, растворенная и газокристаллическая.

Обычно в свободных газах угольных пластов содержание тяжелых углеводородов (УВ) не превышает 1-5%. В литературе приводятся сведения, что свободные газы угольных пластов могут содержать повышенные количества тяжелых УВ. Так, в угленосных толщах Пенсильвании (США) метан содержит примесь до 10% этана. Е. С. Розанцев и Н. П. Таран приводят данные о высоком содержании тяжелых УВ (десятки %) в угольных газах, отобранных с выбросоопасных участков.

При вскрытии угольных пластов и снижении давления происходит последовательное выделение углеводородов из углей в соответствии с их сорбционными свойствами. Метан, как наиболее подвижный компонент, опережает другие, более тяжелые УВ, которые начинают выделяться после истечения из

пласта основной доли метана. Этим можно объяснить, что в свободно выделяемых из углей газах наблюдаются низкие концентрации тяжелых УВ, которые остаются в угле как трудно выделяемые.

Значительное количество работ (Ю.Ф. Васючков, Г.Д. Лидин, Н.В. Ножкин, В.В. Ходот, Н.В. Шульман, И.Л. Эттингер, М.Ф. Яновская и др.) опубликовано по сорбции УВ в связи с определением метаноемкости углей и гидровоздействием на угольные пласты. Однако основное внимание уделяется метану и данные по тяжелым УВ практически не приводятся. В ряде опубликованных работ (Ф.А. Алексеев, В.С. Лебедев, Е.С. Розанцев, И.С. Старобинец, Н.П. Таран и др.) приводятся данные о повышенных и высоких концентрациях тяжелых УВ в сорбированных газах углей: до 40-60% в газах, выделенных из угля нагреванием до 80 °С.

Исследования состава и количества сорбированных углеводородов угольных пластов и пыли были выполнены для угольных пластов шахты «Осинниковская» (Кузбасс), (уголь марки Ж): Е-1, Е-5, К-1, К-5, угольная пыль пласта Е-5. Результаты исследований сорбированных углеводородов, извлеченных из углей и угольной пыли, представлены в табл. 1 и на рис. 7. Содержание предельных УВ от метана до гексана в газах, выделенных из углей и угольной пыли, составляло 13,4-29,1 см³/кг угля, пыли. Четко видно обогащение сорбированных углеводородов тяжелыми углеводородами, причем в основном преобладают пропан (С₃Н₈) и бутан (С₄Н₁₀).

Известно, что у тяжелых УВ температура воспламенения, концентрационные параметры взрываемости ниже, а теплотворная способность выше, чем у метана. Проф. Лебедевым В.С. была выдвинута гипотеза, что выделяемые из угля тяжелые углеводороды в процессе угледобычи могут играть роль «пускового» фактора в развитии процессов возгорания и взрывов в угольных шахтах. Произведены расчеты теплоты сгорания углеводородов, извлеченных из 1кг угля и угольной пыли. Наибольшее количество тепла выделяется при сгорании бутана. В табл.1 приведены расчетные значения теплоты сгорания сорбированных углеводородов, извлеченных из 1 кг углей и угольной пыли. Наибольшая теплота сгорания установлена у тяжелых углеводородов, извлеченных из пласта Е-1 (3049,5 Дж/кг угля). Несколько ниже теплота сгорания у тяжелых углеводородов, извлеченных из угольной пыли (2549,3 Дж/кг пыли). Если принять

средние значения количеств тяжелых УВ ($5 \text{ см}^3/\text{кг}$ угля или пыли), выделяемых из углей и угольной пыли, то средняя теплота их сгорания будет равна 575 Дж, теплота сгорания того же количества метана составляет 199 Дж.

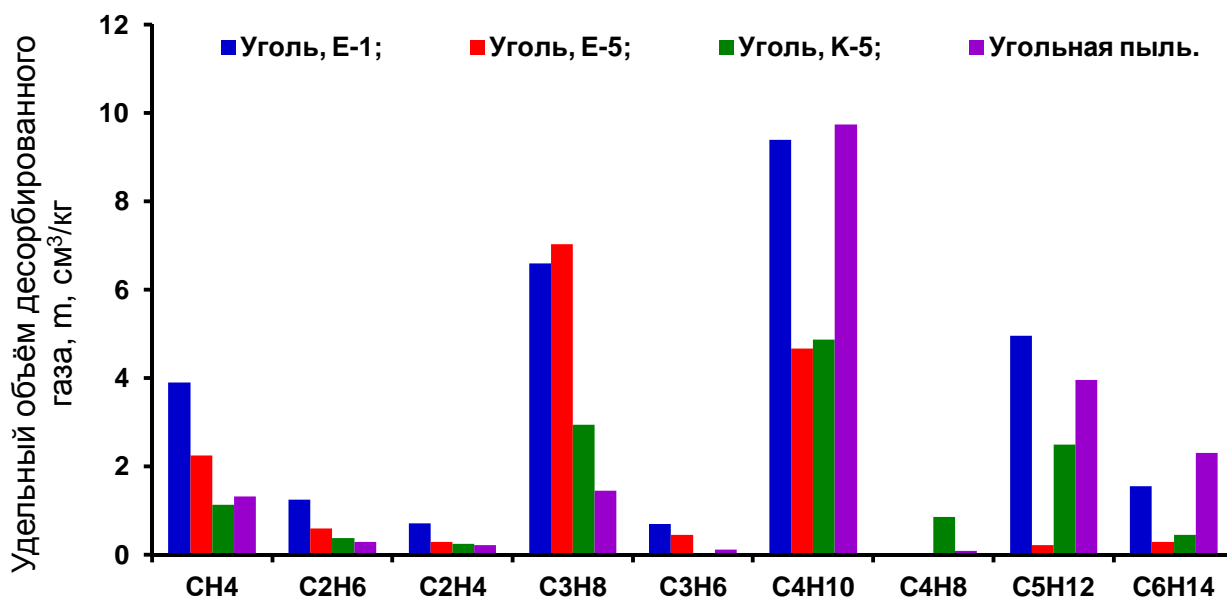


Рис. 7. Количество выделяемых углеводородов из угля и угольной пыли ($200 \text{ }^\circ\text{C}$)

Работами И.Л. Эттингера установлено, что в углях от I типа нарушенности к V фильтрующий объем пор увеличивается более чем в 2 раза. При этом объем субмакропор возрастает более чем в 6 раз, а объем переходных пор остается стабильным и от степени нарушенности не зависит. В силу образования субмакропор возможно увеличение сорбционной способности у препарированных углей по отношению к высшим углеводородам, как к газам с большим размером молекул, чем метан.

Результаты опытов Е.С. Розанцева и Н.П. Таран показали, что при тектонической препарации углей возрастает их сорбционная активность по отношению к тяжелым углеводородам. Перемятые угли поглощают в 1,7 раза больше тяжелых углеводородов, чем крепкие ненарушенные угли. Сорбционная емкость углей по отношению к тяжелым углеводородам увеличивается по мере уменьшения крепости. По данным этих авторов, с возрастанием выбросоопасности пласта и частоты проявления внезапных выбросов повышается и содержание в угле тяжелых углеводородов (до $1,8 \text{ м}^3/\text{т}$ горючей массы). Пласты, практически невыбросоопасные, содержат тяжелых углеводородов до $0,001 \text{ м}^3/\text{т}$ г.м.; при содержании более $0,01 \text{ м}^3/\text{т}$ г.м. – пласты опасны, а при содержании от

0,004 до 0,01 м³/т г.м. угольные пласты являются переходными от опасных к неопасным.

Таблица 1

Основные свойства, количество и состав сорбированных углеводородов, извлеченных из угля и угольной пыли методом термодегазации

Вещество, параметры	Углеводороды									Σ ^{*)}
	СН ₄	С ₂ Н ₆	С ₂ Н ₄	С ₃ Н ₈	С ₃ Н ₆	С ₄ Н ₁₀	С ₄ Н ₈	С ₅ Н ₁₂	С ₆ Н ₁₄	
Эффективный диаметр молекулы, нм	0,414	0,537	0,495	0,632	0,599	0,707	0,674	0,780	0,839	
Относительная молекулярная масса	16,043	30,070	28,054	44,097	42,081	58,124	56,100	72,147	86,173	
Плотность, кг/нор.м ³	0,715	1,357	1,260	2,019	1,915	2,703	2,668	3,172	3,638	
Пределы взрываемости, об.%	5,0 - 14,0	3,2 - 12,5		2,4 - 9,5		1,9 - 8,4		1,4 - 7,8	1,25 - 6,9	
Количество адсорбированного газа из угля пласта Е-1, см ³ /кг; содержание в газовой смеси, об.%	3,9 13,4	1,25 4,3	0,71 2,4	6,59 22,7	0,7 2,4	9,4 32,4	Отс.	4,95 17,0	1,55 5,3	29,1
Количество адсорбированного газа из угля пласта Е-5, см ³ /кг; содержание в газовой смеси, об.%	2,25 14,3	0,59 3,7	0,29 1,8	7,03 44,6	0,45 2,9	4,66 29,5	Отс.	0,21 1,3	0,29 1,8	15,8
Количество адсорбированного газа из угля пласта К-5, см ³ /кг; содержание в газовой смеси, об.%	1,13 8,5	0,37 2,8	0,25 1,9	2,94 22,0	Отс.	4,87 36,5	0,85 6,4	2,49 18,7	0,45 3,4	13,4
Количество адсорбированного газа из угольной пыли пласта Е-5, см ³ /кг; содержание в газовой смеси, об.%	1,31 6,7	0,29 1,5	0,21 1,1	1,45 7,4	0,11 0,6	9,74 50,0	0,09 0,5	3,96 20,3	2,31 11,9	19,5
Температура самовоспламенения, °С	595	515	435	470		405		286	233	
Удельная теплота сгорания, МДж/нор.м ³	39,8	70,3		101,2		133,4		169,3	187,4	
Теплота сгорания ГСУВ, извлеченных из 1 кг угля (пыли):										
из угля, пласт Е-1, Дж/кг	155,2	87,9		666,9		1254,0		838,1	290,5	3292,6
из угля, пласт Е-5, Дж/кг	89,6	41,5		711,4		621,6		35,6	54,3	1554,0
из угля, пласт К-5, Дж/кг	45	26		297,5		649,7		421,6	84,3	1524,1
из угольной пыли, Дж/кг	52,1	20,4		146,7		1299,3		670,4	432,9	2621,8

Примечание: Σ^{*)} – сумма предельных углеводородов.

Исследования фракционного состава угольной пыли показали, что количество десорбируемых углеводородов нелинейно зависит от фракционного состава угольной пыли (рис. 8, 9). При термодегазации при 150 °С наибольшее количество тяжелых углеводородов выделяется из пыли, размером частиц менее 0,07 мм, преимущественно бутана и пропана.

Функциональные зависимости десорбции пропана и бутана при 150 °С имеют вид:

$$I_{\text{пропан}} = -20,86 \cdot f^3 + 29,38 \cdot f^2 - 8,879 \cdot f + 0,994; \quad (20)$$

$$I_{\text{бутан}} = -49,96 \cdot f^3 + 79,08 \cdot f^2 - 31,73 \cdot f + 4,941, \quad (21)$$

где $I_{\text{пропан}}$, $I_{\text{бутан}}$ – количество десорбированного пропана и бутана соответственно, $\text{см}^3/\text{кг}$; f – размер частиц угольной пыли, мм.

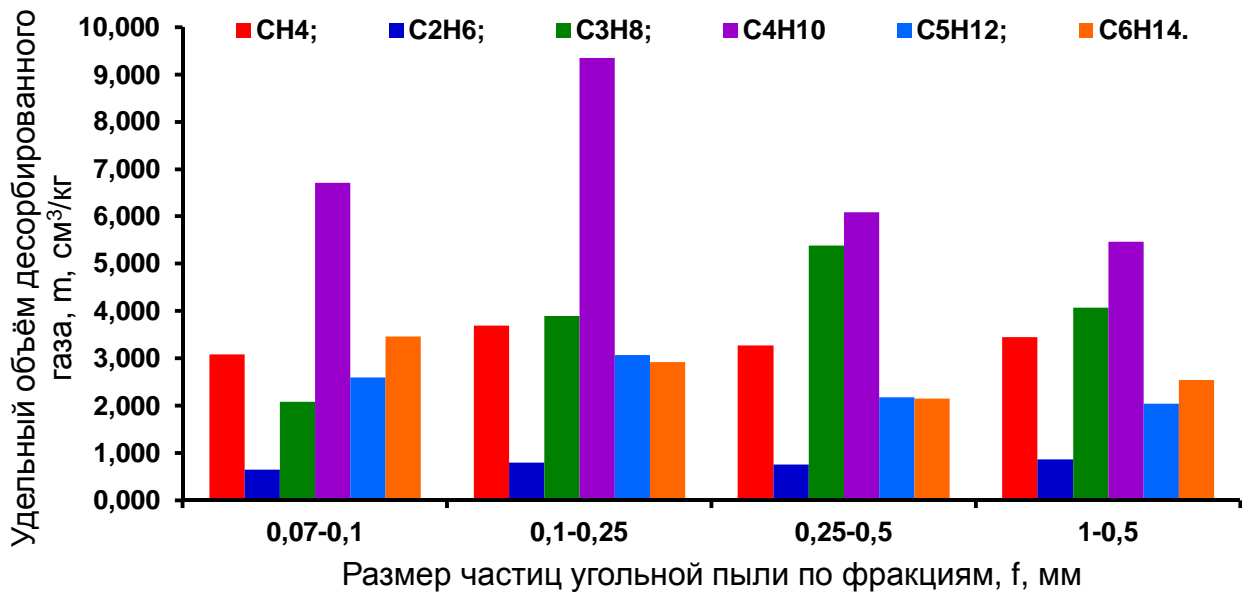


Рис. 8. Количество выделяемых углеводородов из угольной пыли при температуре 250 °С

При 200 °С наименьшее количество тяжелых углеводородов десорбируется из пыли, фракционного состава менее 0,1 мм.

Функциональные зависимости десорбции пропана и бутана при 200 °С имеют вид:

$$I_{\text{пропан}} = -16,58 \cdot f^3 + 13,76 \cdot f^2 + 4,345 \cdot f + 0,521; \quad (22)$$

$$I_{\text{бутан}} = 20,71 \cdot f^3 - 30,56 \cdot f^2 + 9,618 \cdot f + 4,499. \quad (23)$$

При 250 °С наибольшее количество тяжелых углеводородов десорбируется из пыли, размером частиц 0,1-0,25 мм (рис. 8).

Функциональные зависимости десорбции пропана и бутана при 250 °С имеют вид:

$$I_{\text{пропан}} = 4,251 \cdot f^3 - 18,88 \cdot f^2 + 18,26 \cdot f + 0,438; \quad (24)$$

$$I_{\text{бутан}} = 102,5 \cdot f^3 - 163,7 \cdot f^2 + 64,92 \cdot f + 1,753. \quad (25)$$

Следует отметить, что в пределах отдельной фракции пыли зависимость десорбции углеводородов от температуры носит линейный характер. Как показано на рис. 7, больше всего из угольной пыли десорбируется бутана, а из данных рис. 8 следует, что в основном бутан десорбируется пылью фракции 0,1-0,25 мм.

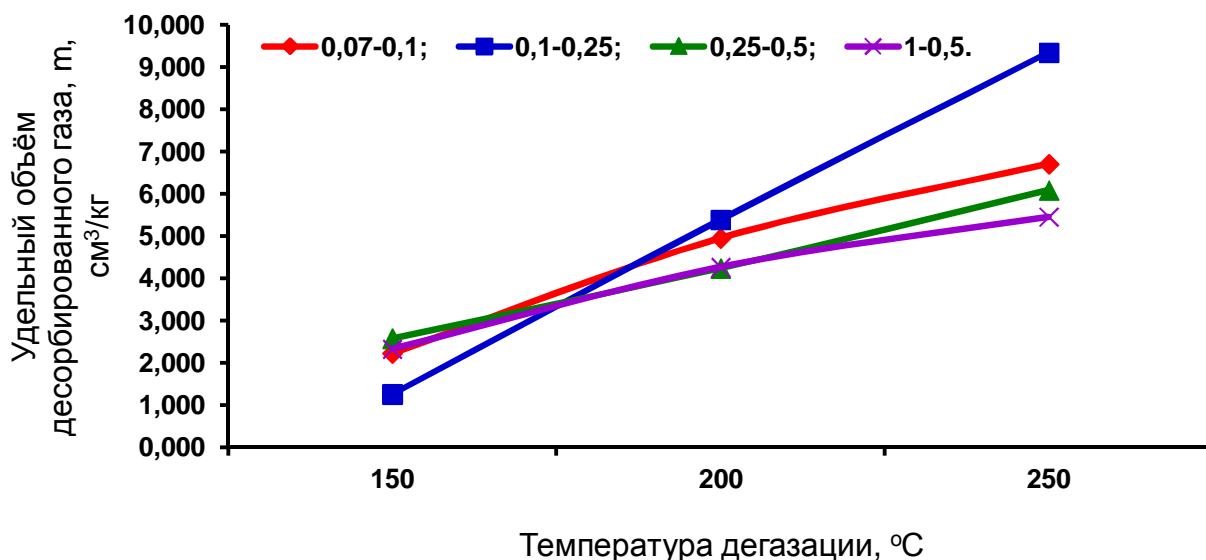


Рис. 9. Количество выделяемого бутана из различных фракций угольной пыли в зависимости от температуры

По данным литературных источников, при увеличении скорости вентиляционной струи с 0,4-0,6 до 1,6-2,1 м/с запыленность воздуха уменьшается, достигая минимума при скорости струи 1,5-2,5 м/с за счет разбавления и выноса пыли. При увеличении скорости вентиляционной струи с 1,8-2,5 до 4-5 м/с запыленность воздуха снова увеличивается, что обусловлено замедлением процесса седиментации и взметыванием ранее осевшей пыли. С увеличением скорости комбайна при выемке угля с 3-4 до 7-8 т/мин оптимальная скорость вентиляционной струи увеличивается. Это обусловлено тем, что с повышением объема разрушаемого угля увеличивается выход газа и пыли в атмосферу призабойного пространства. При увеличении выхода пыли за счет возрастания отбитого угля увеличивается роль фактора выноса пыли, что приводит к смещению оптимума скоростей воздушного потока.

Анализ пылегазовой обстановки производился по натурным измерениям в шахте «Осинниковская» на выемочном участке, отрабатывающем пласт Е-5. Шахта отнесена к опасной по взрывам угольной пыли, опасной по выбросам угля и газа, опасной по горным ударам. Абсолютное газовыделение – 112,8 м³/мин; относительное газовыделение – 55,1 м³/т. Горизонт отработки -160 м, глубина отработки - 550 м от поверхности. На шахте отрабатываются 15 угольных пластов марки «Ж», мощность которых колеблется в пределах от 0,8 до 3,2 м, влажность угля - от 1,8 до 3,4%, зольность - от 5,2 до 27,2%. Все пласты относятся к опасным по пыли. Выход летучих веществ изменяется от 29,5 до

36,2%, нижний предел взрывчатости угольной пыли составляет от 30 до 45 г/м³, удельное пылевыведение – от 295 до 1300 г/т.

Технически достижимый уровень (ТДУ) запыленности воздуха на вентиляционном штреке в 10 м от лавы составляет около 220 мг/м³, пылеотложение в этом месте доходит до 390 г/м³·сут, что также превышает допустимый уровень. Отдельные значения запыленности воздуха могут доходить до 340 мг/м³, а в лаве в 10 м от комбайна - от 369 до 1070 мг/м³. Норма осланцевания выработки составляет 86%. Для поддержания уровня пылеотложения во взрывобезопасном состоянии необходимо четырехкратное осланцевание выработки в смену, что технологически невыполнимо.

С другой стороны, газовая динамика лавы определяется процессами выделения метана с обнаженной поверхности горного массива, из отбитого угля и выработанного пространства. При выемке угля, когда продолжительность обнажения отдельных участков забоя различна, газовыделение более интенсивно из свежееобнаженных поверхностей (за комбайном). В таких местах содержание метана в воздухе может заметно возрастать.

В диссертационной работе были выполнены исследования по анализу состава шахтного воздуха в нерабочее время (ремонтную смену) в лаве, обрабатывающей пласт Е-5. Были взяты пробы воздуха по длине лавы. Во всех пробах в концентрациях ниже 0,0001% (порядка 10⁻⁴) было зафиксировано присутствие этана. В верхней части лавы в таких же концентрациях (ниже 0,0001%) присутствовал пропан. Повышение температуры угля при резании увеличивает выход этана и других углеводородов, что повышает вероятность воспламенения газа и пыли.

Наличие в воздухе динамически активных газов может приводить к стратификации воздушных потоков, опасность которых в горных выработках определяется появлением интегральных объемных сил, которые могут существенно изменять среднее скоростное поле потока (особенно у поверхности выработок, где наиболее часто происходит образование слоев газа повышенной концентрации); тяжелые углеводороды будут концентрироваться у почвы выработки, создавая повышенную опасность взрыва пылегазовоздушной смеси в этой части выработки.

В диссертационной работе установлено, что аэродинамическое старение выработок, приводит к росту аэродинамического сопротивления участков выработок от 4 до 8 раз, изменяет депрессию между выработками, в результате

чего изменяются направление и величина утечек воздуха через выработанное пространство и газовыделение из него. Это приводит к отказам вентиляции из-за нарушений пылегазового режима. По статистическим данным число аварий, приходящихся на одно загазирование, имеет порядок $2 \cdot 10^{-3}$.

Комплексный способ может быть использован для воздействия на угольный пласт с целью снижения его пылеобразующей способности и газовыделения, а также повышения эффективности пылеулавливания при отбойке угля. Способ включает бурение скважин, их герметизацию, растворение в воде газа, например азота, с концентрацией от 0,3 до 1%, добавление в водогазонаполненный раствор (пенообразователя) поверхностно-активного вещества, например «Неоласа», с концентрацией от 0,05 до 5% в объеме удельного расхода жидкости при предварительном увлажнении угольных пластов (от 10 до 30 л/т) и нагнетание в скважину полученной рабочей жидкости под давлением от 1,5 МПа до 30 МПа.

После насыщения в течение 24 - 96 ч массив разрушают, например рабочим органом комбайна, и орошают водой (по типу форсунки), после чего высвобожденный газ и метан взаимодействуют с пенообразователем и образуют воздушно-механическую пену, которая изолирует отбитый уголь в объеме разрушенной горной массы, снижая пылегазовыделения в атмосферу горной выработки. Повышение интенсивности выемки угля приводит к возрастанию доли газовыделения из отбитого угля. Использование газонаполненных растворов ПАВ позволяет блокировать выделение газа и пыли как из обнаженной поверхности разрабатываемого пласта, так и из отбитого угля.

На основе полученных результатов разработаны методика обработки угольного массива газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ, включающая использование рациональных параметров увлажнения, и «Технологическая часть промышленных испытаний пылесвязывающего действия обработки угольного массива газонаполненными растворами ПАВ», которая вошла в «Технологическую часть проекта предварительной дегазации пласта «Болдыревский» (шахта им. С.М. Кирова ОАО «СУЭК-Кузбасс»)». Технологическая схема обработки угольного пласта газонаполненными растворами ПАВ представлена на рис. 10. Основные параметры воздействия газонаполненными растворами ПАВ на угольный пласт для снижения его пылеобразующей способности представлены в табл. 2.

Параметры увлажнения пласта газонаполненными растворами ПАВ

№ п/п	Наименование параметров	Обозначение	Значение	Ед. изм.
1	Длина скважины	$l_{скв.}$	111	м
2	Длина лавы	$l_{лавы}$	242	м
3	Глубина герметизации скважины	$l_{герм.}$	10	м
4	Расстояние между скважинами	L_c	20	м
5	Количество раствора, закачиваемое в скважину	$Q_{скв.}$	201	м ³
6	Время нагнетания раствора в скважину	T	60,93	ч
7	Количество инертного газа, необходимое для обработки	$Q_{ин.газа}$	5820 7,28	л кг
8	Количество баллонов с инертным газом	N	0,97	шт.
9	Количество смачивателя, необходимое на одну скважину	$Q_{см.}$	603	л
10	Концентрация смачивателя	$C_{см.}$	0,3	%

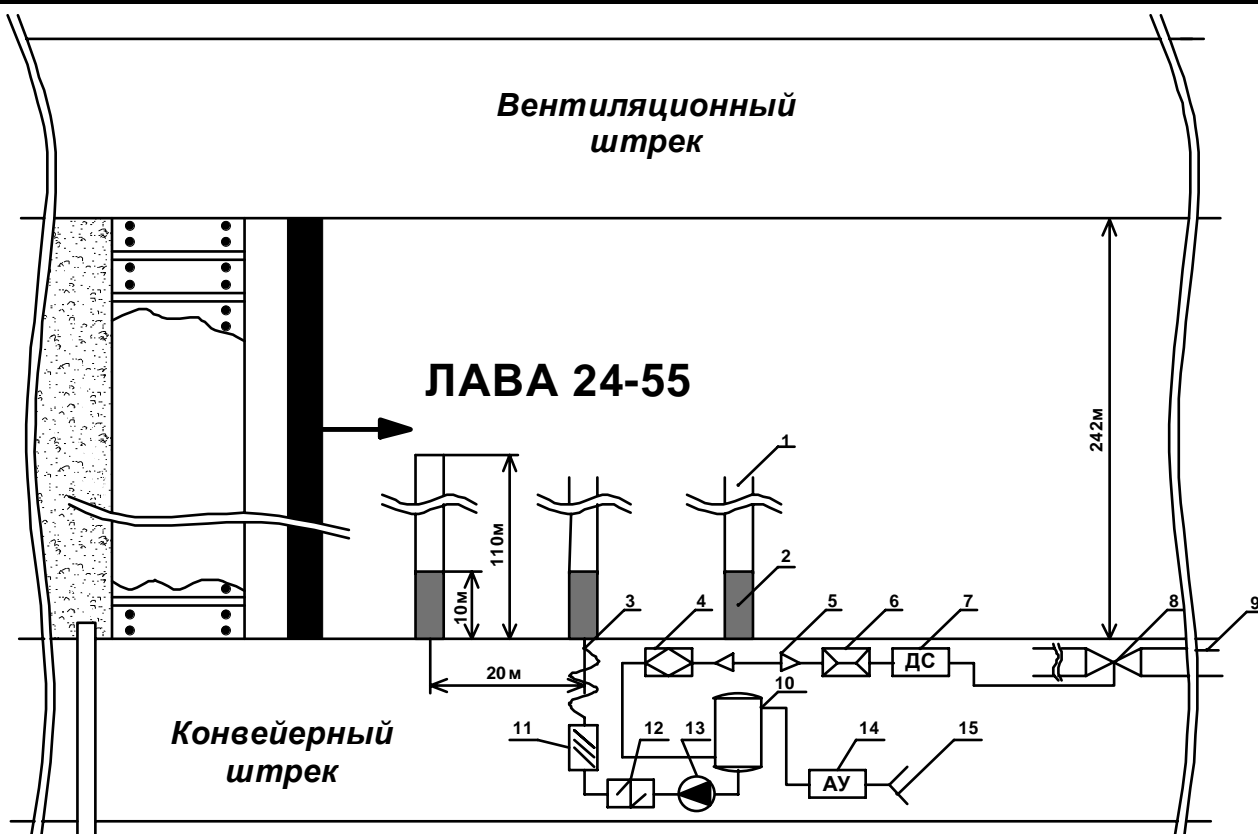


Рис. 10. Технологическая схема обработки пласта «Болдыревский» газонаполненными растворами ПАВ (шахта им. С.М. Кирова)

1 – скважина; 2 – герметизатор; 3 – шланг гибкий, высоконапорный; 4 – фильтр штрековый; 5 – переходник; 6 – клапан редуционный; 7 – дозатор-смачиватель; 8 – вентиль; 9 – пожарно-оросительный трубопровод; 10 – смеситель взрывобезопасного исполнения; 11 – расходомер; 12 – реле давления; 13 – установка для нагнетания раствора УНР-02; 14 – азотная установка мембранного типа взрывобезопасного исполнения; 15 – воздухозаборник

На основании разработанных рекомендаций по снижению пылеобразующей способности пластов от концентрации смачивателя в скважины подавался водный раствор смачивателя «Неолас» с концентрацией 0,2%. Раствор закачивался насосом УНР-02 под давлением 20 МПа (темп нагнетания раствора - 35 л/мин). Количество воды, закачиваемое в скважину, составило 1,67 м³, продолжительность времени нагнетания жидкости в скважину - 0,8 ч.

Во время проведения отбойки части пласта, обработанной раствором с рекомендуемой концентрацией смачивателя при температуре раствора 20 °С, проводились замеры концентрации пыли в воздухе. Технически достижимый уровень (ТДУ) запыленности воздуха в проходке составляет 185,8 мг/м³. Фактическая запыленность воздуха с использованием традиционных параметров увлажнения находилась в пределах 260÷300 мг/м³. При увеличении концентрации смачивателя «Неолас» в растворе с 0,05 до 0,5% уровень запыленности воздуха снизился до 135,4 мг/м³.

При проведении гидрорасчленения, которое является базовым воздействием заблаговременной дегазации угольных пластов, происходит значительное повышение влажности, приводящее к снижению прочности угля. В результате этого снижается пылеобразование при ведении горных работ. Снижение запыленности при бурении, креплении и перегрузке достигало 80-90%. При ведении горных работ через 4 – 7 лет после гидрорасчленения существенного повышения влажности и снижения запыленности не обнаружено. Причиной этого является то, что в процессе освоения скважин и дегазации угля происходит восстановление его прочности как в результате осушения пласта, так и в результате дегазации угля. Таким образом, заблаговременная дегазация угольных пластов может приводить и к увеличению пылеобразующей способности угля и запыленности воздуха в угольных шахтах.

Для снижения пылеобразующей способности угля рекомендуется после завершения дегазационной подготовки и непосредственно перед проведением горных работ производить повторное увлажнение пласта. Для повышения эффективности этого процесса в рабочую жидкость добавляются поверхностно-активные вещества, например, «Неолас», СП-01, «Эльфор». Концентрация ПАВ должна составлять – 0,2÷0,5%. Объем закачки рабочей жидкости зависит от степени освоенности скважин, но не превышает 400-500 м³ при обработке 200-250 тыс. т запасов угля.

Экономический ущерб от аварий A , связанных со вспышками метана и угольной пыли, в том числе взрывами, можно определить через средний ущерб от одной аварии a и число аварий N_a . Последнее связано вероятностно с числом отказов вентиляции из-за нарушений пылегазового режима N_{om} :

$$N_a = bN_{om} \quad (26)$$

где b – число аварий, приходящихся на одно загазирование очистного забоя N_3 из-за нарушения вентиляции и требований пылегазового режима N_B .

Тогда

$$A = aN_a = abN_{om} \quad (27)$$

Величины a и b могут быть определены на основе ретроспективного анализа статистических данных по возникновению взрывов метана и угольной пыли или по факторам их формирования.

В диссертационной работе показано, что связь N_a с N_{om} более устойчива, чем связь N_a с N_B . Поэтому для газовых шахт в качестве статистической оценки отказов вентиляции целесообразно использовать число аварийных загазований очистных забоев N_3 , а в качестве вероятности аварий показатель b_1 :

$$b_1 = N_a / N_3. \quad (28)$$

По статистическим данным этот показатель имеет порядок $2 \cdot 10^{-3}$ аварий на одно загазирование. Для шахт негазовых оценка отказов производится по общему числу остановок очистных забоев по причинам нарушения вентиляции и пылевого режима, а из рассматриваемых видов аварий остаются лишь взрывы пыли.

Экономический ущерб от аварий может быть оценен по формуле (29). Считая коэффициенты a и b постоянными, экономическую эффективность мероприятий по фактору затрат, связанных с авариями, можно выразить:

$$\Delta A = ab(N_{om.1} - N_{om.2}), \quad (29)$$

где $N_{om.1}$ $N_{om.2}$ - число отказов вентиляции соответственно до и после термо-влажностной обработки угля газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ.

Общая экономическая эффективность мероприятий определяется разностью капитальных затрат и эксплуатационных расходов на осуществление мероприятий по обработке угольного массива и снижению ущерба от взрывов пылегазовоздушных смесей в угольных шахтах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся научно-квалификационной работой, изложены актуальные для угольной отрасли научно обоснованные технические и технологические решения по повышению безопасности горных работ на основе комплексного управления пылегазовыделением в очистных и проходческих забоях путем снижения пылеобразующей способности угля и повышения остаточной газоносности угольного массива при термовлажностной обработке газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие отрасли.

Основные научные и практические результаты, полученные лично автором, выводы и рекомендации работы заключаются в следующем:

1. Масштабные катастрофы в угольных шахтах за последние годы в результате взрывов метановоздушных смесей показали несовершенство существующей концепции обеспечения взрывобезопасности горных работ на высокогазоносных угольных пластах. Рудничная атмосфера высокогазообильных шахт должна квалифицироваться как смесь «воздух – метан - гомологи метана – угольная пыль». Присутствие в рудничной атмосфере тяжелых углеводородов создает повышенную опасность, так как эти газы образуют взрывчатые смеси с воздухом при более низких концентрациях, чем метан. Проблема разработки комплексного метода снижения пылевой и газовой опасностей угольных шахт является актуальной.

2. Основное количество сорбированных углеводородов выделяется из угля при термической дегазации в интервале температур 200-250 °С. При дальнейшем повышении температуры их «выход» снижается, что позволяет говорить о практически полном извлечении сорбированных углеводородов (с числом атомов углерода от 2 до 6, C₂-C₆) при температуре воздействия на уголь в интервале 200-250 °С. Содержание предельных углеводородов от метана до гексана в газах, выделенных из углей средней стадии метаморфизма и угольной пыли, составило 13,4-29,1 см³/кг угля, пыли. Определено обогащение десорбированных углеводородов тяжелыми углеводородами, причем в основном преобладает пропан (C₃H₈) и бутан (C₄H₁₀). Упомянутые условия имеют место при резании угля и при его самовозгорании.

3. Угольная пыль содержит больше углеводородов C₄-C₆ по сравнению с углеводородами, выделенными из углей - C₃-C₄. Содержание предельных угле-

водородов от пропана до гексана в сумме углеводородов, извлеченных из углей при термодезгазации с температурой 250 °С, варьирует в пределах 80-87%, в угольной пыли доля извлеченных предельных углеводородов от пропана до гексана достигает 91%. Количество десорбированного пылью пропана и бутана в зависимости от фракционного состава пыли описывается полиномом третьей степени. Наибольшее количество бутана десорбируется угольной пылью фракции 0,1 – 0,25 мм.

4. На основании хроматографического анализа сорбированных углеводородных газов, выделенных из угля, обработанного термовлажностным химрегентным способом, установлены закономерности взаимодействий флюидов системы жидкость – газ с углем, обусловленные возрастанием энергии дисперсионного взаимодействия молекул гомологов метана с молекулами поверхностно-активных веществ при объемном заполнении микропор угля. Экспериментально доказано, что диффузионный перенос является преобладающим в процессах переноса молекул воды и ПАВ в сорбционный объем угля. На скорость диффузии молекул ПАВ оказывают влияние размер молекул и концентрация раствора ПАВ.

5. Зависимости остаточной газоносности угля (обработанного при температуре 25 °С) от концентрации смачивателя имеют вид параболы с оптимальной концентрацией раствора смачивателя, равной 0,5÷0,6%, при которой остаточная газоносность для метана, этана и пропана является минимальной по сравнению с чистой водой и концентрацией смачивателя 1%. Таким образом, для чистой воды и 1%-ной концентрации смачивателя наблюдается блокирование углеводородных газов рабочей жидкостью, в результате чего остаточная газоносность угля повышается по отношению к необработанному углю. При температуре 60 °С для всех концентраций смачивателя от 0 до 1% остаточная газоносность угля для всех углеводородных газов уменьшилась по сравнению с необработанным углем, что свидетельствует о том, что блокирование газа в угле при данной температуре обработки не происходит. Коэффициент кинематической вязкости раствора смачивателя при повышении температуры раствора от 25 до 60 °С снижается на 30 - 40%.

6. На основании экспериментальных исследований установлено, что оптимальные, с точки зрения снижения пылеобразующей способности углей средней стадии метаморфизма, концентрации ПАВ составляют 0,2-0,5%. Выход пыли размером менее 70 мкм при разрушении угля, обработанного раствором

смачивателя с концентрацией 0,2%, уменьшается в 2-3 раза по сравнению с углем, обработанным чистой водой, и уменьшается - в 1,5-2 раза по сравнению с углем, обработанным смачивателем с концентрацией 0,05%.

7. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность увлажнения угольного массива газонаполненными растворами ПАВ с использованием механизма замещения газа в сорбционном объеме угля при обработке пласта такими веществами, которые являются более термодинамически стабильными по отношению к данному газу. Установлено, что коэффициент влагонасыщения угля при увлажнении газонаполненными растворами ПАВ зависит от концентрации смачивателя и инертного газа, давления газожидкостной смеси, времени увлажнения, обуславливающих величину поверхностного натяжения жидкости и ее вязкость.

8. На основе лабораторных исследований установлено, что максимальное влагосодержание угля при увлажнении газонаполненными растворами ПАВ наблюдается при концентрациях смачивателя от 0,2 до 0,5% в первые сутки увлажнения, при этом коэффициент влагонасыщения достигает $6,0 \div 6,38\%$. Снижение пылеобразующей способности угля при обработке газонаполненными растворами ПАВ нелинейно зависит от концентрации смачивателя и линейно - от давления газонаполненного раствора.

9. Экспериментально апробирован газонаполненный раствор ПАВ, состоящий из растворенного в воде пенообразователя (поверхностно-активного вещества), с концентрацией от 0,05 до 5% в объеме удельного расхода жидкости при предварительном увлажнении угольных пластов (от 10 до 30 л/т), в котором растворяются газы, например, диоксид углерода (CO_2) или азот (N_2) с концентрацией от 0,3 до 1%. Высвобожденный при разрушении угля газ (CO_2 и N_2) взаимодействует с пенообразователем и образует воздушно-механическую пену, которая изолирует отбитый уголь, снижая пылегазовыделение в атмосферу горной выработки как из отбитого угля, так и из обнаженной поверхности разрабатываемого пласта.

10. Рациональные параметры обработки угольного массива газонаполненными растворами ПАВ получены на основе установленных в работе зависимостей пылеобразующей способности угля от концентрации смачивателя и давления газонаполненного раствора ПАВ и составляют: концентрация смачивателя $0,2 \div 0,5\%$, концентрация азота $1,93 \div 3,0\%$, давление газонаполненного раствора ПАВ $2,0 \div 3,0$ МПа.

11. Получены зависимости изменения удельного аэродинамического сопротивления выработок во времени для различных способов их охраны. Установлено, что аэродинамическое старение выработок приводит к росту удельного аэродинамического сопротивления участков выработок от 4 до 8 раз, изменяет депрессию между выработками, в результате чего изменяются направление и величина утечек воздуха через выработанное пространство и газовыделение из него. Это приводит к отказам вентиляции из-за нарушений газового режима. По статистическим данным число аварий, приходящихся на одно загазирование, имеет порядок $2 \cdot 10^{-3}$.

12. Разработана методика обработки газонаполненными растворами ПАВ угольного массива как основного источника пылеобразования и газовыделения при ведении горных работ с использованием оптимальных концентраций смачивателя и рациональных значений давления инертного газа, позволяющих повысить пылевзрывобезопасность шахт за счет снижения запыленности воздуха и интенсивности пылеотложения и снижения газовыделений в горных выработках.

13. Научно обоснован комплексный метод снижения пылевой и газовой опасностей в угольных шахтах путем управления пылегазовыделением в очистных и проходческих забоях за счет снижения пылеобразующей способности угля и повышения остаточной газоносности угольного массива и отбитого угля на основе разработки технологических решений по изменению их газоотдачи при термовлажностной обработке газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ. Для снижения пылеобразующей способности угля в зонах заблаговременной дегазации рекомендуется после завершения дегазационной подготовки и непосредственно перед проведением горных работ производить повторное увлажнение пласта с концентрацией смачивателя 0,2-0,5%. Объем закачки рабочей жидкости зависит от степени освоенности скважин и ориентировочно составляет 400-500 м³ при обработке 200-250 тыс. т запасов угля.

Результаты исследований отражены в следующих публикациях автора:

1. *Ушаков К.З., Скопинцева О.В.* О влиянии аэродинамического старения горных выработок на надежность шахтных вентиляционных сетей / Изв. вузов. Горный журнал. - 1989. - № 6. - С. 55-58.

2. *Ушаков К.З., Ушаков В.К., Скопинцева О.В.* Надежность шахтных вентиляционных систем // Труды 23-й Международной конференции научно-исследовательских институтов по горной безопасности. – Вашингтон. -1989. - С. 373-383.

3. *Скопинцева О.В.* Аэродинамическое старение горных выработок как фактор, определяющий надежность шахтных вентиляционных сетей / КНР. – Пекин: Пекинский технологический горный университет. -1995. - 79 с.

4. *Ушаков К.З., Скопинцева О.В.* Регулирование шахтных вентиляционных сетей по фактору аэродинамического старения горных выработок / Современные проблемы шахтного метана: Сб. научных трудов к 70-летию проф. Н.В. Ножкина. – М., МГГУ. -1999. - С. 216-224.

5. *Скопинцева О.В.* Повышение надежности шахтной вентиляционной системы с учетом перспективы ее развития. - М.: Горный информационно-аналитический бюллетень. -1992. -№1. - С.2-6.

6. *Скопинцева О.В.* О расчетном количестве воздуха при определении депрессии в воздухопроводах с переменным расходом воздуха / Проблемы аэрологии горных предприятий. – Сб. научных трудов, посвященный 90-летию со дня рожд. проф. А.И. Ксенофоновой. – М.:МГГУ. -1993. - С.22-26.

7. *Скопинцева О.В.* Разработка системы контроля, диагностики состояния шахтных вентиляционных систем, метода оценки и повышения их надежности. - М.: Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. - №5. – С. 152-156.

8. *Булгаков Ю.Б., Кузык И.Н., Артамонов В.Н., Скопинцева О.В.* Управление охраной труда на предприятиях с повышенной опасностью. - М.: Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. - №5. – С. 203-206.

9. *Скопинцева О.В., Витько А.Д., Копылов К.Н.* Исследование аэродинамических параметров пылеподавляющих жалюзийных решеток методом лабораторного моделирования. - М.: Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2005. - Тем. пр. «Метан». - С. 138-142.

10. *Скопинцева О.В., Прокопович А.Ю., Гашенко А.О., Савинский П.А.* Научные основы влагохимреагентной тепловой обеспыливающей обработки угольного массива и горной массы. - М.: Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2006. – Тем. пр. «Аэрология». - С. 210-218.

11. *Скопинцева О.В.* Рейнольдса число. / Российская угольная энциклопедия. - Москва-Санкт-Петербург: Изд-во ВСЕГЕИ.-2007. –Т.3. - С. 39.

12. Скопинцева О.В., Прокопович А.Ю. Влияние температуры раствора смачивателя «Неолас» на влагоемкость угля. – М.: Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2007. – Тем. пр. «Аэрология». - С. 231-234.
13. Прокопович А.Ю., Скопинцева О.В., Савельев Д.И. Влияние температуры и концентрации смачивателя «Неолас» на снижение поверхностного натяжения жидкости. - М.: Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. - №12. - С. 44-46.
14. Скопинцева О.В., Прокопович А.Ю., Соловьёв Ю.В. Влияние хим-реагентной обработки угля на его пылеобразующую способность. - М.: Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2008. - Тем. пр. «Аэрология». - С. 185-194.
15. Прокопович А.Ю., Скопинцева О.В., Соловьёв Ю.В. Гранулометрический состав продуктов разрушения увлажненного угля в режиме капиллярного насыщения. - М.: Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2008. - Тем. пр. «Аэрология». - С. 195-202.
16. Скопинцева О.В., Лесникова Е.Б., Прокопович А.Ю. Исследование влияния смачивателя «Неолас» на содержание активных кислых групп в угле. – М.: Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2008. - Тем. пр. «Аэрология». - С. 203-205.
17. Скопинцева О.В., Прокопович А.Ю., Соловьёв Ю.В. Исследование пылеобразующей способности углей при увлажнении их рабочей жидкостью в режиме капиллярного насыщения. – М.: Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. - №9. - С. 68-70.
18. Лебедев В.С., Телешева С.Ю., Скопинцева О.В., Прокопович А.Ю. Исследование сорбции углеводородов при увлажнении угля. - Горный журнал. – 2009. - № 2. - С.70-71.
19. Скопинцева О. В., Савельев Д. И. Пылеподавление пеной на горных предприятиях. – М.: Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня: «Аэрология». - 2009. - № ОВ 13. – С.221-227.
20. Скопинцева О. В. Исследование взаимодействий в системе «уголь-жидкость – газ» при увлажнении угольного массива. – М.: Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня: «Аэрология». - 2009. - № ОВ 13. – С.212 - 221.
21. Лебедев В.С., Иванов Д.В., Скопинцева О.В., Савельев Д.И. Оценка роли глубокосорбированных углеводородов угольных пластов в возникновении

пожароопасных ситуаций в угольных шахтах. - Известия вузов. Геология и разведка. – М., 2010. - №2. – С.86-88.

22. *Скопинцева О.В.* Научное обоснование комплексного метода снижения пылевой и газовой опасностей выемочных участков угольных шахт. – М.: Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня: «Аэрология, метан, безопасность».– 2011. -№ ОВ7. – С. 315-325.

23. *Скопинцева О.В., Иляхин С.В.* Научное обоснование и разработка комплексного метода снижения пылевой и газовой опасностей в угольных шахтах. – М.: Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня: «Аэрология, метан, безопасность».– 2011. -№ ОВ7. – С. 326-330.

24. *Скопинцева О.В., Иляхин С.В., Савельев Д.И., Прокопович А.Ю.* Обеспыливающая обработка угольного массива газонаполненными растворами ПАВ. – М.: Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня: «Аэрология, метан, безопасность».– 2011. -№ ОВ7. – С. 367-370.

25. *Скопинцева О.В., Савельев Д.И.* Повышение пылевзрывобезопасности выемочных участков угольных шахт с учетом газового фактора. – М.: Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня: «Аэрология, метан, безопасность». - 2011. -№ ОВ13. – С. 371-376.

26. *Skopintseva O.V.* The sorption of hydrocarbons in the conditions of coal moistening. -17th International Conference Engineering Mechanics 9 – 12 May 2011. – Svratka, Czech Republic. – P. 543-544.

27. *Skopintseva O.V., Savelyev D.I.* Study of sorption of hydrocarbons in the conditions of coal wetting. – International Journal of Multidisciplinary Thought. – USA. – 2011. – SSN: 2156-6992. - Vol. 1. – No 5. – P. 139–143.

28. *Коликов К. С., Скопинцева О. В.* Исследование области применения комплексного метода снижения пылевой и газовой опасностей в угольных шахтах. Деп. Рук. №865/02-12 от 19 декабря 2011г. (13 стр.) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. - №2.

Подписано в печать 22.12.11.

Формат 60x90/16

Объем 2 п.л.

Тираж 100 экз.

Заказ №

Отпечатано в отделе печати МГГУ. Москва, Ленинский проспект, д. 6