На правах рукописи

**ШУБИНА ЕЛЕНА АНДРЕЕВНА**

# ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАЗВЕДКИ И ДЕГАЗАЦИИ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КУЗБАССА МЕТОДОМ БУРЕНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СКВАЖИН

Специальность 25.00.14 – Технология и техника геологоразведочных работ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» на кафедре транспорта и хранения нефти и газа

**Научный руководитель:**
доктор технических наук, профессор **Лукьянов Виктор Григорьевич**

**Официальные оппоненты:**
**Борисов Константин Иванович**, доктор технических наук, доцент, ООО «Комплексные Услуги Безопасности», советник директора (г. Томск)

**Неверов Александр Леонидович**, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет», заведующий кафедрой бурения нефтяных и газовых скважин (г. Красноярск)

**Ведущая организация:**

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук (ФИЦ УУХ СО РАН г. Кемерово)

Защита диссертации состоится «15» декабря 2017 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.269.07 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 30 (20 корпус, ауд. 504).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (634050, г. Томск, ул. Белинского, д. 55) и на сайте: http://portal.tpu.ru/council/914/worklist

Автореферат разослан «___»_____2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.г.-м.н. Л.В. Жорняк

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Взрывы метана в угольных шахтах и массовая гибель горняков определяют необходимость изменения подхода к геологической разведке и отработке угольных месторождений с высокой природной газоносностью. Обеспечение безопасной добычи угля на угольных шахтах основывается на горно-геологических и горнотехнических условиях отработки месторождения.

Сложность прогнозирования газодинамических процессов при отработке месторождений с высокой природной газоносностью и их влияние на газовыделения в выемочный участок препятствуют использованию горно-шахтного оборудования в соответствии с заявленной производительностью, так как приводит к простоям оборудования по газовому фактору. Проведенные зарубежные и российские исследования подтверждают необходимость проведения эффективной дегазации угольных пластов и организации добычи метана в промышленных масштабах.

Несмотря на значительные финансовые и временные затраты на производство дегазации угольных пластов с высокой природной газоносностью, эффективность данных мероприятий не всегда имеет ожидаемый результат. Увеличение глубины ведения горных работ, а следовательно, и увеличение природной газоносности разрабатываемых угольных пластов существенно влияет на безопасность ведения работ, объемы добычи угля и увеличение количества выбросов метана в атмосферу.

В настоящее время нормативно-техническая документация обязывает пользователей недр проводить дегазацию угольных пластов при превышении природной газоносности 13 $м^3$/т с.б.м. По статистическим данным, большая часть угольных шахт Кузбасса отнесена к сверхкатегорным и опасным по внезапным выбросам угля и газа. Добыча угля на данных шахтах сопровождается применением различных способов дегазации (барьерной, предварительной, купола обрушения и т.д.) путем бурения огромного количества дегазационных скважин, что влечет за собой большие временные и финансовые затраты. Однако при проведении геологоразведочных работ в соответствии с установленными методическими рекомендациями в целях изучения геологического строения месторождений бурится большое количество разведочных скважин. Плотность разведочной сети может составлять от 8 до 24 скважин на 1 $км^2$. При соответствующем переоборудовании большая часть этих скважин может быть использована для производства заблаговременной дегазации угольных пластов с высокой природной газоносностью еще задолго до начала добычи угля.

Актуальность данной работы заключается в решении научной задачи по совершенствованию геологического изучения, а также созданию эффективной технологии дегазации угольных месторождений за счет разработки методики переоборудования геологоразведочных скважин с целью обеспечения безопасной добычи угля подземным способом и рационального освоения недр.

**Степень разработанности.** Проблемы горнодобывающих предприятий, связанные с газоносностью угольных месторождений, изучаются многими научными институтами России. Однако сложность горно-геологических условий и процесса добычи угля, сопровождающегося обильным газовыделением, требует постоянного совершенствования методов их изучения для оптимизации освоения данных месторождений.

Успешной работе автора в формировании своих предложений способствовали научно-исследовательские работы Н.П. Агеева, П.Г. Агеева, А.И. Гресова,

А.С. Десяткина, С.С. Золотых, Б.М. Зимакова, К.С. Коликова, О.Е. Казанцева, Н.В. Ножкина, В.Г. Натурова, М.В. Павленко, Л.А. Пучкова, С.В. Сластунова, В.В. Стрельченко, О.В.Тайлакова, В.Т. Хрюкина, М.П. Хайдиной, В.О. Яркова и других научно-производственных работников. Анализ результатов ранее выполненных исследований горно-геологических и горнотехнических условий добычи угля подземным способом, а также экологической обстановки в Кузбассе позволяет обосновать необходимость разработки новых технологий, направленных на совершенствование геологоразведочных работ, дегазации метаноугольных месторождений и развитие комплексного освоения недр.

**Объектом исследований** является сеть геологоразведочных скважин, предназначенных для изучения геологического строения угольных месторождений с высокой природной газоносностью.

**Предметом исследований** является технология многофункционального использования скважин путем переоборудования геологоразведочных скважин для производства заблаговременной дегазации угольных пластов.

**Идея работы** заключается в проведении геологической разведки и дегазации угольных месторождений за счет создания (разработки) технологии бурения многофункциональных разведочно-дегазационных скважин.

**Цель работы** – оптимизация процесса геологического изучения и дегазации угольных пластов, проектирования и разработки угольных шахт путем совершенствования конструкции геологоразведочных скважин.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1) изучение нормативной базы применяемой при изучении природной газоносности угольных пластов и составлении проектов геологоразведочных работ (далее ГРР);

2) исследование направления развития угледобывающей отрасли и государственной поддержки предприятий по добыче метана из угольных пластов;

3) выполнение анализа объемов добычи угля, относительной газообильности шахт и выбросов метана в атмосферу по Кузнецкому бассейну;

4) изучение горно-геологических и горнотехнических условий добычи угля подземным способом и других факторов, оказывающих влияние на определение объема газовыделения в выработанное пространство при отработке месторождения;

5) разработано техническое и технологическое решение по переоборудованию геологоразведочных скважин в скважины разведочно-дегазационного назначения с целью проведения заблаговременной дегазации шахтных полей с высокой природной газоносностью;

6) на основе современных методов воздействия на угольный пласт через разведочно-дегазационные скважины разработана методика прогнозирования снижения природной газоносности угольных пластов;

7) проанализирована экономическая целесообразность переоборудования геологоразведочных скважин.

**Методология и методы исследований.** Решение поставленных задач выполнялось на основе теоретических исследований и статистической обработки данных.

Произведено сравнение действующих нормативных требований с реальными потребностями геологического изучения, проектирования и отработки угольных месторождений подземным способом.

По методу аналогий выполнено сравнение проектов разведочных работ ранее разведанных угольных месторождений, изучены опытно-промышленные работы по заблаговременной дегазации и добыче метана, по результатам чего разработана новая методика геологического изучения и дегазации угольных месторождений с учетом переоборудования геологоразведочных скважин в дегазационные.

Научная новизна работы:

1) выполненный анализ выбросов метана в атмосферу и добычи угля в Кузбассе открытым и подземным способом позволил установить, что, несмотря на сокращение объемов добычи угля подземным способом, количество выбросов метана в атмосферу за последнее десятилетие увеличилось с 10 до 17 $м^3$/т угля, добытого подземным способом;

2) анализ информации о природной газоносности угольных районов Кузбасса позволил установить, что высокая природная газоносность угольных пластов приурочена к горизонтам, залегающим ниже отметки ± 0 (абс.), что предписывает своевременное принятие решений о производстве заблаговременной дегазации;

3) доказана необходимость и разработаны технико-технологические решения производства работ по дегазации угольных пластов на стадии составления проекта ГРР и строительства угольных шахт;

4) разработана конструкция скважин, которая обеспечивает их многофункциональное использование для геологической разведки и производства заблаговременной дегазации угольных пластов;

5) впервые предложена методика проектирования ГРР с учетом производства заблаговременной дегазации с применением современных технологий увеличения газовыделения угольных пластов;

6) экономически обоснована оптимизация геологоразведочных, проектных и производственных задач за счет сооружения многофункциональных скважин;

7) разработан метод оценки эффективности проведения заблаговременной дегазации с использованием переоборудованных геологоразведочных скважин.

**Отличие от ранее выполненных работ** заключается в обосновании оптимизации разведочных сетей, организационных, проектных и технологических задач, позволяющих обеспечить рациональное расположение элементов горнотехнических систем с целью проведения геологического изучения и заблаговременной дегазации высокогазоносных угольных пластов.

**Степень достоверности работы.** В основу диссертации положены результаты теоретических и производственных исследований автора, научных исследований в области геологической разведки и дегазации угольных месторождений Кузбасса и других угледобывающих регионов.

Основные выводы сделаны на основе анализа статистических данных территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Кемеровской области, территориального фонда геологической информации по Сибирскому федеральному округу, публикаций научно-исследовательских и диссертационных работ по проблематике исследования, а также производственных и экономических показателей действующих геологоразведочных и угледобывающих предприятий.

Личный вклад соискателя состоит:

1) в изучении и обобщении требований нормативных документов, материалов геологических отчетов, промышленных работ по производству дегазации угольных

пластов. В результате разработана и научно обоснована методика проведения заблаговременной дегазации на стадии составления проекта ГРР и строительства угольных шахт;

2) в разработке конструкции геологоразведочных скважин и технологии их переоборудования в скважины разведочно-дегазационного назначения для производства заблаговременной дегазации угольных пластов с учетом их горно-геологических и горнотехнических условий;

3) в определении первоначального контура угленосных отложений для расположения многофункциональных скважин и производства заблаговременной дегазации;

4) в прогнозировании снижения природной газоносности угольных пластов за счет использования многофункциональных скважин и современных методов воздействия на угольный пласт с целью увеличения дебита метана;

5) в проведении сравнительного анализа технико-экономических показателей при внедрении разработанной методики геологического изучения и проведения заблаговременной дегазации угольных месторождений с высокой природной газоносностью.

**Теоретическая и практическая значимость работы**. В процессе работы была получена следующая научно-производственная информация:

1) добыча угля в Кузнецком угольном бассейне в целом ежегодно увеличивается за счет развития более экономичного открытого способа разработки угольных месторождений в зоне метановыветривания. В связи с тем, что открытым способом разработки можно добыть лишь около 20 % балансовых запасов бассейна, необходимо в настоящее время подготавливать глубокие горизонты к безопасной добыче угля подземным способом;

2) увеличение глубины угольных шахт приводит к повышению метановыделения в выработанное пространство и росту объема выбросов метана в атмосферу. За последнее десятилетие количество выбросов метана в Кузбассе возросло на 70 %.

3) высокая природная газоносность приводит к большим затратам на производство дегазации угольных пластов, снижает экономическую эффективность, что подтверждает необходимость совершенствования методики геологического изучения и освоения угольных месторождений;

4) переоборудование геологоразведочных скважин для производства заблаговременной дегазации позволит подготавливать шахтные поля к безопасной отработке и переходу к комплексному освоению метаноугольных месторождений.

**Реализация выводов и рекомендаций**. Основные результаты работы представляют интерес для пользователей недр, геологоразведочных и проектных организаций, деятельность которых направлена на изучение геологического строения, проектирование и отработку угольных месторождений с высокой природной газоносностью.

По работе имеются акты внедрения разработанной методики от ООО «ГеоСтартПроект» г. Новокузнецк и ООО «Георезонанс» г. Москва.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационных исследований докладывались и обсуждались на различных конференциях, семинарах и симпозиумах регионального, российского и международного уровней:

1) научно-практическая конференция молодых специалистов ОАО «ОУК «Южкузбассуголь», г. Новокузнецк, 2012 г., I место;

2) X Международная научно-техническая конференция молодых специалистов холдинга ЕВРАЗ, горнорудная секция, г. Новокузнецк, 2012 г., диплом II степени;

3) XVII, XVIII, XIX, XX и XXI Международные научные симпозиумы имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр», НИ ТПУ, г. Томск, 2013-2017 гг., дипломы I и II степеней;

4) семинар «Проблемы дегазации угольных пластов», ЗАО «ОУК «Южкузбассуголь», г. Новокузнецк, 2013 г.;

5) Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы научно-технического прогресса в бурении скважин», НИ ТПУ, г. Томск, 2014 г.;

6) семинар № 6 «Проблемы угольного метана», Горный институт НИТУ МИСиС, «Неделя горняка», г. Москва, 2015–2016 гг.;

7) Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ «Шаг в науку», по направлению «Разработка месторождений полезных ископаемых», НИ ТПУ, г. Томск, 2015 г., диплом II степени;

8) научно-практический семинар № 6 «Добыча метана из угольных отложений. Проблемы и перспективы», РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, 2016 г.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения. Содержит 175 страниц машинописного текста, список терминов и литературы из 127 наименований; включает 19 таблиц, 32 рисунка и 6 приложений общим объемом 42 листа.

**Благодарности.** Автор благодарен своему научному руководителю д.т.н. В.Г. Лукьянову, д.т.н. С.Я. Рябчикову, д.т.н. С.В. Шаклеину, к.т.н. В.И. Брылину за содержательную помощь, требовательность и консультирование при выполнении работы. В процессе исследований автор пользовался всесторонней помощью и советами своих коллег по работе к.т.н. О.А. Ягуновой, к.т.н. А.А. Витько, к.г-м.н. А.И. Кемерова.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 6 в изданиях, включенных в «Перечень российских рецензируемых научных журналов» ВАК Минобрнауки РФ, 2 публикации в базе данных Scopus.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приводится общая характеристика работы, обосновывается ее актуальность, определяется цель, идея, задачи. Излагаются защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** дан обзор современного состояния угледобывающей отрасли Кузбасса, определена сущность загазованности угольных пластов метаном и его роль при добыче угля. Представлены сведения о природной газоносности угольных пластов и ее изменение с глубиной. Освещены перспективы добычи метана из угольных пластов. Выполнен анализ нормативной документации и описаны меры государственной поддержки при добыче метана из угольных пластов. Дана количественная оценка выбросов метана в атмосферу при добыче угля в Кузнецком угольном бассейне.

**Во второй главе** проведен анализ горно-геологических и горнотехнические условий освоения угольных месторождений Кузбасса с целью обоснования переоборудования геологоразведочных скважин для проведения заблаговременной

дегазации угольных пластов. Рассмотрены технологические особенности оборудования скважин для проведения плазменно-импульсного воздействия (далее ПИВ). Освещены изменения физико-механических свойств горных пород, результаты микросейсмического районирования радиуса воздействия и сведения о достигнутых дебитах дегазационных скважин после проведения ПИВ на угольный пласт. С учетом горно-геологических условий угольных месторождений с высокой природной газоносностью разработана конструкция разведочно-дегазационных скважин.

**В третьей главе** представлено обоснование основных геолого-технических критериев, определяющих методику разведки угольных месторождений с учетом использования многофункциональных разведочно-дегазационных скважин.

**В четвертой главе** представлена методика разведки угольных месторождений с учетом бурения многофункциональных скважин. Проведен прогнозный расчет количества извлекаемого метана по периодам проведения заблаговременной дегазации. Выполнен экономический анализ бурения многофункциональных скважин.

## ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

**1. Анализ современного состояния проблемы дегазации угольных месторождений показал, что увеличение выбросов метана в атмосферу с 10 до 17 $м^3$/т при сокращении добычи угля подземным способом объясняется изменением горно-геологических и горнотехнических условий освоения угольных месторождений Кузбасса. В связи с чем, возникает необходимость совершенствования методики разведки и технологии отработки с широким внедрением заблаговременной дегазации угольных пластов.**

Анализ результатов ранее выполненных исследований геологических и горнотехнических условий добычи угля подземным способом в Кузбассе, выявление экологических проблем, связанных с выбросами метана, позволяют обосновать необходимость разработки новых и совершенствования имеющихся методов изучения и освоения метаноугольных месторождений с высокой природной газоносностью.

В Кузбассе прогнозные ресурсы метана в угольных пластах оцениваются в 13 трлн $м^3$ (до отметки – 1500 м). Средняя плотность ресурсов метана в угольных пластах в расчете на площадь их оценки равна 716 млн $м^3/км^2$.

Метан угольных пластов как полезное ископаемое в настоящее время оценивается с двух принципиально различных позиций, отражающих его двойственную геолого-экономическую сущность – как самостоятельного полезного ископаемого, так и попутного.

Добыча метана как самостоятельного полезного ископаемого может осуществляться самостоятельным газовым промыслом по принципу экономической целесообразности и потребности в газе. Такая добыча метана начата в Кузбассе в 2010 г. ООО «Газпром добыча Кузнецк» на Талдинском месторождении в рамках опытно-промышленной разработки метаноугольного месторождения.

Метан как попутное полезное ископаемое представляет собой углеводородный газ, извлеченный из угольных пластов посредством шахтной дегазации при добыче угля с целью обеспечения безопасности ведения горных работ подземным способом. Шахтная дегазация применяется в Кузбассе более 60 лет и на сегодняшний день является основным направлением извлечения метана из угольных пластов.

Согласно постановлению Правительства РФ № 315 от 25.04.2011 г. проведение дегазации угольных пластов при превышении природной газоносности 13 м$^3$/т с.б.м. является обязательным. В ряде стран данный порог уже снижен до 9 м$^3$/т с.б.м. Несвоевременное проведение дегазационных работ приводит к снижению уровня безопасности и ограничению нагрузок на очистной забой.

Данные о природной газоносности угольных пластов по основным районам Кузнецкого угольного бассейна сводятся к наличию высокой природной газоносности (более 10 м$^3$/т с.б.м.) уже на глубине 300–500 м от поверхности земли, что в среднем соответствует нулевому абсолютному горизонту. На основании имеющихся многочисленных данных построен график изменения градиента природной газоносности угольных районов Кузбасса по горизонтам (см. рис. 1.).

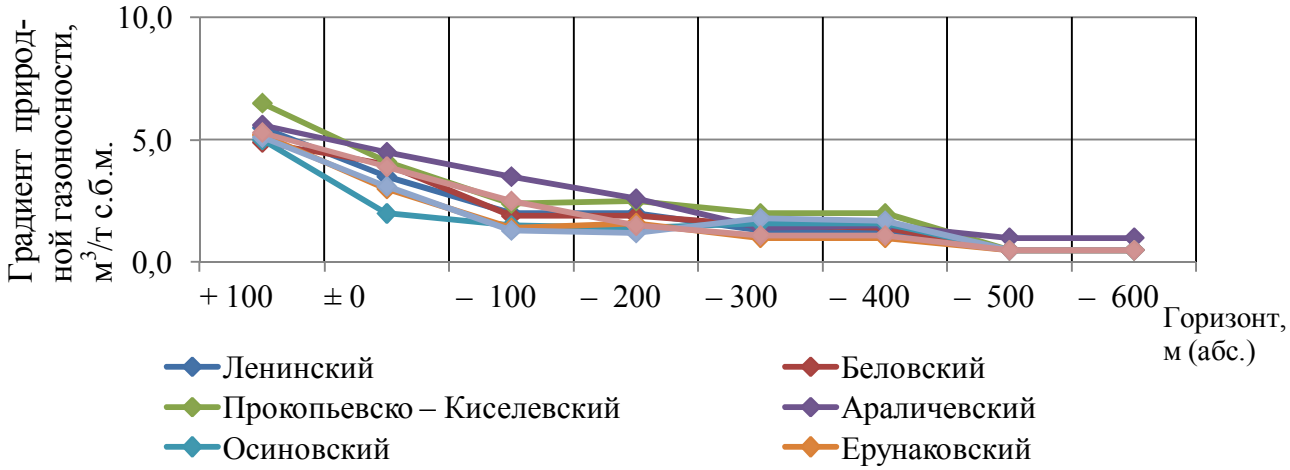


Рис. 1 – График изменения градиента природной газоносности угольных районов Кузбасса по горизонтам

На основании представленного графика, можно говорить о снижении градиента природной газоносности угольных пластов с глубиной. Также следует отметить, что снижение проницаемости пластов имеет аналогичный характер. Следовательно, интервал залегания угольных пластов от ± 0 м (абс.) до – 300 м (абс.) будет представлять наибольший интерес для развития новых эффективных способов дегазации, чем верхние и нижние горизонты.

Высокая природная газоносность создает настолько повышенное метановыделение в выработанное пространство и горные выработки шахт, что безопасная добыча угля возможна только с применением комплексной дегазации угольных пластов, т.е. совмещения различных способов или схем дегазации одного или нескольких источников газовыделения. К методам дегазации, позволяющим снижать природную газоносность до начала ведения очистных работ, относятся барьерная и предварительная дегазация, а также недостаточно применяемая в России заблаговременная дегазация.

Основными источниками газовыделения при ведении горных работ являются угольный пласт, породы кровли и почвы, отбитый уголь, пласты-спутники, отщепившиеся угольные пачки и т.д. Геомеханические и газодинамические процессы, возникающие в результате ведения горных работ, являются взаимосвязанными процессами и представляют собой сложно прогнозируемую

систему. В этой связи для обеспечения безопасных условий добычи угля необходимо применение заблаговременной дегазации, что позволит снизить газовыделение от основных источников в выработанное пространство до начала работ по добыче угля.

На сегодняшний день угледобывающими предприятиями Кемеровской области добывается около 60 % от общей добычи угля в России. При этом большая часть угольных шахт отнесена к сверхкатегорным и опасным. Следует отметить, что относительная газообильность сверхкатегорных шахт в ряде случаев в несколько раз превышает критерий отнесения шахты к сверхкатегорной и составляет 100 м³/т и более.

По результатам расследований причин серии взрывов на угольных шахтах произошедших в Кузбассе в 2004–2010 гг. были разработаны новые нормативно-технические требования к обеспечению безопасности угледобычи. С целью стимулирования развития добычи метана из угольных пластов были приняты различные меры поддержки угледобывающих предприятий: снижены налоговые ставки на прибыль до 13,5 %, на имущество – до 0 % и т.д. В 2012 г. Федеральным законом № 278-ФЗ, метан угольных пластов признан отдельным видом полезного ископаемого и согласно п. 2 ст. 336 не признан объектом налогообложения. Внесенные изменения являются существенной поддержкой развития добычи метана из угольных пластов в промышленных масштабах, а также стимулируют обеспечение безопасной добычи за счет производства различных видов дегазации угольных пластов.

За период 2005–2014 гг. добыча угля в Кузбассе увеличилась с 149 до 183 млн.т. При этом следует отметить ежегодное снижение объема добычи угля подземным способом. В настоящее время добыча угля открытым способом составляет 64 % от общей добычи угля по Кузнецкому бассейну. В первую очередь это объясняется более низкой себестоимостью открытой разработки угольных месторождений в связи с отсутствием необходимости проводить работы по дегазации угольных пластов, так как добыча угля ведется в зоне метановыветривания. Более наглядно это представлено в виде диаграммы на рис. 2.

Рис. 2 – Объемы добычи угля открытым и подземным способом за 2005-2014 гг.

Следует отметить, что к отработке наиболее экономичным открытым способом добычи угля в Кузнецком бассейне возможно отнести лишь 20 % из числящихся на государственном балансе запасов каменного угля. Из этого следует, что подземный способ добычи угля в будущем неизбежно будет являться основным, в связи с чем и возникает идея заблаговременной подготовки шахтных полей к дальнейшей безопасной добыче угля подземным способом. С целью проведения дальнейшего

анализа объемов добычи угля и выбросов метана, на рис. 3 представлена информация о количестве выбросов метана в атмосферу за 2004–2014 гг., полученная в территориальном органе Федеральной службы государственной статистики по Кемеровской области.

Информация, представленная на рис. 3, наглядно отражает увеличение объёма выбросов метана в атмосферу угледобывающими предприятиями Кузбасса за последнее десятилетие, это связано с осложнением горно-геологических условий освоения месторождений с высокой природной газоносностью и повышенным вниманием к проведению дегазации угольных пластов после серии взрывов метана на угольных шахтах, произошедших в 2004–2007 гг.

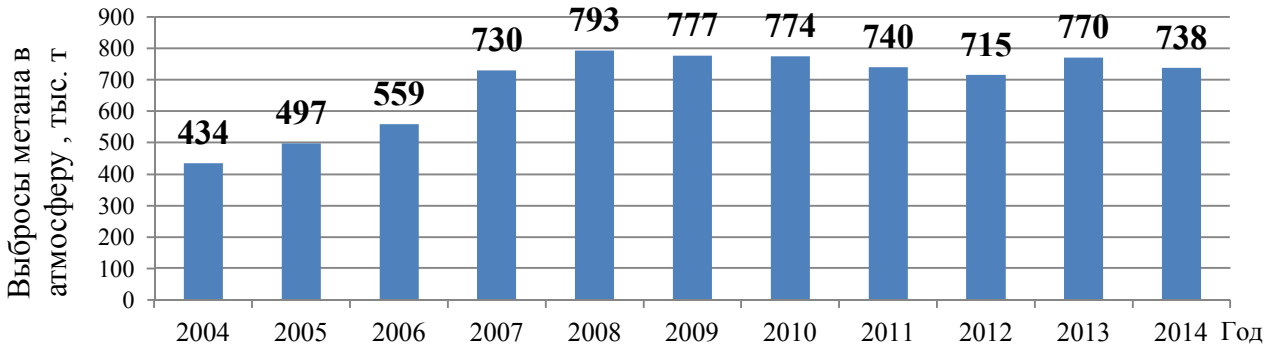


Рис. 3 – Сведения о количестве выбросов метана в атмосферу за 2004–2014 гг. по Кузнецкому бассейну

Учитывая особенности строения метаноугольных месторождений, добыча угля открытым способом в основном ведется в зоне газового выветривания. На рис. 4 представлен сравнительный анализ объемов добычи угля подземным способом и объемов выбросов метана в атмосферу.

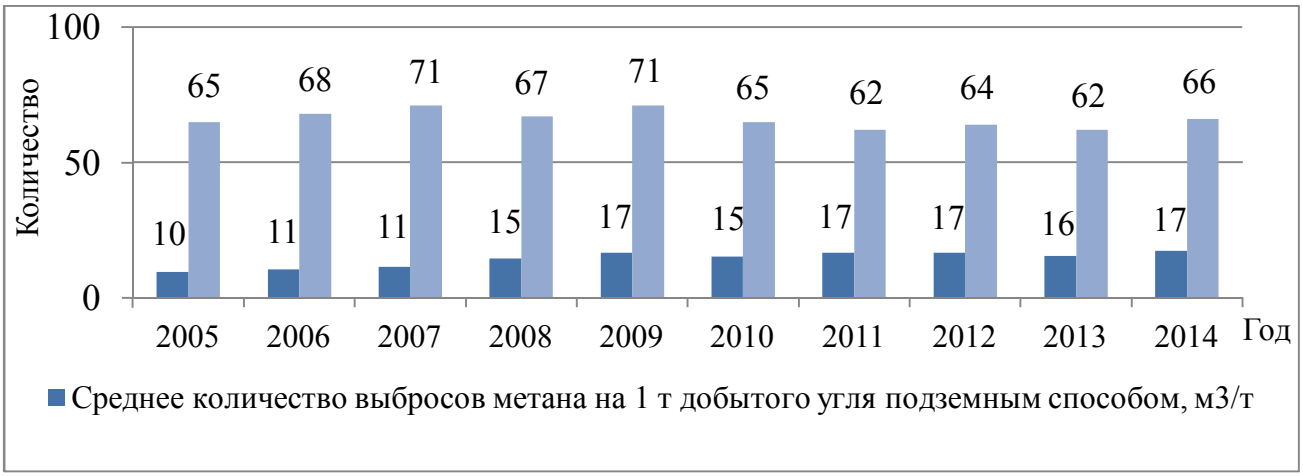


Рис. 4 – Сравнительный анализ выбросов метана в атмосферу и добычи угля подземным способом в период с 2005–2014 гг.

Как видно на рис. 4, в последние годы наблюдается увеличение количества выбросов метана в атмосферу, несмотря на сокращение объемов добычи угля подземным способом. Средний объем выбросов метана с 1 т добытого угля подземным способом за последнее десятилетие увеличился с 10 до 17 м$^3$/т.

**2. Переоборудование геологоразведочных скважин в соответствии с разработанной конструкцией и технологией бурения позволяет обеспечить многофункциональность их использования: проведение геологического изучения и заблаговременной дегазации угольных пластов. При этом производство дегазации с целью обеспечения безопасной добычи угля подземным способом осуществляется с более рациональным использованием периода времени на проектирование и строительство угледобывающего предприятия.**

Основной проблемой эффективного извлечения метана из угольных пластов являются низкие дебиты скважин, поэтому в последние десятилетия ведется активная работа по совершенствованию и разработке новых методов воздействия на угольный пласт для увеличения их проницаемости. В результате выполненных исследований американскими, австралийскими, канадскими, китайскими и российскими научно-исследовательскими институтами разработано множество способов воздействия на угольный пласт. При этом самым распространенным является гидроразрыв пласта (более 80 %) и способ кавитации(менее 8 %). Остальные способы применяются гораздо реже.

По оценке иностранных специалистов при проницаемости пластов менее 1 мД бурение дегазационных скважин совершенно бесперспективно. Угольный пласт обладает хорошей акустической проводимостью, поэтому создание и увеличение амплитуды колебаний ведет к расширению трещин в пласте на участке с повышенной проницаемостью, где начинает концентрироваться свободный газ, который запускает процесс образования микротрещин.

С учетом этого возникла идея заблаговременно искусственно стимулировать круговую (угловую) частоту свободных колебаний, синхронизировать динамическую систему, за счет этого создать в угольном пласте развитую сеть микротрещин, чтобы максимально перевести газ в свободное состояние, а затем отобрать его через вертикальные скважины.

С этой целью была разработана технология плазменно-импульсного широкополосного периодического направленного управляемого воздействия на угольный пласт, которая коренным образом отличается от традиционных технологий, основанных на линейных зависимостях.

Прибор для производства ПИВ «Приток-М1» был разработан и применен на практике группой российских компаний ООО «Новас» и ООО «Георезонанс». Данный прибор способен создать нелинейную зависимость между источником колебаний и объектом разработки за счет чего заблаговременно инициировать процесс самомодуляции в угольном пласте с тем, чтобы перевести газ в свободное состояние с последующим отбором его через вертикальные скважины.

Преимуществами метода ПИВ являются экологическая чистота, быстрая обработка скважины и вывод ее на рабочий режим. Именно по этим причинам в данной работе рассматривается переоборудование геологоразведочных скважин в многофункциональные скважины с применением данной технологии воздействия на угольные пласты. Комплектность оборудования для производства ПИВ представлена на рис. 5.

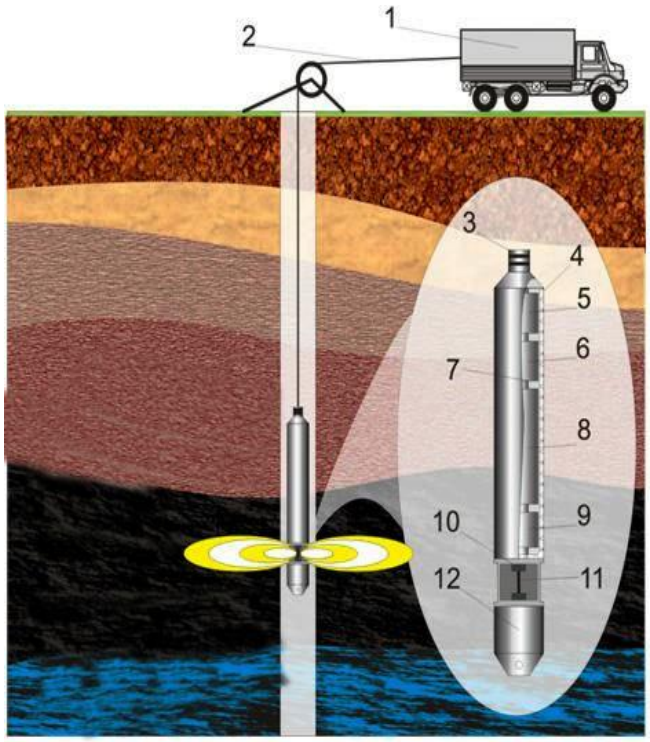


Рис. 5 – Комплектность оборудования для производства ПИВ на угольный пласт:
1 – каротажный подъемник;
2 – геофизический кабель;
3 – соединение с геофизическим кабелем;
4 – корпус скважинного прибора;
5 – высоковольтный трансформатор;
6 – высоковольтный блок;
7 – соединительные линии;
8 – блок накопительных конденсаторов;
9 – устройство управления прибором;
10 – электроды излучателя;
11 – плазменный канал; 12 – корпус с устройством для формирования плазменного канала

Скважина является сложным сооружением, строительство которого требует значительных материальных, транспортных и трудовых затрат. Конструкция скважины в первую очередь определяется ее назначением и горно-геологическими условиями. Основная цель геологоразведочных скважин – получение необходимых геологических данных о строении и качестве полезных ископаемых. Основная цель скважин заблаговременной дегазации – обеспечить подготовку шахтного поля к безопасной разработке угольных пластов с высокой природной газоносностью.

В настоящее время выполняются огромные объемы бурения геологоразведочных скважин в процессе разведки месторождений. Затем при освоении высокогазоносных месторождений также бурятся дегазационные скважины для проведения барьерной, предварительной и других видов дегазации. Объем буровых работ составляет до110 тыс. м. в год на одну выемочную единицу. Анализ использования различных технологий дегазации и выполненные исследования позволили представить в диссертации варианты переоборудования геологоразведочных скважин для производства заблаговременной дегазации на примере трех ранее разведанных месторождений.

В частности установлено, что для сооружения многофункциональной разведочно-дегазационной скважины, в процессе проектирования ГРР необходимо предусмотреть следующие работы:

1) провести необходимые геофизические исследования в скважинах с целью определения зоны интенсивно трещиноватых пород и водоносных горизонтов;

2) предусмотреть обсадку скважин на всю глубину зоны интенсивно трещиноватых пород и водоносных горизонтов;

3) выполнить цементацию затрубного пространства в интервале вышеуказанных зон;

4) рассчитать необходимое количество поливинилхлоридовых (стеклопластиковых) обсадных и перфорированных труб;

5) строительство зумпфа глубиной 60–80 м от почвы нижнего газоносного пласта для производства откачки воды из скважины при выводе ее на рабочий режим.

Фактическая конструкция геологоразведочных скважин принята согласно разработанным геолого-техническим нарядам (ГТН) и показана в графах 2, 3 и 4 на рис. 6.

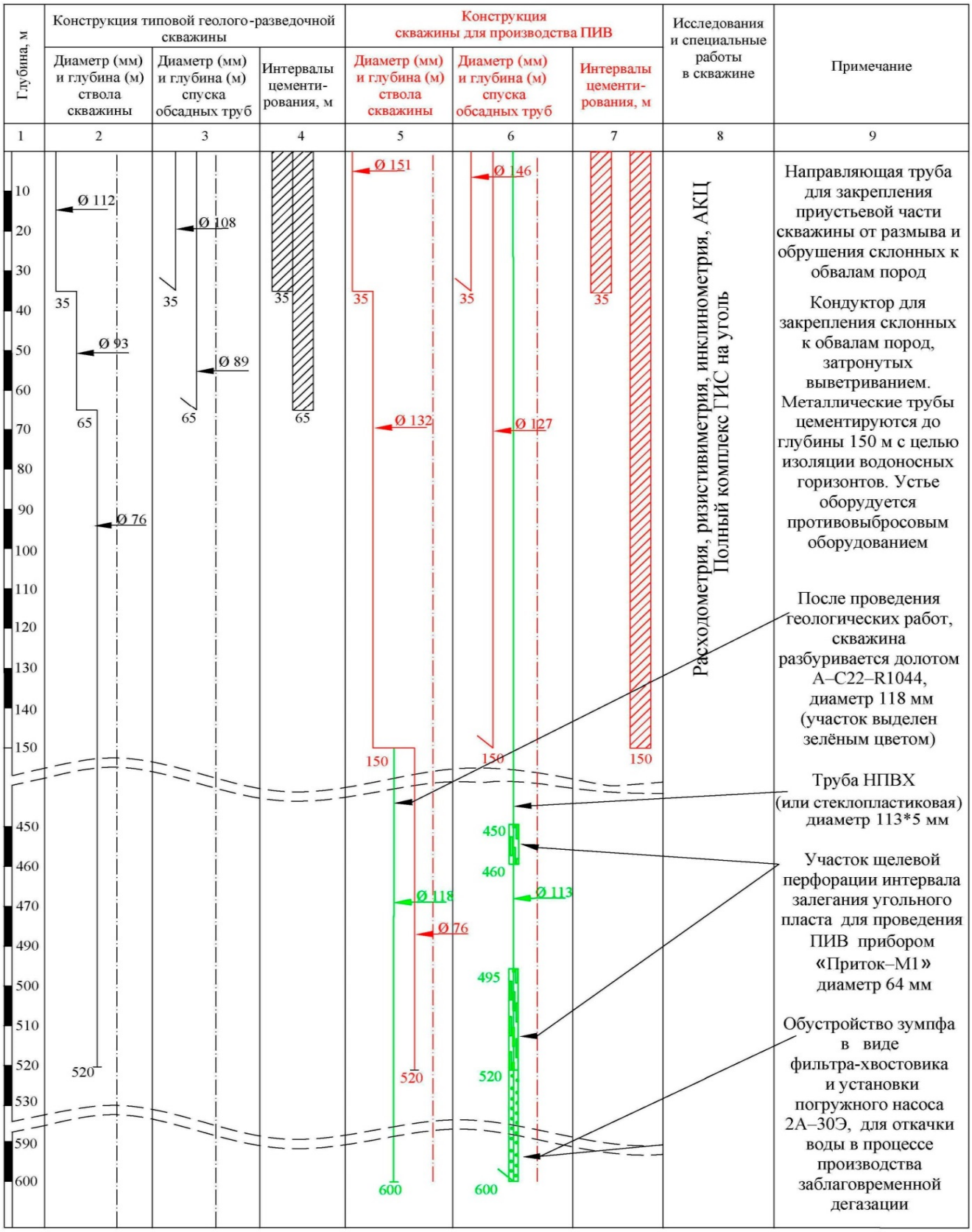


Рис. 6 – Типовая конструкция разведочно-дегазационной скважины для производства ПИВ (участок I)

Учитывая целевое назначение скважины, разработанный вариант их бурения и переоборудования предусматривает их строительство в два этапа:

**первый этап** заключается в строительстве скважины с целью проведения геологического изучения участка;

**второй этап** предусматривает ее переоборудование с целью производства заблаговременной дегазации угольных пластов в участках шахтного поля с высокой природной газоносностью. Данный этап строительства (переоборудования) скважины обозначен в графах 5, 6 и 7 на рис. 6 зеленым цветом.

Таким образом, предложенная технология бурения многофункциональных скважин позволяет решать две производственные задачи:

1) проведение геологической разведки с учетом требований нормативных документов к ведению ГРР при изучении геологического строения;

2) проведение заблаговременной дегазации угольных пластов с целью обеспечения безопасных условий угледобычи.

Критериями для выделения участков месторождений или участков шахтных полей для производства заблаговременной дегазации будут являться пространственные границы лицензионного участка и площадь участка с природной газоносности от 13 $м^3$/т с.б.м., как правило местоположение данной границы уже определено при проведении предыдущей стадии ГРР.

В качестве разностороннего примера, необходимого для обоснования изменения методики геологического изучения, дегазации и отработки метаноугольных месторождений, выбрано три принципиально разных ранее разведанных геологических участка (далее участок I, участок II и участок III). Ранжирование данных участков метаноугольных месторождений согласно требованиям нормативных документов к классификации категорий месторождений по количеству запасов полезных ископаемых показало, что из представленных трех вариантов, с точки зрения категории месторождений по величине запасов коксующихся углей, участок I относится к категории мелких месторождений, участок II соответствует средней группе, а участок III является крупным месторождением. Но если данные месторождения классифицировать по величине запасов метана, то ни одно из них не может быть отнесено даже к категории мелких.

На основании вышеизложенного следует вывод, что рассматриваемые метаноугольные месторождения (как и большинство других) по величине запасов метана в большей степени можно классифицировать как мелкие и очень мелкие, что определяет основную цель извлечения метана из угольных пластов – обеспечение безопасной отработки метаноугольных месторождений. Однако при соответствующей доработке и совершенствовании технологии добычи метана разработанная методика позволяет на более ранних этапах освоения месторождения приступить к проведению заблаговременной дегазации участков шахтного поля с высокой природной газоносностью, а также может послужить развитием комплексного освоения метаноугольных месторождений.

**3. Совершенствование методики проведения геологоразведочных и дегазационных работ путем сооружения многофункциональных (разведочно-дегазационных) скважин позволяет производить эффективную дегазацию угольных пластов и заблаговременно (в течение 5–9 лет) подготавливать метаноугольные месторождения к безопасной добыче угля подземным способом.**

Несмотря на отсутствие достаточной изученности природной газоносности угольных пластов при составлении проекта ГРР, имеется ряд факторов, позволяющих рассматривать необходимость производства заблаговременной дегазации отдельных участков шахтных полей на более ранних стадиях изучения геологического строения месторождения. Такими факторами являются:

1) глубина залегания угольных пластов шахтного поля (500–1000 м);

2) данные о природной газоносности прилегающих участков;

3) сроки строительства угледобывающего предприятия.

Работы по геологическому изучению недр проводятся в соответствии с утвержденной проектной документацией. Согласно требованиям ФЗ «О недрах» (ст. 23.2 п. 9), пользователь недр обязан обеспечить сохранность разведочных горных выработок и буровых скважин, которые могут быть использованы при разработке месторождений и в иных хозяйственных целях. Следовательно, обеспечение сохранности геологоразведочных скважин и их переоборудование для производства заблаговременной дегазации необходимо обосновывать при составлении проектной документации. Цель бурения скважин на метаноугольных месторождениях не должна сводиться только к геологическому изучению. Предусмотрев на этапе составления проекта ГРР необходимое количество геологоразведочных скважин и возможность их переоборудования в дегазационные, обеспечивается оптимизация разведочных сетей. При этом появляется возможность более рационально использовать период времени проектирования и строительства предприятия для снижения природной газоносности до начала добычи угля.

Составление методики ГРР и разработки технологии сооружения многофункциональных скважин необходимо выполнять, учитывая данные о природной газоносности месторождения, полученные в результате:

1) проведения поисково-оценочной стадии разведочных работ;

2) анализа данных о природной газоносности смежных участков.

Количество скважин, их глубина и расположение зависят от многих факторов, которые рассматриваются индивидуально по каждому участку. Сравнительная оценка влияния плотности разведочной сети на величину площади перекрытия участка при производстве заблаговременной дегазации представлена в таблице 1, из которой видно, что переоборудование геологоразведочных скважин в дегазационные для проведения заблаговременной дегазации позволяет дегазировать от 15 до 100 % площади участка при радиусе воздействия на пласт 200–300 м. Следует подчеркнуть, что переоборудование скважин рекомендуется производить не по всему участку, а только на площади шахтного поля с высокой природной газоносностью.

Для иллюстрации вышеизложенного предложения в диссертации представлена аналитическая информация по применению переоборудованных геологоразведочных скважин на примере ранее разведанных участков I, II и III.

На рис. 7 представлен план горных работ по пласту 3 по участку I с обозначением радиуса воздействия 200 м. При проведении детальной разведки участка было пробурено 37 скважин. На стадии составления проекта ГРР, учитывая природную газоносность Кузнецкого угольного бассейна, можно было предусмотреть переоборудование 25 скважин для дальнейшего проведения заблаговременной дегазации угольных пластов. Данный радиус обеспечивает перекрытие площади скважинами заблаговременной дегазации до 60 %. Для обеспечения полного перекрытия участка сетью скважин для проведения

заблаговременной дегазации имеет смысл оценивать необходимость бурения дополнительных скважин на стадии составления проекта ГРР, так как это, в свою очередь, предоставляет возможность произвести подсчет запасов угля по более достоверным, с точки зрения геологической изученности категориям (А и В). Следует отметить, что бурение горизонтальных направленных скважин в процессе подготовки выемочных участков, позволит произвести дополнительно воздействие на угольный пласт в теле лавы и повысить дебит разведочно-дегазационных скважин, в результате чего дегазация выемочного участка будет проведена наиболее эффективно и рационально.

Таблица 1 – Сравнительная оценка влияния плотности разведочной сети на величину площади перекрытия участка при производстве заблаговременной дегазации

| Радиус воздействия разведочно-дегазационных скважин на пласт, м | Категория запасов | Расстояние между разведочными линиями по категориям запасов, м | Расстояние между скважинами на линиях по категориям запасов, м | Влияние плотности разведочной сети на площадь перекрытия участка дегазации, % |
|---|---|---|---|---|
| 200 | А | 600–800 | 200–400 | 45–78 |
| | В | 800–1200 | 400–600 | 20–45 |
| | $C_1$ | До 2000 | До 1000 | 15–28 |
| 300 | А | 600–800 | 200–400 | 72–100 |
| | В | 800–1200 | 400–600 | 35–75 |
| | $C_1$ | До 2000 | До 1000 | 15–28 |

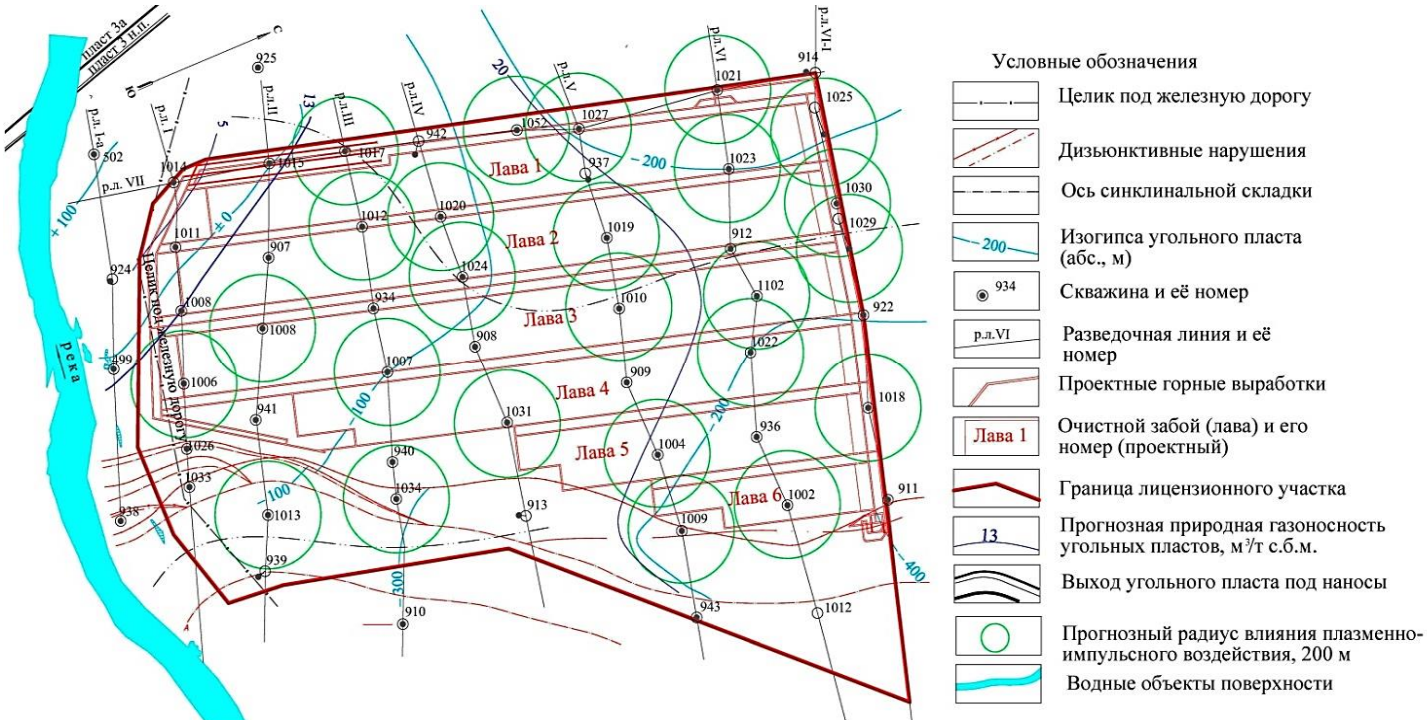


Рис. 7 – План горных работ по пласту 3 с переоборудованными скважинами для производства заблаговременной дегазации (участок I)

Учитывая горно-геологические условия для данного участка, подземный способ добычи угля на участке I будет являться основным. Снижение природной газоносности до ввода в работу выемочных участков позволит обеспечить высокопроизводительную и безопасную добычу угля.

Также был проведен анализ по многофункциональному использованию геологоразведочных скважин на примере участков II и III. Учитывая размеры участков и степень геологической изученности, количество многофункциональных скважин, по участку II составило 128, а по участку III – 35 скважин. Сравнительная оценка влияния плотности разведочной сети на величину площади перекрытия участка при производстве заблаговременной дегазации по участкам I, II и III представлена в таблице 2.

На основании данных геологических отчетов рассматриваемых участков и результатов ПИВ на угольные пласты, выполненного в рамках НИОКР ООО «Георезонанс», в диссертации представлен прогнозный расчет количества извлекаемого метана (Qизвл. м) и остаточной природной газоносности (Мост) типовых участков с учетом производства заблаговременной дегазации переоборудованными геолого-разведочными скважинами за период освоения до 10 лет. Построенные графики снижения природной газоносности для участков с различным количеством переоборудованных и дополнительно пробуренных скважин представлены на рис. 8, 9 и 10. Таким образом при среднем дебите метана по скважинам в объеме 1300–2000 м$^3$/сут, для снижения природной газоносности до 13 м$^3$/т с.б.м. потребуется от 5 до 9 лет.

Таблица 2 – Сравнительная оценка влияния плотности разведочной сети на величину площади перекрытия участка при производстве заблаговременной дегазации по участкам I, II и III

| Номер участка | Площадь участка, км$^2$ | Сведения о разведочной сети | | | | Площадь участка с высокой природной газоносностью (более 13 м$^3$/ч с.б.м.), км$^2$ | Количество скважин для переоборудования с целью проведения заблаговременной дегазации, скв. | Суммарная площадь депрессионных воронок переоборудованных скважин (с учетом перекрытия депрессионной воронки), км$^2$ | Перекрытие площади участка дегазации переоборудованными скважинами, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Количество пробуренных скважин | Максимальная глубина скважин, м | Средняя плотность разведочной сети, скв. на 1 км$^2$ | Суммарный объем бурения, тыс.пог.м | | | | |
| I | 4,8 | 37 | 550 | 7,8 | 15,8 | 4 | 25 | 2,4 | 60 |
| II | 16,0 | 204 | 900 | 12,7 | 66,7 | 13,7 | 128 | 11,7 | 84 |
| III | 83,1 | 50 | 870 | 2,2 | 60 | 19,6 | 35 | 4,3 | 22 |

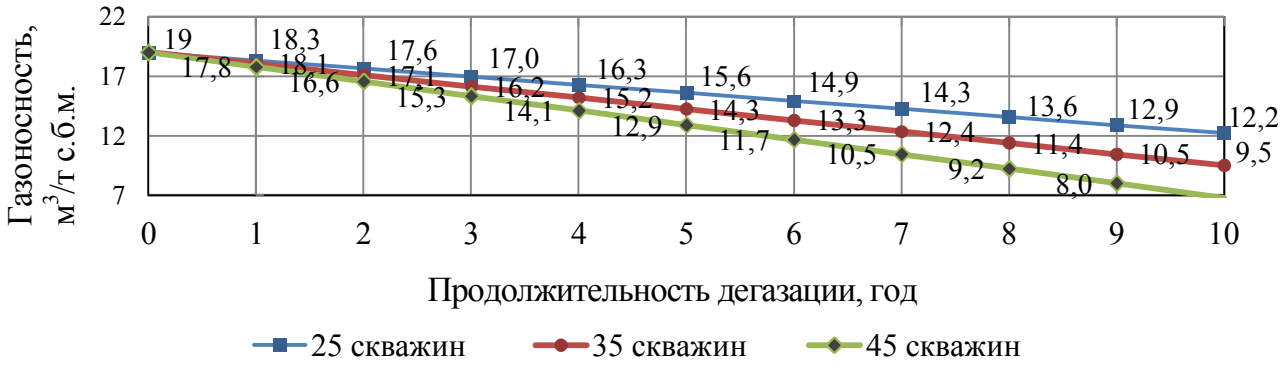


Рис. 8 – График снижения природной газоносности по участку I

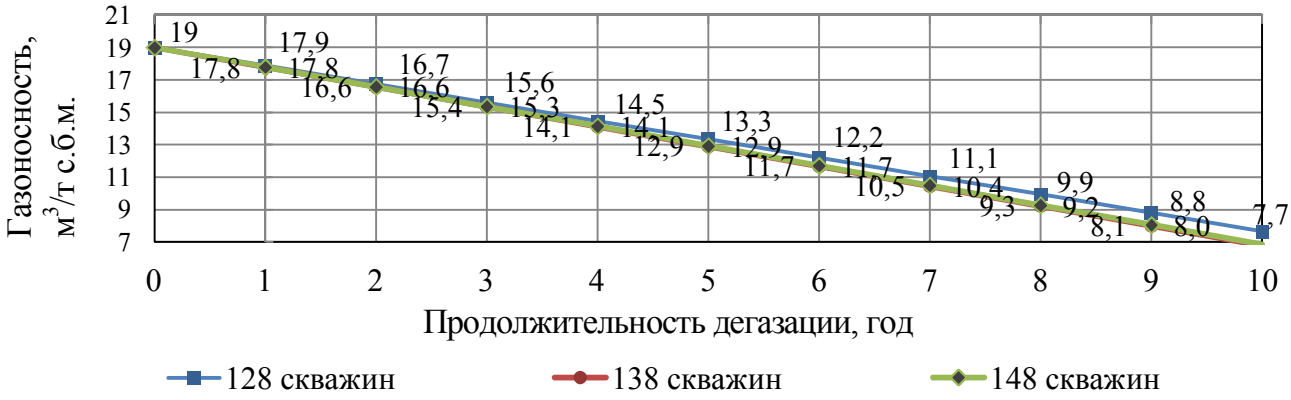


Рис. 9 – График снижения природной газоносности по участку II

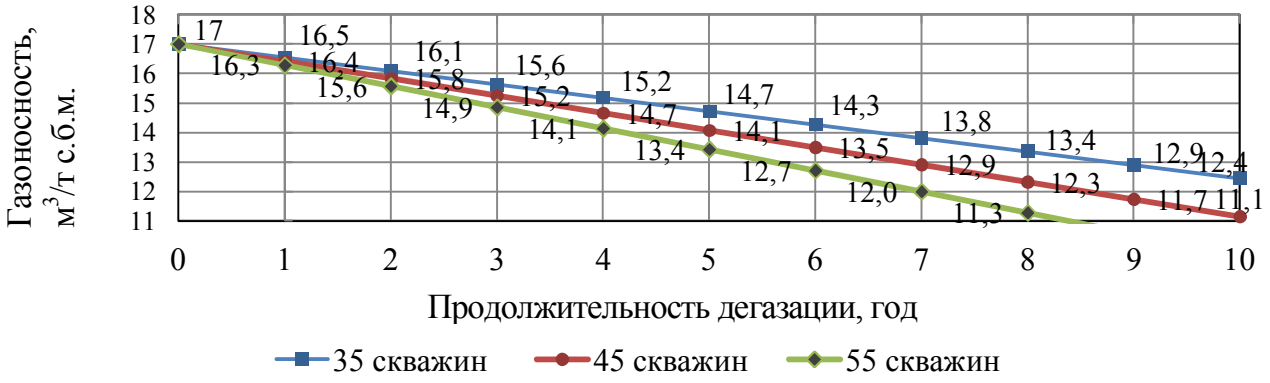


Рис. 10 График снижения природной газоносности по участку III

С целью всестороннего анализа влияния экономической составляющей переоборудования геологоразведочных скважин, составлен сметный расчет на бурение типовой геологоразведочной скважины по участку I, а также в диссертации представлен сметный расчет затрат на переоборудование данной скважины. Аналогично выполнен сметный расчет по строительству и переоборудованию разведочно-дегазационных скважин по участкам II и III. Результаты расчета затрат на переоборудование данных типовых геологоразведочной скважины по участкам отражены в сводной таблице 3.

Таблица 3 – Сводная смета затрат на бурение и переоборудование геологоразведочных скважин

| Номер участка | Стоимость бурения геологоразведочной скважины, руб. | Стоимость геологоразведочной скважины с учетом переоборудования, руб. | Увеличение стоимости с учетом переоборудования, руб. |
|---|---|---|---|
| I | 4 038 524 | 5 085 192 | 1 046 668 |
| II | 3 831 824 | 4 916 923 | 1 085 099 |
| III | 4 698 644 | 6 001 889 | 1 303 245 |

Дальнейший анализ экономических показателей, представленный в таблице 4, основан на сопоставлении затрат на переоборудование с общими затратами на разведку 1 т запасов угля и себестоимостью 1 т товарной продукции по технико-экономическому обоснованию кондиций для подсчета запасов угля (далее ТЭО) с учетом данных, представленных в таблице 3.

Таблица 4 – Анализ экономических показателей рассматриваемых участков и экономической составляющей при производстве переоборудования скважин

| Номер участка | Себестоимость единицы товарной продукции по ТЭО, руб./т | Сметная стоимость ГРР на стадии разведки, млн руб. | Затраты на разведку 1 т запасов угля, руб./т | Сметная стоимость геологоразведочной скважины, млн руб. | Сметная стоимость переоборудованной скважины, млн руб. | Общая сметная стоимость переоборудования скважин по участку дегазации, млн руб. | Затраты переоборудования скважин на разведку 1 т запасов угля, руб./т | Увеличение затрат на разведку 1 т запасов угля в связи с переоборудованием, % | Увеличение себестоимости 1 т товарной продукции по ТЭО за счет переоборудования геологоразведочных скважин, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| I | 1792 | 84, 4 | 2,4 | 4,0 | 5,1 | 26,2 | 0,74 | 31 | 0,04 |
| II | 2040 | 561, 0 | 2,3 | 3,8 | 4,9 | 138,9 | 0,56 | 24 | 0,03 |
| III | 852 | 321,2 | 0,38 | 4,7 | 6,0 | 44,3 | 0,05 | 14 | 0,01 |
| Среднее | 1530 | 322 | 1,7 | 4,2 | 5,3 | 69,8 | 0,5 | 23 | 0,03 |

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1) в процессе работы выполнен анализ выбросов метана в атмосферу при добыче угля в Кузбассе открытым и подземным способом, позволивший установить изменение горно-геологических и горнотехнических условий добычи угля подземным способом;

2) доказано, что горно-геологические, экологические и экономические условия добычи угля требуют совершенствования методики геологического изучения, проектирования и отработки метаноугольных месторождений;

3) на основе сведений о природной газоносности угольных районов Кузбасса, теоретических исследований, включающих в себя анализ и обобщение данных государственной статистики, баланса полезных ископаемых, нормативных и литературных источников, а также публикаций научно-исследовательских работ по проблематике исследований, впервые научно обоснована возможность производства заблаговременной дегазации с применением переоборудованных геологоразведочных скважин;

4) разработана конструкция геологоразведочной скважины и технология ее переоборудования для производства заблаговременной дегазации угольных пластов;

5) предложен вариант оптимизации геологоразведочных, проектных и производственных работ, направленных на создание возможности на стадии составления проекта ГРР обосновывать расположение разведочных скважин с учетом их переоборудования для производства заблаговременной дегазации;

6) методом аналогии выполнен сравнительный анализ эффективности применения многофункциональных скважин для безопасного освоения угольных месторождений с высокой природной газоносностью;

7) установлена экономическая целесообразность переоборудования и многофункционального использования разведочно-дегазационных скважин;

8) доказано, что переоборудование геологоразведочных скважин в разведочно-дегазационные позволяет более рационально использовать период времени строительства угледобывающего предприятия на проведение заблаговременной дегазации угольных пластов, так как ее эффективность во многом зависит от времени эксплуатации скважин.

Полученные результаты работы представляют научный и практический интерес для пользователей недр, геологоразведочных и проектных организаций.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Статьи в изданиях рекомендованных ВАК РФ:**

1. **Шубина, Е.А.** Изучение природной газоносности с целью развития добычи метана из угольных пластов в промышленных масштабах / **Е.А. Шубина,** В.Г. Лукьянов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – Кемерово: Изд. Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева. – 2016. – №. 1(113). – С. 3–11.

2. **Шубина, Е.А.** Проектирование геологоразведочных работ с целью использования скважин для производства заблаговременной дегазации угольных пластов / **Е.А. Шубина**, В.И. Брылин, В.Г. Лукьянов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М: Изд. «Горная книга». – 2015. – №. 8. – С. 250–253.

3. **Шубина, Е.А.** Направление развития угольной промышленности в области недропользования и налогообложения с целью стимулирования развития добычи метана в промышленных масштабах / **Е.А. Шубина**, В.Г. Лукьянов // Известия Томского политехнического университета. – Томск: Изд. ТПУ, Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326, № 12. – С. 131–139.

4. **Шубина, Е.А.** Проблемные вопросы расчета газовыделения в выемочный участок с учетом геомеханических и газодинамических процессов и методы их решения

/ **Е.А. Шубина**, В.Г. Лукьянов // Известия Томского политехнического университета. – Томск: Изд.ТПУ. – 2015. – Т. 326, № 3. – С. 13–18.

5. **Шубина, Е.А.** Проектирование геологоразведочных работ с учетом многофункционального использования скважин с целью снижения природной газоносности угольных пластов. **Е.А. Шубина,** В.И. Брылин, В.Г. Лукьянов // Известия Томского политехнического университета. – Томск: Изд. ТПУ. – 2014. – Т. 324, № 1. – С. 167–173.

6. **Шубина, Е.А.** Проектирование геологоразведочных работ с целью использования скважин для производства заблаговременной дегазации угольных пластов / **Е.А. Шубина**, В.Г. Лукьянов // Горный информационно–аналитический бюллетень. – М.: Изд. «Горная книга». – 2016. – № 10. – С. 377–389.

**В базе данных Scopus:**

7. **Shubina, E.A.** Stimulation of commercial coal seam methane production aimed at improving mining technology / **E.A. Shubina** and V. G. Lukyanov // Nature geoscience. – Nature Publishing Group. – 2016. DOI:1038/ngeo2695. С. 012098. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – Vol. 43. – P. 1–6.

8. **Shubina, E.A**. Exploration drilling for pre–mining gas drainage in coal mines / **E.A**. **Shubina**, V.I. Brylin , V.G.Lukyanov , T.V. Korotchenko. В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Сер. «Scientific and Technical Challenges in the Well Drilling Progress». DOI: 10.1088/1755–1315/24/1/012007. – С. 012007. – 2015. – Vol. 2. – P. 1–7.

**В прочих изданиях и материалах конференции:**

9. **Шубина, Е.А.** Проектирование геологоразведочных работ с учетом многофункционального использования скважин с целью снижения природной газоносности угольных пластов / **Е.А. Шубина**; В.И. Брылин // Труды XVII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск: Изд. ТПУ. – 2013. – Т. 2. – С. 283–285.

10. **Шубина, Е.А.** Проведение заблаговременной дегазации угольных пластов с использованием геологоразведочных скважин / **Е.А. Шубина**, В.Г. Лукьянов // Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. – Новокузнецк: СибГИУ. – 2014. – Вып. 16. – С. 16–23.

11. **Шубина, Е.А.** Проблемные вопросы расчета газовыделения в выемочный участок с учетом геомеханических и газодинамических процессов, и методы их решения / **Е.А. Шубина**, В.Г. Лукьянов // Труды XVIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск: Изд. ТПУ. – 2014. – Т. 2. – С. 483–484.

12. **Шубина, Е.А.** Проектирование геологоразведочных работ с учетом многофункционального использования скважин с целью снижения природной газоносности угольных пластов / **Е.А. Шубина**, В.И. Брылин, В.Г. Лукьянов // Проблемы научно–технического прогресса в бурении скважин: сборник докладов Всероссийской научно–технической конференции с международным участием. – Томск: Изд. ТПУ. – 2014. – С. 105–118.

13. **Шубина, Е.А.** Проблемные вопросы расчета газовыделения в выемочный участок с учетом геомеханических и газодинамических процессов и методы их решения / **Е.А. Шубина**, В.Г. Лукьянов // Труды XIX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск: Изд. ТПУ. – 2015. – Т. 2. – С. 457–459.

14. **Шубина, Е.А.** Проблемные вопросы расчета газовыделения в выемочный участок с учетом геомеханических и газодинамических процессов и методы их решения / **Е.А. Шубина**, В.Г. Лукьянов // Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. – Новокузнецк.: Изд. СибГИУ. – 2015. – Вып. 17. – С. 23–30.

15. **Шубина, Е.А.** Стимулирование развития добычи метана в промышленных масштабах с целью совершенствования подхода к отработке метаноугольных месторождений / **Е.А. Шубина**, В.Г. Лукьянов // Труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск: Изд. ТПУ. – 2016. – Т. 2. – С. 870–872.

Тираж 120. Заказ 428.

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.
Тел. (3822) 533018.