

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС») Минобрнауки России

На правах рукописи



Семыкин Юрий Анатольевич

**ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ДОБЫЧИ УГЛЯ НА ОСНОВЕ
ИНТЕНСИФИКАЦИИ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ИЗ ПЛАСТОВЫХ СКВАЖИН
И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДА ПРОГНОЗА ГАЗООБИЛЬНОСТИ
ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ**

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
проф., д-р техн. наук
Каркашадзе Г.Г.

Москва- 2016

Содержание

Введение	4
1 Состояние проблемы высокопроизводительной подземной разработки газоносных угольных пластов	11
1.1 Анализ горно-технологических факторов, влияющих на показатели разработки газоносных угольных пластов	11
1.2 Технико-технологические и экономические факторы эффективности разработки газоносных угольных пластов	17
1.3 Обобщение мирового опыта высокопроизводительной разработки газоносных угольных пластов	22
1.4 Выводы	35
2 Исследование источников метанобильности очистного забоя действующих и проектируемых выемочных участков угольных шахт	37
2.1 Исследование притоков в исходящую струю из очистного забоя	37
2.2 Исследование процесса дегазации отбитого угля в течение времени	48
2.3 Анализ влияния гранулометрического состава отбитого угля на притоки метана в исходящую из лавы струю	55
2.4 Выводы	63
3 Определение параметров метанобильности очистного забоя по результатам газовой съемки	65
3.1 Методика газовой съемки лавы в ремонтную смену для определения метанобильности угольного пласта	65
3.2 Методика расчета проницаемости угля очистном забое лавы перед очередными рабочими сменами	71
3.3 Методика определения распределения пластового давления метана вдоль очистного забоя	76
3.4 Шахтные исследования концентрации метана в исходящей из	81

лавы струе в процессе работы очистного комбайна	
3.5 Выводы	91
4 Обоснование технологических мероприятий по интенсификации дегазации отрабатываемого угольного пласта	93
4.1 Анализ притоков метана в лаву на основе производственной статистики	93
4.2 Обоснование метода пневматического воздействия на угольный пласт через дегазационные скважины	101
4.3 Производственные испытания методов интенсификации дегазации отрабатываемого угольного пласта	104
4.4 Выводы	114
5 Обоснование рекомендаций по расчету нагрузок на очистной забой в условиях высокопроизводительной разработки угольных пластов	116
5.1 Методика расчета допустимой нагрузки на очистной забой по результатам газовой съемки в ремонтную смену, с учетом фактических источников метана и величины пластового давления	116
5.2 Методика оценки экономической целесообразности технических решений, направленных на повышение нагрузок на очистной забой	121
5.3 Экономическая эффективность на основе интенсификации дегазационных работ методом пневматического воздействия	125
5.4 Выводы	128
Заключение	129
Литература	131

Введение

Актуальность исследования. В соответствии с "Энергетической стратегией России" на период до 2030 года " (Утверждена распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. №1715-р) главными ориентирами долгосрочного развития являются: энергетическая, экологическая и бюджетная эффективность экономики. В качестве приоритетных направлений научно-технического прогресса в энергетическом секторе по направлению "Угольная промышленность" Правительством выделены следующие направления:

- повышение уровня развития материально-технической и научно-исследовательской базы по охране труда,
- предупреждение и ликвидация аварий в угольной промышленности, включая автоматизацию производственных процессов по добыче угля, разработку новых технологий и оборудования для эффективной дегазации угольных пластов, разработку оборудования и средств защиты от взрыва метана и угольной пыли.

В стратегии развития обращается внимание на необходимость повышения эффективности научных исследований по проблемам безопасности угледобывающего производства, а также исследований природы особых горно-геологических явлений при разработке пластов, опасных по внезапным выбросам метана и горным ударам, разработка системы мер по их предотвращению.

На период до 2030 года в России прогнозируется добыча угля объемом 425 – 470 млн тонн, при этом на долю подземной добычи угля в Кузнецком бассейне прогнозируется 201 – 205 млн тонн. В этом отношении проведение прикладных научных исследований, направленных на повышение технико-экономических показателей представляет большой интерес.

Общепризнано, что мировые запасы угля значительно превышают запасы нефти и природного газа, поэтому уголь будет и в будущем играть важную роль в секторе энергетики. За последнее десятилетие отмечается стабильный рост добычи угля в России с темпами, превышающими добычу нефти и газа. Темпы

роста добычи угля подземным способом зависят от уровня их комплексной механизации. Экономически оправдана тенденция к увеличению производительности шахт, что является наиболее весомым фактором эффективности из-за снижения материальных затрат на массу добываемого угля. Этот управляемый фактор повышения производительности является предметом множества прикладных исследований и технических разработок. Второй важный, но неуправляемый фактор, определяющий рентабельность угольных шахт - это цены на уголь, которые зависят от конъюнктуры рынка, развития традиционных возобновляемых и альтернативных источников энергии. В любом случае стремление к повышению производительности добычи угля является самой актуальной и экономически обоснованной задачей современной угольной промышленности, которая должна быть реализована при соблюдении высокого уровня безопасности горных работ [72].

В существующих условиях развития экономики удовлетворение потребности страны в углях для энергетики и коксования будет связано с наращиванием объемов добычи угля в Кузнецком угольном бассейне и в меньшей мере на шахтах Восточной Сибири и в Донецком бассейне. Большая часть оставшихся запасов угля сосредоточена в газоносных пластах малой и средней мощности (менее 2 м). При этом на долгосрочный период времени следует ожидать ухудшение горно-геологических условий разработки угольных месторождений. В Кузнецком и Печорском угольных бассейнах из-за увеличения количества пластов с природной газоносностью более $15 \text{ м}^3/\text{т}$ при развитии технологий необходимо уделять повышенное внимание вопросам дегазации пластов - для борьбы с внезапными выбросами и горными ударами, а также безопасной отработке самовозгорающихся углей.

Сырьевая база России характеризуются разнообразием горно-геологических условий залегания пластов, что определяет условия безопасности ведения горных работ. Известно, что большинство пластов (69,6%) приходится на полого наклонные, из которых вынимается 95,4 % всего объема добываемого подземным способом угля. На полого наклонных пластах,

доля пластов средней мощности (1,8-3,5 м) составляет 40,6 %, а доля мощных (более 3,5 м) - 38,2%. На долю крутопадающих и крутонаклонных пластов приходится всего 4,6% добываемого угля. Глубина разработки пластов на шахтах России колеблется от 45-70 м - в Дальневосточном районе, до 1200 м - в Восточном Донбассе. Современная тенденция такова, что наибольший вклад в объем подземной добычи угля будет приходить на технологии разработки пологопадающих пластов. При этом сдерживающим фактором является неуклонный рост газобильности очистных забоев по мере углубления горных работ.

В соответствии с современной энергетической стратегией России объемы подземной добычи угля, в зависимости от сценария развития экономики, составляют 120-140 млн. т. Для обеспечения таких объемов, нагрузка на шахту должна составлять 1 млн т. угля в год и более, что предъявляет подземным технологиям разработки повышенные требования безопасности, особенно по газовому фактору. В целом по России суммарная доля шахт, отличающихся высокой степенью метаноопасности (III категория и сверхкатегорные) составляет 56,7%. Высоким уровнем газовой опасности характеризуются шахты Кузбасса, на территории которого действуют 19 из 25 российских шахт, опасных по выбросам угля и газа, 15 из 19 сверхкатегорных шахт. Большинство удароопасных пластов (75,8%) также разрабатывается в Кузбассе. При этом абсолютно все шахты опасны по газу. В этих непростых горно-геологических условиях стремление к повышению производительности должно быть очень тщательно обосновано, что возможно только на основе современных достижений теоретической, экспериментальной науки и использования лучших технологий.

Отечественный технологический уровень подземной добычи угля отличается от уровня передовых угледобывающих стран. Лучшие технологические схемы реализуют работу в очистных забоях длиной порядка 400 м при размерах выемочных столбов до 5500 м. В России также наметилась тенденция увеличения размеров столба и длины очистного забоя. Это

становится возможным в результате внедрения надежных и высокопроизводительных очистных механизированных комплексов для добычи угля в длинных забоях. В настоящее время средняя длина одного очистного забоя на шахтах РФ составляет 164 м (по всем забоям, включая забои на круто-падающих пластах), в том числе на шахтах Кузнецкого бассейна – 148 м, Печорского бассейна – 236 м, Восточного Донбасса – 216 м.

Таким образом, развитие угольной промышленности России, характеризуется значительным увеличением производительности угольных шахт, внедрением новых схем ведения очистных работ, что требует применения мощных очистных комплексов. Применение техники современного уровня повлекло за собой необходимость обновления нормативной базы угольной промышленности, отвечающей условиям разработки газоносных угольных пластах с высокими нагрузками на очистной забой более 5 тыс. т в сутки. В этих условиях на первое место выходит требование обеспечения промышленной безопасности по газовому фактору и необходимость прогноза предельно допустимых нагрузок на очистной забой при планировании и текущем производстве добывчных работ. При этом тенденция повышения производительности вызывает необходимость разработки и внедрения научно обоснованных эффективных способов дегазации угольных пластов.

В связи с изложенным весьма актуальной научно-технической задачей является повышение безопасности добычи угля на основе интенсификации дегазации угольных пластов, совершенствования метода прогноза газообильности очистного забоя для обоснования максимально допустимых нагрузок на очистной забой по газовому фактору.

Цель работы – повышение безопасности добычи угля на основе интенсификации газовыделения из пластовых скважин и совершенствования метода прогноза газообильности очистного забоя с учетом закономерностей массопереноса метана из угольного пласта и отбитого угля в условиях высоких нагрузок на очистной забой.

Основная идея работы заключается в том, что интенсификацию газовыделения из пластовых скважин осуществляют методом пневматического воздействия на пласт в обоснованном технологическом режиме и с учетом достигнутой степени дегазации осуществляют прогноз газообильности очистного забоя для расчета предельно допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору.

Научные положения, разработанные лично соискателем, и новизна:

1. Механизм интенсификации газовыделения из пластовых скважин базируется на использовании эффекта сорбционных деформаций угля в процессе дегазации и существенном повышении давления метана в скважине вплоть до пластового с дальнейшим его свободным истечением.

2. Интенсификация дегазации низкопроницаемых угольных пластов обеспечивается путем нагнетания в скважину воздуха под давлением 5 – 10 бар с последующим сбросом из скважины газа, приводящим к повышению проницаемости по газу радиальных каналов фильтрации вокруг скважины и их дальнейшему расширению за счет сорбционной усадки угля в процессе дегазации.

3. Притоки метана в исходящую струю лавы определяются с учетом гранулометрического состава отбитого угля, параметров сорбции угля и распределения пластового давления метана по глубине очистного забоя во время отбойки.

4. Прогноз газообильности очистного забоя в лаву базируется на аналитических решениях задачи массопереноса метана с учетом: газоносности и сорбционных свойств угольного пласта – по результатам лабораторных измерений; пластового давления метана – по результатам шахтных измерений в дегазационных скважинах; газопроницаемости угля в очистном забое – по результатам газовоздушной съемки лавы в ремонтную смену.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

- использованием в теоретических моделях законов массопереноса метана в угольном пласте и современных средств расчетов методом конечных элементов, согласующихся с результатами производственной практики;
- удовлетворительным совпадением результатов прогноза газообильности очистного забоя с фактическими данными на шахте им. С.М. Кирова ОАО «СУЭК–Кузбасс».

Научное значение работы

- обоснован физический механизм повышения газопроницаемости угля в зоне изменения пластового давления метана, приводящего к развитию усадочных сорбционных деформаций;
- обоснован физический механизм интенсификации дегазации низкопроницаемых угольных пластов путем предварительного пневматического воздействия на пласт через дегазационные скважины с реализацией в пласте усадочных сорбционных деформаций в процессе последующей дегазации;
- разработан метод прогноза газообильности очистного забоя с притоками метана из угольного пласта и разрушенных фракций угля для безопасной подземной разработки угольных пластов;
- разработан способ определения газопроницаемости угольного пласта в очистном забое по результатам газовой съемки в лаве в ремонтную смену.

Практическое значение работы

- разработан технологический проект на дегазацию угольных пластов средствами пневматического воздействия через пластовые скважины с использованием энергии сжатого воздуха и угольного метана;
- разработана методика оперативного прогноза газообильности очистного забоя в условиях интенсивной отработки угольных пластов.

Реализация выводов и рекомендаций работы.

Разработанные технологические решения по параметрам предварительного пневматического воздействия на пласт через пластовые скважины с

использованием энергии сжатого газа реализованы на шахте им. С.М. Кирова ОАО «СУЭК–Кузбасс».

Разработанная методика оперативного прогноза газообильности очистного забоя, учитывающая притоки метана в исходящую струю из угольного пласта и отбитого угля, принята к использованию на шахтах ОАО «СУЭК–Кузбасс».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на международных научных симпозиумах «Неделя горняка» в 2012 – 2016 гг., на технических советах ОАО «СУЭК-Кузбасс» в 2010 – 2015 гг., на Международной научно-практической конференцию «Подземные горные работы – 21 век» (г. Ленинск-Кузнецкий), на Международной научно-практической конференции в рамках «Кузбасского международного угольного форума – 2013» (г. Кемерово), на научных семинарах кафедр «Горнопромышленная экология» и «Физика горных пород и процессов» (2014 г.), заседании кафедры безопасности и экологии горного производства НИТУ «МИСиС» (2015, 2016 гг.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 9 научных трудов, из них 6 - в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России.

1 Состояние проблемы высокопроизводительной подземной разработки газоносных угольных пластов

1.1 Анализ горно-технологических факторов, влияющих на показатели разработки газоносных угольных пластов

В угольной промышленности России достижение технико-экономических показателей мирового уровня возможно путем автоматизации производственных процессов и повышения уровня организации горных работ. Во многих случаях эффективность объективно сдерживается из-за сложности горно-геологических условий: неустойчивые породы кровли, высокая газоносность угольных пластов, склонность угольных пластов к горным ударам и внезапным выбросам угля и газа, склонностью угля к самовозгоранию. Множество разрабатываемых пластов имеют природную газоносность более 13 $\text{м}^3/\text{т}$, что в условиях высоких нагрузок на очистной забой требует проведения значительных по капитальным затратам мероприятий по дегазации пластов – текущей или заблаговременной [22,32,34].

Шахты Кузбасса отличаются высоким уровнем опасности по фактору метана. На территории действуют 34 шахты, опасные по выбросам угля и газа и сверхкатегорные. При этом абсолютно все шахты опасны по газу. Наиболее благоприятными условиями по газу отличается только регион Восточного Донбасса, где все 12 шахт являются негазовыми. Высоким уровнем опасности по данному фактору отличаются шахты Северного региона России, где доля шахт с высоким уровнем газовой опасности составляет почти 100%.

При существующих в настоящее время рыночных ценах на уголь удовлетворительная рентабельность действующих угольных шахт может быть достигнута при нагрузках на забой не менее 3 тыс. т/сутки, что требует использования высокого уровня технической и технологической оснащенности горных работ, в том числе за счет применения лучших образцов зарубежного горного оборудования. Однако достижение высокой производительности

невозможно без предварительных технологических мероприятий по дегазации угольных пластов из-за опасности воспламенения и взрывов метановоздушных смесей [6,8,16].

В условиях действующих угольных шахт проблема снижения газоносности может быть решена за счет текущей дегазации угольных разрабатываемых пластов через скважины, пробуренные из подземных выработок. Многолетний опыт реализации технологии позволил накопить практические рекомендации по повышению эффективности дегазации [26,31]. Для этого используют природные текстурные особенности угольных пластов, такие как блочность массива, макро и микрослоистость, кливаж, трещиноватость, направления напластования и смещения тектонического происхождения.

В работах [32,33] показана возможность повышения эффективности дегазации на основе бурения в пласт перекрещивающихся скважин. В этом случае повышается вероятность пересечения скважин с природными каналами трещиноватости. Способ дегазации пласта перекрещивающимися скважинами основан на эффекте разгрузки угольного массива вблизи полостей скважин в узлах их перекрещивания, где формируются две новые системы вертикальных пересекающихся трещин. В зоне влияния очистного забоя, пересекающиеся трещины под действием горного давления дополнительно развиваются, что способствует более интенсивной дегазации угольного пласта.

Схемы дегазации пласта перекрещивающимися скважинами рекомендуют к применению на высокогазоносных и выбросоопасных пластах. На оконтуренных выемочных полях длину скважин, пробуренных параллельно очистному забою, принимают на 10-15 м меньше длины лавы. Диаметр скважин зависит от бурового оборудования и составляет 76 мм. Угол разворота ориентированных на забой скважин составляет от 50 до 85°, глубина бурения современными буровыми станками достигает 500 м и более. Продолжительность предварительной пластовой дегазации через скважины вне зоны влияния очистного забоя составляет не менее 6 месяцев. Относительно

эффективности реализации способа по фактору дебитов метана судят по фактору суммарного отсоса метана через шахтный трубопровод. К сожалению, информации о дебитах метана из отдельных дегазационных скважин нет, что не позволяет судить о величине дисперсии статистической информации и вариации дебитов метана по скважинам.

Известен вариант с бурением системы скважин диаметром 100-150 мм, параллельных линии очистного забоя [24,25,66,70]. Расстояние между скважинами 5-15 м. Отмечается, что при реализации заблаговременного гидравлического разрыва пласта расстояние между скважинами может быть увеличено до 40-60м. При гидравлической обработке пласта давление жидкости в скважине на глубине 600 м составляет 10-15 МПа, темп нагнетания воды от 5 до 15 л/с, объем закачки 5-60 м³. При гидрообработке реализуется физический механизм раскрытия и разветвления природных трещин, имеющих гидравлическую связь с полостью скважин, что в дальнейшем обеспечивает эффективную дегазацию пласта после откачки воды и освобождения каналов проницаемости от влаги.

В последние годы при решении задачи безопасности по газовому фактору повышенное внимание уделяется экологическому и энергетическому аспекту угольного метана с возможностью извлечения, утилизации или энергетического использования кондиционных метановоздушных смесей [94,103,104]. Таким образом, горно-геологические условия с высокой газоносностью пластов в ряде случаев можно использовать с дополнительной технико-экономической отдачей. Для этого метановоздушные смеси отводят на поверхность по подземным трубопроводам, минуя атмосферу шахт. Самый широкий опыт использования шахтного метана накоплен в США и Австралии [145]. В последние 15 лет угольные компании Китая проявляют к этому источнику энергии повышенный интерес.

В России лучший проект реализован в Кузбассе на шахте имени С.М. Кирова, где построена первая тепловая электростанция с номинальной производительностью по электроэнергии 0,9 МВт, производительностью по

тепловой энергии 1,1 МВт. Используется метановоздушная смесь с концентрацией метана более 35%. Реализованный в России проект в 2008 г. получил специальный диплом Министерства природных ресурсов и экологии РФ «Лучший экологический проект года».

Перспективной для газоносных шахт является схема дегазации пластов, включающая бурение скважин во вмещающие породы и пласти-спутники из оконтуривающих выемочное поле выработок в дополнение к участковым скважинам. Как показывает опыт Австралии, США, Китая, Индии, других стран, длинные скважины направленного бурения в пластах вполне могут обеспечить снижение содержание газа в углепородном массиве до начала отработки угольного пласта [144].

По мере появления на шахтах соответствующей буровой техники, в том числе с возможностью бурения длинных и криволинейных скважин, такая технология будет получать все большее распространение. В частности в управлении дегазации и утилизации метана ОАО «СУЭК-Кузбасс» введена в эксплуатацию буровая установка Valley Longwall Drilling (VLD 1000A, Австралия), предназначенная для направленного бурения пластовых скважин диаметром 100 мм на глубину тысяча и более метров [87]. Установка стала одним из звеньев реализуемого на шахте имени С.М. Кирова проекта дегазации с утилизацией шахтного газа метана и выработкой электроэнергии.

На выемочных полях со сложными горно-геологическими условиями, когда источниками метана являются разрабатываемый пласт, пласти-спутники и газоносные породы, высокопроизводительную работу выемочных машин можно обеспечить только совместным применением эффективных средств дегазации. Технологии извлечения метана из неразгруженных от горного давления угольных пластов можно подразделить на две группы:

- технология дегазации пласта, использующие только природные геологические условия месторождения;
- технологии дегазации с предварительным силовым воздействием на угольные пласти и вмещающие породы, например, гидравлическим, или иным

физическим воздействием - с целью повышения его проницаемости.

Технологии дегазации угольных пластов являются необходимым условием, при выполнении которых возможно достижение высоких нагрузок на очистной забой [126]. В то же время следует признать, что ограничения по фактору газа, введенные «Правилами безопасности на угольных шахтах» (ПБ 05-618-03, 2003 г.) сформулированы с повышенным запасом надежности, что снижает потенциал максимально возможной производительности очистных забоев. При этом требования к допустимой концентрации метана в ведущих угледобывающих странах различные. Наибольший допуск по содержанию метана в исходящей струе представлен в таблице 1.1.1 и составляет 2,0%, разрешен в Австралии, Великобритании, США. Однако эта норма разрешена при отсутствии электропитания. Таким образом, в особых условиях допускается высокое содержание метана в исходящей струе 2,0 %, меньшее в 2,5 раза нижнего интервала взрывоопасности. Для сравнения российские правила безопасности не допускают превышение концентрации метана более 1%. При таких "запасах прочности" производство горных работ требует надежного автоматизированного контроля и строжайшего выполнения условия остановки очистного комбайна при превышении концентрации метана в исходящей струе.

В отдельных случаях, в виде исключения, на российских шахтах по разрешению местного органа Гостехнадзора допускается повышение концентрации метана до 1,3%. Важно, что такие изменения допускаются лишь для какого-то конкретного объекта и при условии, что принимаются дополнительные меры по обеспечению безопасности, чтобы повышение риска было незначительным. Также понятно, что утвержденный «запас прочности» приводит к росту себестоимости угледобычи ради обеспечения безопасности. Однако стремление производства к материальной выгоде может привести к несанкционированным нарушениям нормативных ПБ без надежного автоматизированного контроля и эффективного мониторинга, что совершенно недопустимо.

Таблица 1.1.1 – Предельные концентрации метана по нормам безопасности

Предельные значения опасных концентраций метана, %	Австралия	Китай	Германия	Индия(***)	Южная Африка	Соединенное Королевство	США	Россия
Максимальные значения, ниже которых разрешается проведение работ в шахте в целом	1,25	1,0	1,0	1,25	1,4	1,25	1,0	0,75
Максимальные значения концентрации метана с исходящей струе воздуха, ниже которых разрешается проведение работ в очистных забоях	2,0*	1,5**	1,5	0,75	1,4	2,0*	2,0*	1,0
http://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/cmm/pub/BestPractGuide_MethDrain_es31_r.pdf								
(*) При отсутствии электропитания; (**) 2,5% для выработок с исходящей струей воздуха; (***) положение об угольных шахтах Индии 1957 года.								

На высокопроизводительных и экономически эффективных шахтах [130,131] России среднесуточная добыча угля из очистных забоев превышает 5,0 тыс.т. Учитывая положительный опыт угледобывающих отраслей зарубежных стран, в России на подземных работах находят все более широкое применение находят очистные комплексы, позволяющие реализовать среднесуточную добычу более 10 тыс. т угля на пластах мощностью 1,8-4,5м. При этом на некоторых угольных шахтах Кузбасса передовые очистные комплексы способны довести суточную добычу до 20 тыс. т и более. Однако сдерживающим фактором является не только отсутствие нормативных документов, разрешающих такую высокую производительность, но также

объективный фактор повышения газобильности в газоносных угольных пластах.

Очевидно, рентабельная добыча угля возможна только при высоких нагрузках на очистной забой в комплексе с современными способами и средствами снижения газообильности очистных выработок, например, средствами дегазации разрабатываемых пластов [114,116,124,]. Проблема решается за счет научно обоснованных технических решений на основе использования передовых достижений науки и практики.

1.2 Технико-технологические и экономические факторы эффективности разработки газоносных угольных пластов

Реструктуризация угольной отрасли России, проходящая с 90-х годов прошлого века включает технические, технологические, организационные, социальные и экономические преобразования [64,67,68,78]. В период реструктуризации при переходе на рыночные экономические условия произошел переход от убыточной отрасли к конкурентоспособным угольным компаниям, функционирующим без государственных дотаций. Такой переход стал возможным за счет масштабного перехода к освоению богатых месторождений с угольными пластами неглубокого и пологого залегания, выше средней мощности (более 1,31 м). Стратегией развития отрасли предусматривается, что угольные пласты с особыми горно-геологическими условиями (тонкие, крутопадающие пласты, опасные по выбросам, горным ударам и др.), возможно, будут разрабатываться будущими поколениями с применением более эффективных технологий, которые к этому времени наработает горная наука.

Достигнутые к настоящему времени результаты программы реструктуризации угольной отрасли России следующие:

- количество действующих шахт уменьшилось более чем в два раза;
- производительность труда по добыче угля возросла почти в два раза;

– среднесуточная нагрузка на очистной забой увеличилась в 2- 3 раза.

Перечисленные результаты являются очень весомыми в стратегии развития рыночной экономики России. Однако, что касается смертельных исходов в результате крупных аварий со взрывами шахтного метана, то этот показатель не внушает оптимизма и выглядит так (<http://miningwiki.ru>):

- в период 1992-2000 гг. погибло 197 шахтеров (24,6 чел /год), 7 взрывов метана;
- в период 2001- декабря 2013 гг. погибло 448 шахтеров, 18 взрывов метана.
- февраль 2016, шахта "Северная", от взрыва метан погибло 36 шахтеров.

Статистика свидетельствует, к сожалению, что реструктуризация угольной отрасли не исключила крупные аварии на шахтах, что очевидно связано с интенсификацией добычных работ в ущерб технике безопасности.

В период реструктуризации совершенствование технологии угледобычи на шахтах России осуществлялось за счет использования высокопроизводительного оборудования в очистных и подготовительных забоях. Такое направление развития угольной отрасли привело к разработке более совершенных технологических схем разработки, в том числе подготовки и отработки угольных месторождений с интеграцией отечественного и зарубежного оборудования [121].

По всей видимости, дальнейшее развитие угольной отрасли в близкой перспективе будет проходить, по двум основным направлениям:

- увеличение количества высокопроизводительных комплектов импортного оборудования для производства горных работ;
- внедрение систем мониторинга и автоматизации управления технологическими процессами на базе компьютерных технологий.

Первое направление требует больших капитальных затрат, которые компенсируются за счет увеличения нагрузок на очистной забой.

Производитель техники гарантирует заявленные технологические показатели. Так, например, очистной механизированный комплекс производства компании "Joy Mining Machinery" может устойчиво обеспечить высокую производительность угледобычи - более 3 млн. т в год (24 тыс. т/сут). Такая производительность обеспечивает высокую рентабельность угледобычи, однако сдерживающим фактором является опасность добычных работ по факторам горно-геологических явлений, включая метанобезопасность при разработке газоносных пластов.

Второе направление требует постоянного контроля состояния угольного пласта и вмещающих пород с учетом специфики различных горно-геологических условий для каждого участка добычи. Автоматизация технологических процессов должна опираться на ответственные нормативные документы, которые ученым еще предстоит создать на базе научных исследований и утвердить в установленном порядке.

По мере развития технологий угледобычи численность персонала должна постепенно сократиться в 10-15 раз и достичь показателей аналогичных зарубежных шахт Австралии и США. Сокращение количества шахтеров, естественно, приведет к снижению уровня травматизма.

В перспективе еще предстоит решить проблему разработки мощных, склонных к самовозгоранию пластов. Существующие технологии добычи угля длинными столбами или камерно-столбовая система разработки не исключают возможности возникновения пожаров в оставшихся целиках и обрушенных породах. Эффективным методом является нанесение на поверхность выработок составов, блокирующих процесс окисления поверхности угля и своевременное погашение выработанного пространства.

Тем не менее, самой серьезной проблемой остается опасность, связанная с повышением нагрузок на очистной забой в газоносных угольных пластах. Технологии заблаговременной или текущей дегазации пластов являются решением проблемы [86,111], однако они требуют больших материальных затрат и поэтому не всегда применяются в достаточном объеме.

Все изложенное свидетельствует о важности задачи разработки технологических решений для реализации безопасных технологий подземной угледобычи, обеспечивающих высокопроизводительную выемку угля. При разработке и реализации новых технических средств обязательным условием является прогнозирование максимально допустимых нагрузок на очистной забой в пределах выемочного столба с ежесуточной корректировкой прогноза, что позволит исключить предаварийные ситуации за счет рациональной организации труда с учетом газодинамики углепородного массива [29,48,56,61,62,].

В современных условиях наибольшее распространение в мировой и отечественной практике получила система разработки пологих пластов длинными очистными забоями. Забойное оборудование состоит из выемочной машины, т.е. комбайна или струга, скребкового забойного конвейера и крепи. Наибольшее влияние на экономические показатели технологии оказывает длина очистного забоя и размеры выемочного столба. Высокая производительность добычи угля позволяет концентрировать возможности шахты на одной лаве. В данном случае реализуется наиболее простая раскройка шахтного поля, минимальная протяженность подготовительных выработок, отнесенная к объему полезного ископаемого.

Большая длина выемочного столба обуславливает длительную подготовку и высокие затраты на подготовку выемочного поля и примыкающих к лаве выработок: штреков и монтажной печи. Оконтуривание выемочного столба по многоштрековой технологии подготовки, например с помощью двойных штреков, еще в большей степени увеличивает объем предварительных капитальных затрат.

Решающим фактором экономической эффективности являются запасы выемочного поля, пропорциональные его длине и мощности пласта. Стоимость выемочной машины в длинном очистном забое, комбайна или струга, существенно ниже, чем механизированной крепи. Стоимость выемочной машины составляет примерно 10–20 % от стоимости механизированной крепи.

Как правило, стоимость очистного комбайна практически такая же, как и стоимость струговой системы для сопоставимых условий эксплуатации, хотя стоимость наиболее эффективных струговых систем несколько выше.

Стоимость забойного конвейера сильно зависит от длины лавы. Увеличение мощности пласта означает использование более крупных энергоблоков. Все расходы учитываются в рамках показателя «эксплуатационные расходы». В состав эксплуатационных расходов входят следующие элементы: затраты на заработную плату персонала; затраты на материалы; стоимость запасных частей; стоимость энергии; амортизационные расходы, уменьшение стоимости реального основного капитала в результате истощения природных ресурсов; амортизационное списание издержки на страхование; текущие арендные платежи.

Издержки производства зависят помимо производительности лавы от капитальных и текущих затрат. В целом можно утверждать, что при отработке пластов мощностью от 1,5 до 2,3 м капитальные затраты для комбайновых лав сопоставимы с капитальными затратами для струговых лав. В то же время эксплуатационные расходы и издержки производства по струговым лавам меньше, чем по комбайновым.

По итогам рассмотрения высокопроизводительных комбайновых и струговых длинных очистных забоев правомерны следующие выводы:

для отработки пластов мощностью менее 1,8 м наилучшим выбором является струговая установка;

для пластов мощностью от 1,8 до 2,3 м решение о выборе той или иной технологии зависит от конкретных горно-геологических условий; при отработке пластов мощностью более 2,3 м предпочтение следует отдавать комбайновой выемке.

В сложившихся экономических условиях развития угольной промышленности решение проблемы метанобезопасности в целом может быть осуществлено на уровне угледобывающих предприятий при государственной поддержке при создании необходимой технической базы, материальных

стимулов, целенаправленной работы по обучению и повышению квалификации кадров, усилению требований к качеству и объемам дегазации.

1.3 Обобщение мирового опыта высокопроизводительной разработки газоносных угольных пластов

На сегодняшний день в мировой практике наиболее широко используются две системы подземной разработки угольных пластов: камерно-столбовая и длинными очистными забоями. Камерная и камерно-столбовая система разработки имеют весьма широкое применение в ЮАР (около 80% добычи), США (около 50% добычи) и Австралии (около 10-15% добычи). Технологию применяют в основном на пологих тонких и средней мощности пластах. В США для этих систем создано производительное оборудование, включающее выемочные комбайны, средства транспорта и анкерное крепление. Созданы системы, позволяющие осуществлять выемку без постоянного присутствия человека в забое. Основное преимущество этих систем по сравнению с системами разработки длинными столбами – меньшие капитальные затраты на приобретение оборудования [20,81].

При камерно столбовой системе разработки выемку угля обеспечивают комплексы самоходного оборудования. Очистные забои проветривают, совмещая режимы нагнетания воздуха и пылеотсос средствами комбайнов. При камерно-столбовой системе в условиях комплексной механизации горных работ длина камер составляет 100-150 м, ширина до от 5-10 м; ширина междукамерных целиков 15 - 30 м. По мере подвигания забоя формируется объемная геометрическая структура, состоящая из камер и столбов. Разновидностью камерно-столбовой системы является вариант, когда выемочные участки разделяют барьерными целиками, которые поддерживают от обрушения выработанное пространство после очистных работ. Тем самым решается важная задача уменьшения деформаций земной поверхности в процессах осадки породного массива. Однако в качестве недостатка следует

отметить изменение гидрогеологического режима подземных вод. Впрочем, этот недостаток является системным и свойственен всем технологиям подземной разработки, которые не используют дорогостоящую закладку выработанного пространства пустыми породами.

Камерно-столбовая система разработки обеспечивает извлечение угля при нагрузках на очистной забой до 2,0 тыс. т/сут. При поддержании пород кровли над выработанным пространством используют наименее затратную технологию анкерного крепления. С точки зрения обеспечения безопасности по газовому фактору камерно-столбовая технология имеет положительное качество, так как в ней обеспечивается дегазация выемочных столбов при массопереносе метана в направлении свободных поверхностей. При этом в условиях высокой газоносности углей возможно поддержание необходимой по требованиям ТБ концентрации метана за счет возможности увеличения расхода вентиляционного потока в условиях прямоточной схемы проветривания.

К существенным достоинствам камерных систем относится снижение удельного объёма проведения подготовительных выработок перед отработкой запасов, что позволяет получать отдачу от вложенных средств в более короткие сроки. Для технологии характерна простая и надёжная схема подземного транспорта, в том числе на колесном ходу.

Недостатком камерно-столбовой системы разработки являются высокие потери угля в недрах 20-35% в зависимости от мощности пласта, устойчивости пород кровли и глубины разработки. Аэродинамическая структура выработанного пространства между выемочными столбами усложняет режим проветривания очистных забоев и требует больших расходов вентиляционного потока. Еще один недостаток - опасность применения камерно-столбовой системы разработки на пластах самовозгорающегося угля, в газообильных шахтах и на глубине свыше 500-600 м. Этот недостаток можно ликвидировать, используя закладку выработанного пространства, однако высокие материальные затраты приводят к снижению рентабельности угледобычи.

Областью применения камерно-столбовой системы разработки являются шахтные поля, где есть запасы, которые не могут быть отработаны традиционными технологиями. Это зоны горно-геологических нарушений или охранные целики, часть которых может быть извлечена только при условии, когда исключаются нарушения земной поверхности. В этих случаях вместо списания запасов возможны альтернативные способы выемки проблемных участков, например по камерно-столбовой системе, вместо традиционной технологии отработки длинными лавами. Сравнивая вариант списания запасов со 100%-ной потерей угля, имеет смысл рассмотреть альтернативные варианты отработки по системе с потерями, которые могут достигнуть 45%. В условиях рыночной экономики списание запасов влечет за собой уплату штрафов за нерациональное пользование недрами и этот экономический критерий определяет целесообразность принятия оптимального решения. Применение камерной системы разработки не может обеспечить достаточно высокую производительность добычи, при которой будет обеспечена нужная рентабельность. Однако при увеличении количества очистных забоев, возрастают затраты на оборудование, что отражается на себестоимости добычи угля. Таким образом, принятие решения о выемке угля из сложных участков определяется экономическими критериями, которые в свою очередь зависят не только от системы разработки, а также от макроэкономических условий рыночной экономики, формирующих отпускные цены на уголь.

Практика свидетельствует, что наибольшие нагрузки на очистной забой достигаются при использовании системы отработки угольных пластов длинными очистными забоями. По типу очистных комплексов выделяют две разновидности технологии выемки угля: комбайновая и струговая. В прошедшие десятилетия был период, когда обе технологии выемки применялись равнозначно. Однако в настоящее время масштабы комбайновой выемки опережают струговую технологию. Решающим фактором является более высокая производительность, что достигается применением мощного

оборудования и выемкой угля с большой шириной захвата исполнительным органом комбайна.

Расположение длинных лав в плоскости угольного пласта выбирается по падению или по простиранию. В данном случае важным является не только экономические критерии выбора системы разработки, но ответственным фактором является влияние глобальных тектонических напряжений, вызванных движением земной коры. Процессы глубокого опускания породных массивов при схождении тектонических плит и связанные с этим явления землетрясений отражаются не только в зонах геологических разломов [83]. Их влияние распространяется достаточно далеко от плоскостей нарушений. Эти напряжения вызывают в одних направлениях напряжения сжатия, а других могут возникать высокие сдвиговые и растягивающие напряжения, вплоть до разрушений. Если плоскость очистного забоя параллельна главным растягивающим напряжениям, то следует ожидать повышенные значения проницаемости и, следовательно, высокие притоки метана в лаву. Напротив, если забой находится под действием сжимающих напряжений, то проницаемость угля понижается и по этой причине притоки фильтрационного метана из зоны обнажения будут меньше. При этом метан, находясь в поровом пространстве угля в призабойной зоне, имеет не растратченную потенциальную энергию, составляющую основу выброса угля и газа. Поэтому более предпочтительно, когда реализуется естественная дегазация пласта с поверхности забоя и, исходя из этой физической особенности, следует оптимизировать направление длинной лавы с учетом ориентации главных тектонических напряжений.

На шахтах России в технологиях длинными забоями используют технологии выемки угля без целиков (сплошная технология), а также с оставлением барьерных целиков. По России сплошная технология занимает около 30% и используется в частности в Печорском угольном бассейне. Преимущество технологии - полнота использования природных ресурсов. Типичный недостаток – сложность управления горным давлением и большие

объемы обрушения пород в выработанном пространстве, что приводит к значительным деформационным просадкам земной поверхности и отчуждению шахтного поля. Еще один недостаток связан со сложностью поддержания выработок на участках сопряжения с выработанным пространством. Несмотря на отмеченные недостатки, в Печорском бассейне в последние годы заметного снижения объема применения сплошной технологии не наблюдается. Вероятно, это связано со стремлением извлечения ценных коксующихся углей в более полных объемах. Что касается поддержания выработок на участках сопряжения, то эта техническая проблема находит удовлетворительное решение при масштабном использовании анкерного крепления кровли выработанного пространства по мере подвигания очистного забоя, что позволяет осуществлять плавную посадку кровли [18, 30]. Однако с точки зрения безопасности по фактору газа бесцеликовая система имеет существенный недостаток, обусловленный сложностью качественного проветривания очистного забоя.

Системы с длинными лавами отличаются очевидной возможностью увеличения производительности за счет сокращения времени концевых операций комбайна при выемке угля и уменьшения объема подготовительных работ при проходке штреков, приходящихся на 1 тонну добываемого угля. Однако при отработке газоносных пластов возникают серьезные проблемы эффективности проветривания очистного забоя и повышении концентрации метана в исходящей струе. В России одна из самых протяженных лав длиной 300 м действует на шахте «Талдинская-Западная 1», содержащая 175 секций крепи DBT. По мнению ведущих аналитиков на данном этапе развития технологии увеличение длины лавы более чем 300-350 м в газоносных пластах экономически не оправдано в связи со снижением максимально допустимой нагрузки на очистной забой.

С точки зрения обеспечения высокой безопасности в условиях высокопроизводительной выемки угля хорошо зарекомендовала применяемая в США многоштрековая система подготовки и отработки выемочных панелей с

охраной выработок сдвоенными и строенными рядами угольных целиков-колонн. Многоштрековая система подготовки выемочного столба по геометрической структуре имеет много общего с камерной системой отработки и с системой разработки короткими столбами. Главное различие заключается в увеличении длины лавы до 300 м и более по сравнению с камерными системами, где длина лавы не превышает 50-100 м.

Преимуществом многоштрековой подготовки выемочных участков является более полное использование технических возможностей средств вентиляции и производительного оборудования, работающего в очистном забое и выработках под геомеханической защитой целиков. Многоштрековая система обеспечивает высокие технико-экономические показатели в горно-геологических условиях горизонтального и слабонаклонного залегания, на сближенных в свите пластах, средней глубины разработки с относительно устойчивыми почвами, при наличии структуры пневмоколесного транспорта на шахте. В данной технологии формируют ограниченно податливые целики-колонны вместо оставления традиционных ленточных целиков угля. При этом проходку штреков осуществляют выемочно-проходческими комбайнами "Джой", а крепление анкерной крепью с глубиной заложения 2,2-2,4 м. При трехштрековой и четырехштрековой подготовке ширина прямоугольных целиков составляет 25-30 м. Размеры целиков-колонн рассчитаны таким образом, чтобы с течением времени они могли самопроизвольно разрушиться под действием горного давления. Это делается для того, что бы исключить чрезмерное накопление потенциальной энергии геомеханических деформаций, способных при внезапной потере устойчивости вызвать горный удар. Отметим достоинства технологии, заключающиеся в надежном поддержании вмещающих пород кровли и почвы, возможности качественного проветривания выработок и доставки необходимого количества воздуха в очистной забой, что особенно важно при разработке газоносных пластов. Недостаток – большой объем подготовительных работ. Вероятно, по этой причине в США на

современном этапе отмечается тенденция перехода от четырехштрековой к трехштрековой системе разработки.

Анкерное крепление хорошо себя зарекомендовало на стадиях демонтажа забойного оборудования после отработки очистного забоя. При использовании анкерного крепления для поддержания штреков или демонтажных камер на очистных участках, они действуют как арматура, предотвращающая разрушение. Анкерные стержни, используемые для демонтажа в очистных забоях, исключают интенсивные притоки метана в зону обрушения, предотвращают неконтролируемое обрушение породы и ограничивают перемещения. Преимуществом анкерного крепления является увеличение полезной площади штреков, улучшение использования штреков при разработке лав обратным ходом. Весомым косвенным преимуществом является уменьшение аэродинамического сопротивления вентиляционному потоку благодаря большей чистоте штреков и снижение затрат на их техобслуживание.

На шахтах Кузнецкого бассейна по бесцеликовой технологии работает около 24% забоев от их общего числа. Все более широко внедряются технологии добычи угля с оставлением целиков угля по двухштрековой подготовке выемочного участка к выемке. Такая технология хорошо зарекомендовала себя на шахте им. С.М. Кирова (ОАО "СУЭК-Кузбасс"). Очевидные преимущества технологии связаны с уменьшением величины просадок земной поверхности, устойчивостью выработок на участках сопряжения и уменьшением опорного горного давления в зоне очистных работ. Целиковая система разработки имеет преимущества по сравнению со сплошной системой также по газовому фактору. По физическому смыслу равномерное перераспределение вертикальной составляющей горного давления на барьерные целики, особенно в зонах сопряжения, снижает долю сдвиговых напряжений в зонах сопряжения, ответственных за повышение газовой проницаемости угля и вмещающих пород.

Системы разработки длинными столбами по падению используют на тонких и средней мощности пологих пластах при погоризонтной схеме

подготовки шахтного поля. Различают модификации системы с выемкой по падению и по восстанию пласта. При этих системах от выработок, вскрывающих пласт на откаточном горизонте, проводят пластовый штрек и две наклонные выработки (транспортную и вентиляционную) от откаточного до вентиляционного штрека. При выемке по падению на вентиляционном горизонте между наклонными выработками проводят монтажную печь, в которой монтируют средства механизации очистных работ. Широко применяется полевая подготовка шахтного поля, при которой эксплуатируемые участки пластовых штреков погашаются.

При столбовой системе разработки подготовительные и очистные работы разделены в пространстве и времени: в одном выемочном поле ведутся подготовительные работы, в другом — очистные, что обеспечивает равномерную занятость персонала и непрерывность работы шахты. По мере отработки одного столба к работе подготавливают следующий столб. Участковые подготовительные выработки поддерживаются в массиве полезных ископаемых; по мере отработки выемочного столба длина этих выработок, как правило, сокращается. В вариантах с прямоточным проветриванием часть вентиляционной выработки позади очистного забоя поддерживается в выработанном пространстве. Заблаговременное проведение подготовительных выработок обеспечивает дополнительную разведку пласта в пределах выемочного столба и создаёт условия для проведения его дегазации и осушения. На этой стадии весьма ответственным этапом является дегазация угольного пласта, особенно в массивах с высокой газоносностью. В данном случае требуется применение средств активного воздействия на угольные пласты и вмещающие породы с целью повышения их газопроницаемости. При невыполнении этого условия возникают сложности при решении проблемы загазованности очистного забоя, что весьма существенно ограничивает нагрузку на очистной забой по фактору безопасности.

При использовании анкерного крепления анкеры действуют как шпильки и прижимают тонкие, гибкие стальные подхваты (верхняки) к кровле, держат

сетку и (в некоторых случаях) проволочные канаты, помогающие образовать гибкое перекрытие.

Обобщая известные технологии, можно утверждать, что рациональные технологические схемы шахты зависят от множества природных и техногенных факторов. Сочетание различных модификаций систем разработки включает следующие возможности:

- технологические модули проведения параллельных подготовительных выработок спаренными забоями с организацией схем транспорта;
- способы и средства обеспечения устойчивости подготовительных выработок в зоне влияния очистного забоя с применением анкерной крепи глубокого заложения, охраной подготовительных выработок угольными целиками шириной 20-50 м;
- способы и средства комбинированного проветривания выработок с отсосом метановоздушной смеси из выработанного пространства по трубопроводам большого диаметра;
- способы и средства эффективной пластовой дегазации и пластовых спутников скважинами, пробуренными с земной поверхности или из подземных выработок.

Как свидетельствует современный опыт работы очистных забоев в нашей стране и за рубежом, забои с нагрузками более 2 тыс. т/сут работают в основном с использованием современных механизированных очистных комплексов - отечественных: КМТ, КМ-138, КМ-142, КМ-144, КМ-700 и зарубежных: JOY, DBT, FAZOS, GLINK, Longwall, Пиома.

Сравнительный анализ применяемых комплексов на российских шахтах приводит к обобщению, что выпускаемое в данный момент отечественное горношахтное и горно-транспортное оборудование не соответствует современным требованиям высокой производительности. Так, коэффициент машинного времени для отечественных образцов не превышает 30 %, в то время как для зарубежных аналогов этот параметр не ниже 70%. Максимальной эффективностью горнодобывающего оборудования отличаются корпорации

«Джой Майнинг Машинери - JOY» и «Дойче Бергбау Техник -DBT», при использовании которого достигнуты максимальные нагрузки и наивысшая производительность труда. Следует иметь в виду высокие первоначальные затраты на оснащение лав данными типами оборудования. Стоимость оборудования для оснащения очистного забоя комплектацией «Джой» может достигать 25 млн. долларов, что в 3 и более раз выше отечественной комплектации). Однако эти затраты окупаются в условиях функционирования высокопроизводительных угольных предприятий. Для сравнения при подготовке трех лав, оснащенных оборудованием с нагрузкой 2 т/сут и одной лавы - с производительностью 6 тыс. т/сут, оснащенной комплексом «Джой», многие шахты предпочтут иметь один очистной забой при одновременном снижении фронта подготовительных работ и протяженности поддерживаемых горных выработок. Такой подход оправдан при допустимых нагрузках на забой по газовому фактору.

Применение высокопроизводительной техники требует особого внимания к схемам поддержания нормального газового режима в очистных забоях. При снижении газоносности пластов наиболее эффективными являются столбовые системы разработки, позволяющие оснастить очистные и подготовительные работы мощной горной техникой. Как уже отмечалось, техника мирового уровня, способная обеспечить нагрузки на забой более 10 тыс. т/сут уже создана и ее возможности ограничиваются только требованиями безопасности по газовому фактору [79,80,105].

Применение высокопроизводительных комбайнов позволяет организовать выемку угля в режиме односторонней или двусторонней выемки. В первом случае комбайн отбивает уголь в одном направлении, а при движении в обратном направлении осуществляет зачистку забоя перед очередным циклом выемки. В этом варианте уголь в очистной забой частично дегазируется в течение времени зачистки, что особенно важно при выемке разработке высокогазоносных пластов.

Во втором случае комбайн вынимает уголь при движении в обоих направлениях, осуществляя две зарубки по концам лавы в течение полного цикла операций. В отличие от предыдущего варианта с односторонней выемкой, длительность естественной дегазации пласта перед выемкой слоя меньше. Этот вариант обеспечивает большую производительность. Что касается притоков метана в исходящую струю в сравниваемых вариантах, то этот процесс требует дополнительных исследований.

Выемку угля комбайнами могут производить также в режиме половинной отработки забоя, когда комбайн при движении в одну сторону производит выемку на полную глубину захвата, отрабатывая верхнюю часть угольного пласта при помощи одного шнека. При движении в обратную сторону комбайн вынимает нижнюю часть пласта при помощи другого шнека. При этом зарубку производят в середине лавы. Таким образом, комбайн может производить выемку на полную глубину захвата или наполовину захвата. Вопрос выемки, с точки зрения интенсивности выделения метана по представленным схемам, также не исследован и представляет практический интерес.

Производительность выемки угля регулируется за счет регулировки скорости движения комбайна и режима отработки забоя в одном или двух направлениях. Струговая установка всегда производит выемку угля на полную высоту забоя в обоих направлениях движения, хотя при работе по мягкому углю высота корпуса струга обычно меньше, чем высота забоя.

Экономически эффективное использование комбайна достигается на пластах мощностью более 1,5 м. Во многих случаях комбайн ведет выемку на высоту, превышающую мощность пласта, захватывая породы кровли или почвы, в результате чего увеличивается степень разубоживания угля и повышаются издержки производства. Еще одно положительное качество комбайна - при работе на пластах с изменяющейся мощностью легко осуществляется регулировка высоты выемки очистного комбайна [18,20].

Струговые установки применяются для работы на пластах мощностью от 0,6 до 2,3 м, хотя известно использование и на пластах мощностью до 3 м.

Несмотря на небольшую собственную высоту, струговые установки обеспечивают выемку угля точно по гипсометрии пласта без необходимости присечки прилегающих пород. Пласти с изменяющейся мощностью не представляют каких-либо проблем для струговых установок. Высоту корпуса струга также легко при необходимости отрегулировать в зависимости от мощности пласта.

Очистные комбайны осуществляют отбойку как мягкого, так и крепкого угля. С увеличением крепости угля снижается производительность комбайна. Что касается струговых установок, то наиболее часто они используются для отработки пластов мягкого угля из-за низкой установленной мощностью машины. Удельная энергия отбойки угля комбайнами и стругами примерно одинаковая, изменяется в диапазоне от 0,7 до 10 МДж/м³.

Важный показатель безопасности при сравнении вариантов использования стругов или комбайнов – интенсивность выделения метана. Комбайн работает при относительно небольшой скорости подачи и обеспечивает большую глубину захвата, поэтому при транспортировке измельченного угля из лавы в поперечном сечении забоя оказываются отбитым больший объем угля, чем при работе струга. Следовательно, концентрация метана на участке выемки угля будет выше. Кроме того, комбайн измельчает уголь на более мелкие фракции, освобождая при этом почти газообразный метан, сжатый в поровом пространства угля. В итоге комбайновой лаве концентрация метана будет выше, чем в струговой лаве. По фактору пылевыделения комбайн также проигрывает стругам по причине более мелкого измельчения угля при выемке. Для получения количественных оценок интенсивности выделения метана или пыли в сравниваемых вариантах требуются специальные исследования.

Оптимальные параметры столбовых систем разработки для различных шахт могут различаться в зависимости от геологии месторождения, глубины разработки, качества и стоимости угля. В частности, рассматривая перспективы развития длиннолавных систем разработки пластов на шахтах ОАО «СУЭК-

Кузбасс» специалистами сделаны следующие концептуальные выводы о целесообразности развития технологии со следующими оптимальными параметрами [77,78,105,130]:

- длина лавы 150-350 м;
- длина выемочного столба 1000-4500 м;
- подготовка выемочных участков – спаренными или тремя выработками;
- комбайны: SL-500; 7LS;
- конвейер: A38(34); AFC; PF
- крепь: Joy; DBT; Tagor; M138/2; МКЮ;
- нагрузка на очистной забой до 40000 т/сут.

В настоящее время целый ряд угольных шахт вышли на мировой уровень среднесуточной нагрузки на очистной забой, к которым следует отнести:

- ОАО «СУЭК»:
- шахты "им. С.М. Кирова", "Им. 7 ноября" – более 3-4 тыс. т/сут;
- ш/у Котинское, шахты "Талдинская-Западная"; "Талдинская-Западная 2" – более 5 тыс. т/сут;
- ОАО «Шахта Заречная» - более 5 тыс. т/сут;
- ООО «УК Ерунаковская», шахта "Кыргайская" – более 4 тыс. т/сут,
- ЗАО «УК Южкузбассуголь»: шахты "Абашевская", "Тайжина", "Томусинская" - более 3 тыс. т/сут;
- ОАО «Шахта Полосухинская» – более 3 тыс. т/сут,
- ОАО «Ш/у Интинская УК» шахта "Восточная" – более 3 тыс. т/сут .

Очень высокая среднесуточная добыча угля реализуется на шахте "Котинская", где нагрузка на очистной забой достигает 25 тыс. т/сут. Рекорд по среднемесячной добыче угля принадлежит коллективу этой же шахты в 2010 году, где из пласта мощностью пласта 4,0...4,6 м, оборудованной комплексом DBT, комбайном SL-500, добыто 707,2 тыс. тонн угля. При этом в отдельные периоды нагрузка на очистной забой составляла более 30 тыс.т/сут.

Рекордная нагрузка на очистной забой достигнута на шахте "Талдинская - Западная-1" ОАО "СУЭК-Кузбасс". В марте 2013 год коллектив добычного участка выдал на гора 1007 тыс. т угля. Среднесуточная нагрузка составила 32 тыс. т. Работы велись в лаве 67-09 комплексом DBT, комбайном SL-500 по пласту мощностью 4,5 м.

Приведенные фактические результаты свидетельствует о реальности достижения в перспективе нагрузок 40 тыс. т/сут. Однако реализация концепции в угольной отрасли России потребует применения самых эффективных технологий текущей или заблаговременной дегазации газоносных угольных пластов.

1.4 Выводы

1.4.1 В угольной промышленности России достижение технико-экономических показателей мирового уровня при разработке газоносных угольных пластов с газоносностью более $13 \text{ м}^3/\text{т}$ сдерживается сложностью горно-геологических условий и склонностью угольных пластов к горным ударам и внезапным выбросам угля и газа, что в условиях высоких нагрузок на очистной забой требует проведения значительных по капитальным затратам мероприятий по дегазации пластов – текущей или заблаговременной.

1.4.2 Повышение нагрузок на очистной забой при соблюдении требований безопасности по газовому фактору возможно за счет управления режимом работы выемочного участка на основе прогноза метанообильности очистного забоя на базе использования на практике достижений фундаментальных наук в области массопереноса метана в углепородных массивах.

1.4.3 При высокопроизводительной разработке газоносных угольных пластов необходимо реализовывать технологии дегазации пластов, широкое внедрение которых сдерживается трудоемкостью и высокими материальными затратами мероприятий, что вызывает необходимость разработки более

наукоемких, эффективных и недорогих способов дегазации.

1.4.4 Развитие угольной отрасли России в близкой перспективе будет проходить в направлениях увеличения количества производительного импортного оборудования и внедрения систем мониторинга и автоматизации управления технологическими процессами на базе компьютерных технологий, что требует более широкого привлечения высококвалифицированных специалистов и использования современных достижений науки и техники.

1.4.5 Мировой опыт высокопроизводительной разработки газоносных угольных пластов свидетельствует о широком применении технологий разработки угольных пластов длинными очистными забоями с оставлением барьерных целиков, сдерживающих проявление вертикального горного давления. Однако более высокие требования безопасности достигаются при многоштрековой подготовке выемочных участков за счет более полного использования технических возможностей вентиляции и горного оборудования, работающего под геомеханической защитой мощных целиков.

1.4.6 Сравнительный анализ эффективности использования комбайнов или струговых установок показал, что очистные комбайны предпочтительны при отбойке крепкого угля, а струговые установки - при отбойке и пластов мягкого угля. При этом метановыделение из отбитого угля при работе стругов меньше из-за более высокой крупности фракций угля на лавном конвейере, что особенно важно при разработке газоносных угольных пластов.

2 Исследование источников метанобильности очистного забоя действующих и проектируемых выемочных участков угольных шахт

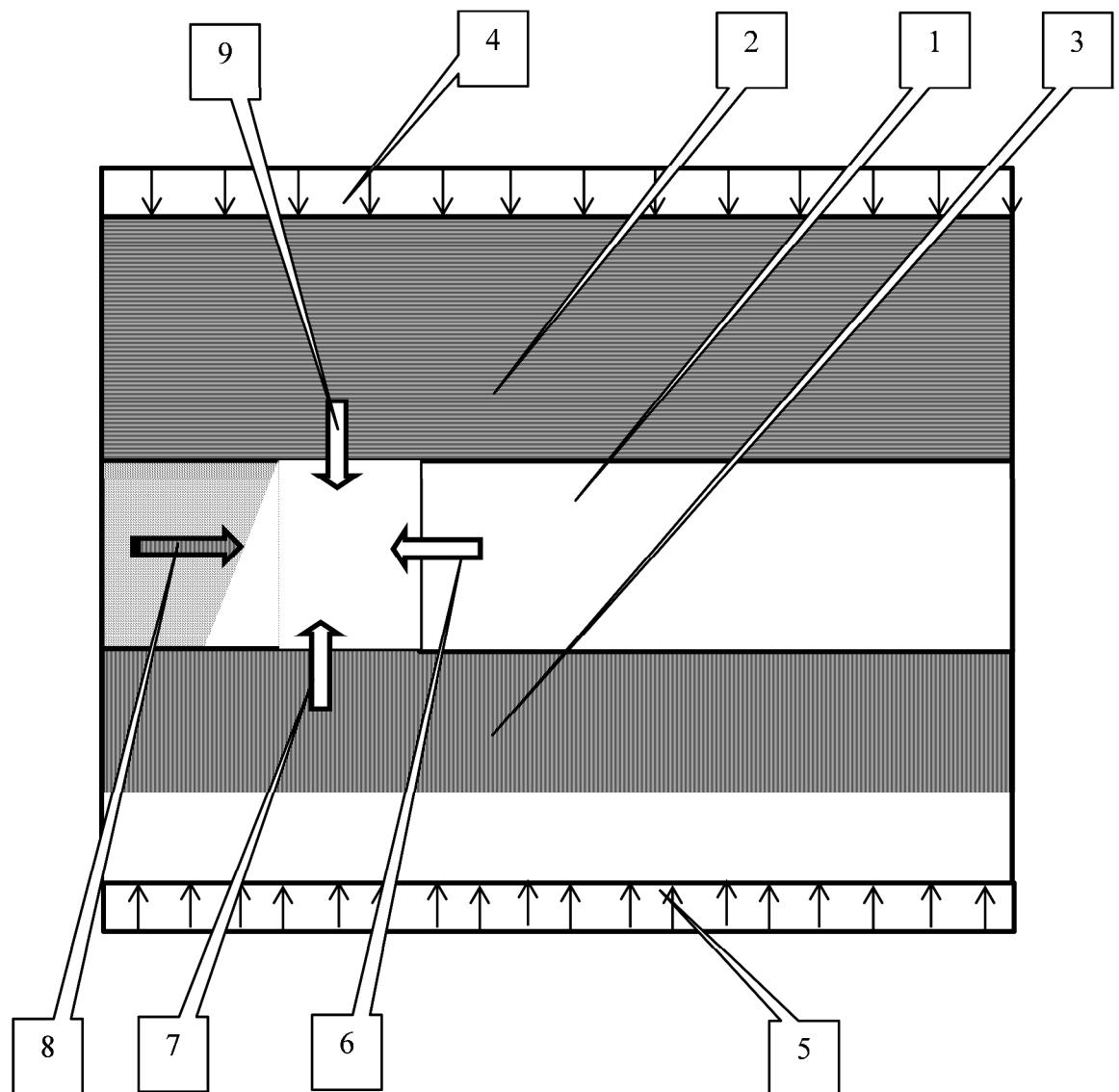
2.1 Исследование притоков в исходящую струю из очистного забоя

Метан в лаву из угольного забоя и вмещающих пород поступает в процессе фильтрации под действием градиента давления в результате перемещения сжатого газа по каналам проницаемости в сторону обнаженной после отбойки свободой поверхности [3,4,107,108]. В отличие от вмещающих пород кровли и почвы, в объеме угля происходят процессы сорбции и десорбции метана на поверхности угля в поровом пространстве, зависящие от давления свободного газа в соответствии с изотермой сорбции Ленгмюра [12,92,135].

На рисунке 2.1.1 схематически показан вертикальный разрез пространства лавы. Притоки метана в лаву происходят из угольного пласта 1, вмещающих пород почвы 7, зоны выработанного пространства 8 и пород кровли 9. Лава поддерживается гидравлической крепью (на рисунке не показано), ограничивающей рабочее пространство от обрушенных пород. Величина притоков метана в лаву зависит от множества факторов, в числе которых скорость движения комбайна в процессе отбойки угля, площадь поверхности очистного забоя, коэффициенты проницаемости угля, пород кровли и почвы. Большое влияние на величину притоков метана оказывает горное давление 4 и 5 от выше и нижележащих вмещающих пород кровли и почвы. Еще один источник газа – это метан, выходящий из фракций отбитого комбайном угля (на рисунке не показан).

Для описания процесса фильтрации газа в трещиновато-пористой среде в изотермических условиях воспользуется дифференциальным уравнением массопереноса, отражающим линейный закон фильтрации Дарси, изотерму сорбции Ленгмюра, закон сохранения массы и уравнение состояния газа [92, 129]. Основанием для использования модели одномерной задачи является то,

что фильтрация метана вдоль длины очистного забоя незначительно влияет на конечный результат расчета.



1- угольный пласт; 2 – породы кровли; 3 – породы кровли; 4 – горное давление вышележащих пород; 5 – горное давление нижележащих пород; 6 – приток метана из угля; 7 – приток метана из почвы; 8 - приток метана из зоны обрушения; 9 – приток метана из кровли

Рисунок 2.1.1 – Источники метана в лаве

Уравнение фильтрации в частных производных в одномерной постановке задачи имеет вид [15,92] :

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\Pi \rho + \frac{abp}{(1+ap)} \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{\mu} \rho \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 0 \quad , \quad (2.1.1)$$

где Π – пористость;

ρ – плотность газа, кг/м³;

a, b – константы сорбции Ленгмюра;

p – давление газа, Па.

k – проницаемость, м²;

μ – динамическая вязкость, Па·с.

Практический интерес представляют закономерности процесса фильтрации метана из угля в лаву в течение рабочей и ремонтной смены. В течение рабочей смены при продольном движении комбайна на прямом и обратном ходе интенсивность поступления метана нарастает по мере обнажения свободной поверхности пород при отбойке угля. С увеличением времени от момента обнажения поверхности забоя интенсивность истечения метана из пласта понижается, и этот фактор следует учитывать в расчетной модели.

Второй важный режим массопереноса относится к ремонтной смене длительностью 6 часов, наступающей после трех рабочих смен. Во время ремонтной смены комбайн не работает и интенсивность притока метана в лаву в течение времени монотонно понижается.

Используя теоретическую модель и доступные данные результатов шахтных замеров можно на основе решения обратной задачи оценить фильтрационные свойства пласта, включая такой трудно предсказуемый параметр, как газопроницаемость угля в зоне опорного горного давления. Значение газопроницаемости представляет большой интерес, так как даже самые совершенные теоретические модели еще не способны учесть влияние сложно напряженного состояния в зоне опорного давления на изменение газопроницаемости угля и вмещающих пород.

Для решения задачи воспользуемся следующими краевыми условиями:

- начальное давление метана пласте перед мгновенным, по условию задачи, обнажением свободной поверхности равно начальному постоянному пластовому давлению p_0 ;

$$p(x, 0) = p_0 ; \quad (2.1.2)$$

- на большом удалении от свободной поверхности давление постоянное и равно пластовому давлению:

$$\frac{\partial p(\infty, t)}{\partial x} = 0 ; \quad (2.1.3)$$

$$p(\infty, t) = p_0 ; \quad (2.1.4)$$

- давление газа на свободной поверхности в течение всего последующего процесса фильтрации метана равно атмосферному давлению

$$p(0, t) = p_{\text{ат}} . \quad (2.1.5)$$

Используя плоскопараллельную модель фильтрации метана из угольного пласта выполним расчет приток метана в зависимости от скорости движения комбайна вдоль очистного забоя. При этом поставим задачу определения суммарного притока метана при расположении очистного комбайна в конце заходки, когда происходит обнажение забоя при ширине захвата комбайна Δh в процессе его движения. Сумма притоков метана по всей длине очистного забоя описывается интегралом

$$Q(v) = m \int_0^L q \left(0, \frac{L-y}{v} \right) dy \quad (2.1.6)$$

где $Q(v)$ – сумма притоков метана по всей площади очистного забоя, $\text{м}^3/\text{с}$;
 v – скорость движения комбайна, $\text{м}/\text{с}$;

m – мощность пласта, м;

L – длина очистного забоя, м;

$q \left(0, \frac{L-y}{v} \right)$ – удельный приток метана с поверхности забоя ($x=0$) в момент времени $t = \frac{L-y}{v}$.

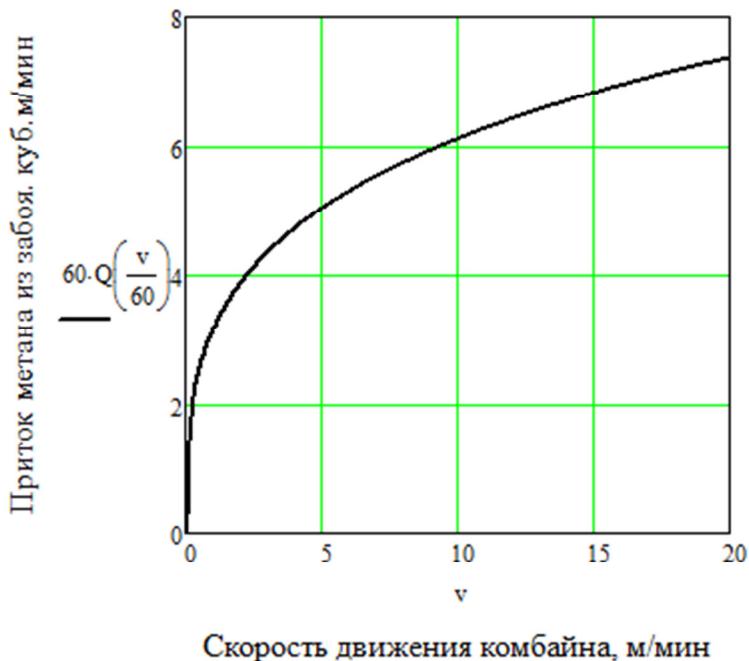
Рассмотрим подынтегральную функцию. При $y = 0$ имеем значение удельного дебита метана в момент времени L/v , что соответствует положению источника метана в начале очистного забоя относительно комбайна. Напротив, при $y = L$ получим другое и большее значение удельного притока, которое соответствует местоположению комбайна в конце очистного забоя. В этом случае удельный приток метана происходит со всей свежей обнаженной поверхности забоя. С точки зрения расчетов на безопасность по газу наибольший интерес представляет такое расположение комбайна в лаве, при котором приток метана максимален и при этом расположении комбайна следует определять максимально допустимую производительность. В частности, в известных методиках расчета в качестве самого "метанобильного" расположения комбайна рассматривалось расположение в конце заходки [107,108]. Примем во внимание, что данный фактор, на самом деле, требует более детальных исследований.

Будем считать, что концентрация метана в исходящей струе определяется суммарным притоком метана по всей длине лавы, включая уголь, вмещающие породы и выработанное пространство. В действительности при максимально допустимой по правилам безопасности скорости вентиляционного потока, равной 4 м/с, метан из начального участка приходит в исходящую струю примерно через одну минуту. Однако погрешность результата расчета не такая существенная, поскольку различие в удельных притоках метана через одну или две минуты в рассматриваемом диапазоне не значительная и не превышает 0,5%. Этот вывод подтверждается графиком на рисунке 2.1.2.

В частности при скоростях движения комбайна 3,286 м/мин и 3,239 м/мин различие во времени прихода комбайна до конечного пункта забоя 230 м

составляет одна минута. За это время, судя по графику, приток метана в лаву изменится незначительно, на величину

$$\frac{4.46 - 4.45}{4.46} \cdot 100 = 0,224\%$$



$q_r = 12 \text{ м}^3/\text{т}$; $p_0 = 1,65 \text{ МПа}$; $\Pi = 0,02$; константы Ленгмюра: $a = 0,207 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}$; $b = 49,3 \text{ м}^3/\text{т}$; $k = 0,01 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$; $T = 300 \text{ }^\circ\text{К}$, $\mu = 1,08 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$

Рисунок 2.1.2 – Притоки метана из забоя в лаву в зависимости от скорости движения комбайна в процессе отбойки

Реальные скорости движения комбайна в процессе отбойки угля, при которой достигается нагрузка на очистной забой в пределах от 5 до 15 тыс. т/сутки в рассматриваемых условиях составляет от 10 до 20 м/мин. Таким образом, представленный график 2.1.2 отражает возможную ситуацию с некоторым запасом по максимальной скорости движения комбайна.

Притоки метана из очистного забоя зависят от длительности обнажения поверхности забоя после проходки комбайна. Естественно при больших производительностях отбойки угля время дегазации участка отбойки уменьшается и по этой причине в отбитом угле, при ширине захвата комбайна 0,8 м, будет находиться большее количество свободного газа. Такую ситуацию

отражает график на рисунке 2.1.3, из которого в частности следует, что на глубине 0,4 м через 20 минут после обнажения поверхности забоя давление свободного газа составляет 1,6 МПа. В этой же точке через 40 минут давление газа понизилось до величины 1,43 МПа.

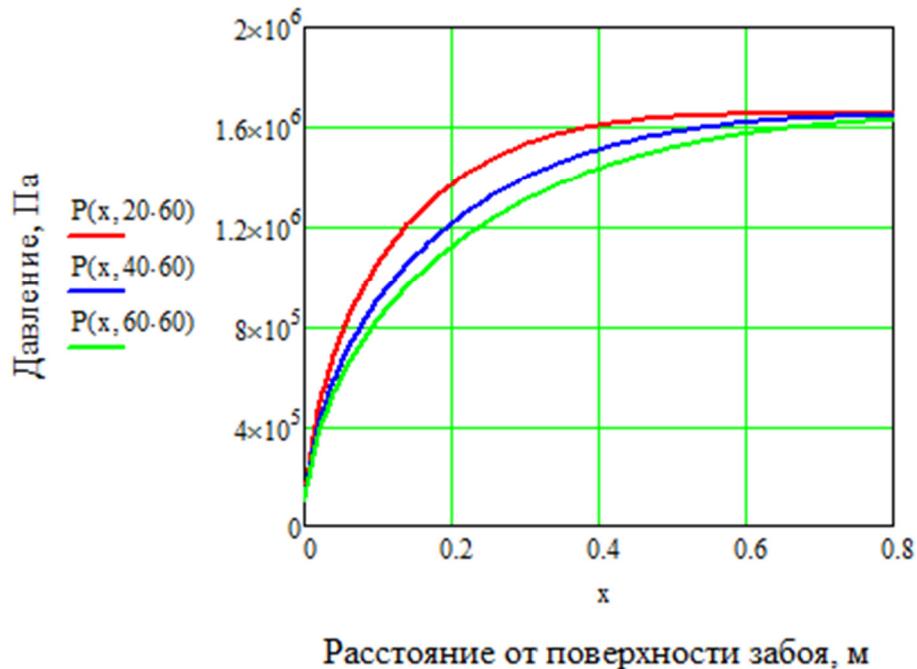


Рисунок 2.1.3 - Распределение давления газа в угле вдоль ширины заходки комбайна

Оценим максимальное количество свободного газа в отбитом угле. Интегрированием предварительно определим среднее давление газа в отбитом угле

$$P_{cp} = \frac{\int_0^{\Delta h} P(x,t) dx}{\Delta h} \quad (2.1.7)$$

где P_{cp} – среднее давление метана в отбитом угле, Па;

$P(x, t)$ – распределение давления метана вглубь пласта по направлению x , Па;

Δh – ширина заходки комбайна, м.

По результатам распределения давления газа на рисунке 2.1.3 имеем следующие средние значения:

при $t=20$ мин, $P_{cp} = 1,442$ МПа;

при $t=40$ мин, $P_{cp} = 1,357$ МПа.

Таким образом, среднее давление в отбитом угле по мере дегазации пласта в течение времени, естественно, понижается.

На рисунке 2.1.4 построена аналогичная зависимость, относящаяся дегазации пласта в течение ремонтной смены, то есть через 6 часов после последней производительной заходки комбайна. В течение шестичасовой ремонтной смены видимая дегазации происходит на глубину не более 2 м. Следовательно, эффект дегазации за счет ремонтной смены будет ощущаться только в течение первых двух заходок комбайна. В дальнейшем различие в притоках метана не существенно и фактор дегазации в течение ремонтной смены не проявляется.

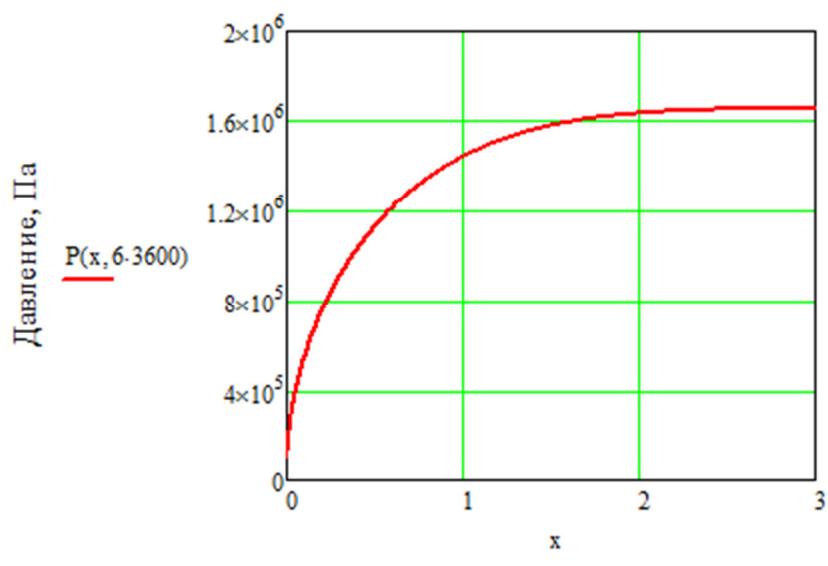


Рисунок 2.1.4 – Давление метана в угольном пласте через 6 часов, в конце ремонтной смены

На рисунке 2.1.5 представлен результат расчета при этих же исходных данных удельного притока метана с поверхности забоя (при $x = 0$) в течение

времени до конца ремонтной смены. Удельный объемный поток метана в направлении к свободной поверхности в соответствии с законом Дарси составляет

$$q(x,t) = \frac{k}{\mu} \frac{\partial P(x,t)}{\partial x} \quad (2.1.8)$$

где $q(x,t)$ – удельный поток метана в угольном пласте в направлении к свободной поверхности забоя, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

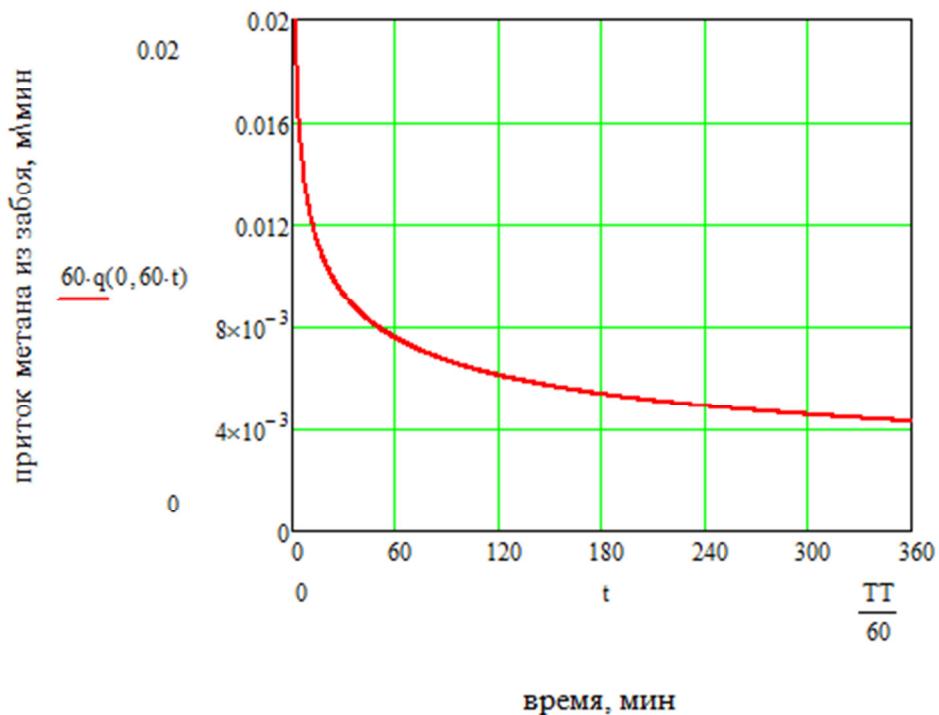


Рисунок 2.1.5 – Удельный приток метана из угольного пласта в течение времени ремонтной смены

Притоки метана в начальный момент времени не следует принимать во внимание, ввиду погрешности при записи начального условия, так как предполагается мгновенное обнажение угольного забоя, что не соответствует действительности. Однако при больших временах наступает квазиустановившийся режим фильтрации и тогда фактор начального условия становится не существенным.

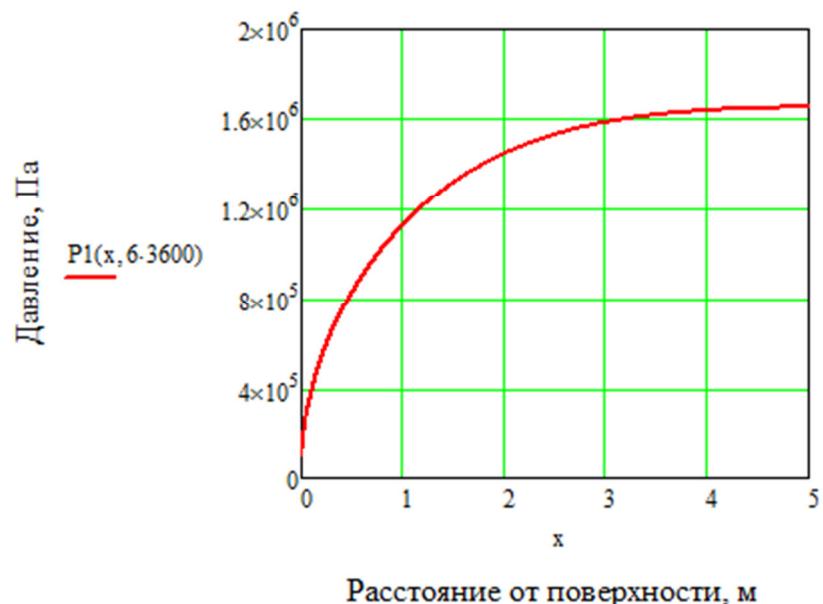
Судя по рисунку 2.1.5, в середине ремонтной смены, примерно через 3 часа, удельный приток метана составляет $q=0,0054 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$. Следовательно, в исходящую струю из очистного забоя длиной $L=230 \text{ м}$, при мощности пласта $m=2,23 \text{ м}$ поступает объемное количество метана величиной

$$Q=q \cdot m \cdot L. \quad (2.1.9)$$

Результат расчёта

$$Q=0,0054 \cdot 2,23 \cdot 230=2,89 \text{ норм. м}^3/\text{мин.}$$

Выполним аналогичные расчеты распределения давления газа во вмещающих породах. На рисунке 2.1.6 представлено распределение давления по глубине вмещающих пород в конце ремонтной смены.



$$p_0=1,65 \text{ МПа}; \Pi=0,02; p_{am}=0,1 \text{ МПа}; k=0,01 \text{ мД}, \Pi=2,0\%; \\ T=300 \text{ }^{\circ}\text{К}; \mu=1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

Рисунок 2.1.6 – Распределение давления метана во вмещающих породах в конце ремонтной смены

Сравнительный анализ распределения давления свидетельствует о более сильной дегазации пород по сравнению с углем, что объясняется отсутствием

сорбционных процессов в породах. При этом удельные притоки метана также весьма существенно различаются.

На рисунке 2.1.7 показано изменение удельных притоков метана в лаву из вмещающих пород.

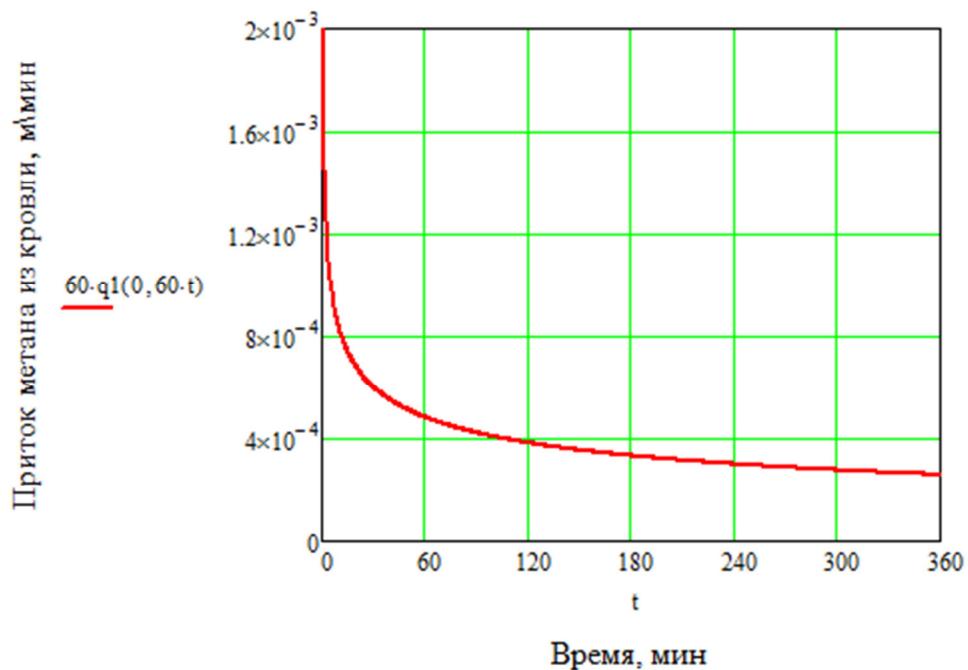


Рисунок 2.1.7 – Удельный приток метана из вмещающих пород в течение ремонтной смены

Выполним оценку притока метана в лаву из вмещающих пород. Из рисунка 2.1.7 определяем, что в середине ремонтной смены удельный приток метана из вмещающих пород составляет $0,00033 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$. Далее по формуле (2.1.9), полагая продольный размер вмещающих пород 5м, вычислим фактический приток метана в лаву

$$Q = 0,00033 \cdot 5,0 \cdot 230 = 0,38 \text{ м}^3/\text{мин}$$

Сопоставляя полученное значение с рассчитанным ранее притоком метана из угольного пласта, приходим к выводу, что приток метана в лаву из угольного пласта в 7,6 раз больше чем из вмещающих пород. Следовательно, вклад угольного забоя в притоки метана в лаву является определяющим. Результаты расчета не противоречат данным практики. Однако влиянием

вмещающих пород не следует пренебрегать, поскольку этот фактор может более существенно проявляться при наличии высокопроницаемых вмещающих пород, к тому же деформированных горным давлением. Степень деформации и дезинтеграции пород над лавой можно уменьшать распорным давлением крепи, что представляет самостоятельный научный и практический интерес и требует дополнительных исследований.

Следует отметить, что в методике расчета решается одномерная задача и принята модель плоскопараллельной фильтрации метана по направлению к свободной поверхности. Реальная картина отличается от картины, принятой в расчетах, и по физическому смыслу приводит к меньшим значениям дебитов. Поэтому, используя данную модель, следует принимать во внимание, что расчеты проводятся с некоторым запасом надежности, что особенно важно при решении задач безопасности горных работ по газовому фактору.

Достоверность результатов представленной методики расчета имеет большое значение для решения обратной задачи с целью определения проницаемости угольного пласта в зоне опорного давления. На практике работу очистного забоя можно организовывать так, что бы по результатам замеров концентрации метана в исходящей струе можно судить о проницаемости угля. Эта информация необходима для прогноза притоков метана в течение последующих рабочих смен.

2.2 Исследование процесса дегазации отбитого угля в течение времени

Уравнение массопереноса метана в угольном пласте, используемое в наших аналитических моделях представлено формулой (2.1.1). При использовании уравнения (2.1.1) в сферической системе координат (r, θ, φ) дивергенция и градиент вычисляются по формулам[17]:

$$div A = \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left(\frac{\partial}{\partial r} (A_r r^2 \sin \theta) + r \frac{\partial}{\partial \theta} (A_\theta \sin \theta) + r \frac{\partial A_\phi}{\partial \phi} \right); \quad (2.2.1)$$

$$grad A = \frac{\partial A}{\partial r} \vec{n}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial \theta} \vec{n}_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial A}{\partial \phi} \vec{n}_\phi \quad (2.2.2)$$

В центрально-симметричной постановке задачи эти же выражения принимают вид

$$div A = \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left(\frac{\partial}{\partial r} (A_r r^2 \sin \theta) \right) = \frac{\partial A_r}{\partial r} + \frac{2 A_r}{r} \quad (2.2.3)$$

$$grad A = \frac{\partial A}{\partial r} n_r \quad (2.2.4)$$

С учетом последних выражений уравнение массопереноса метана (2.1.1) в сферической частице в центрально-симметричной постановке задачи принимает вид:

$$p \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right)^2 + \frac{2}{r} p \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\mu \cdot \Pi}{k} \left[1 + A \frac{ab}{(1+ap)^2} \right] \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2.2.5)$$

$$\text{где } A = \frac{RT}{\mu_{CH_4}} \cdot \frac{1}{\Pi}; \quad p = p(r, t).$$

Рассмотрим задачу о выделении метана из отбитого комбайном угля в течение времени его транспортирования на лавном конвейере, начиная от места отбойки до выхода в откаточный штрек. Из решения задачи можно определить степень дегазации угля в лаве. Решение задачи позволяет также определить количество метана, которое отдает уголь в шахте и за ее пределами на участке складирования на земной поверхности. Решение задачи представляет также интерес для определения сорбционных и фильтрационных свойств угля в лабораторных условиях в испытаниях по определению газоносности методом

интегрального подсчета интенсивности выделения метана в течение длительного времени.

Итак, по условию задачи объем частицы угля в момент отбойки комбайном насыщен свободным метаном под давлением p_0 . Это давление по своей величине меньше пластового давления метана, поскольку имеет место дегазация угольного пласта со свободной поверхности забоя за время между двумя циклами отбойки угля комбайном. Среднее давление метана в частицах отбитого угля определяется усреднением давления в слое по ширине захвата комбайна. После отбойки частицы угля на ее свободной поверхности устанавливается шахтное атмосферное давление газа p_{at} , что приводит к массопереносу метана под действием градиента давлений. Для определённости примем, что частица имеет сферическую форму. Тогда в центре частицы градиент давления равен нулю. Таким образом, запишем краевые условия задачи, необходимые для решения дифференциального уравнения (2.2.5).

Начальное условие: давление метана в поровом пространстве отбитой сферической частицы угля не зависит от радиуса, является величиной постоянной

$$p(r, 0) = p_0 \quad (2.2.6)$$

Граничные условия: давление на свободной поверхности сферы радиусом R_0 равно атмосферному давлению

$$p(R_0, t) = p_{at} \quad (2.2.7)$$

В центре сферы выполняется условие симметричности

$$\frac{\partial p(0,t)}{\partial r} = 0 \quad (2.2.8)$$

В качестве примера рассмотрим вариант дегазации угля, отбиваемого с производительностью G (кг/с) и находящегося в лаве в процессе транспортирования на конвейерной ленте в течение времени t . Положим, что средний радиус отбитой фракции угля составляет R_0 . Сначала рассмотрим дегазацию одной частицы отбитого угля, в поровом пространстве которой сформировано начальное давление метана $p_0 = 1,27$ МПа. По промежуточным расчетам эта величина соответствует пластовому давлению метана величиной $p_0 = 1,65$ МПа (газоносность угля $12 \text{ м}^3/\text{т}$). При этом выполнено условие дегазации угольного забоя перед очередной отбойкой в течение 68,5 мин.

Время нахождения угля на конвейерной ленте зависит от места положения комбайна в процессе отбойки, длины лавы и скорости движения конвейера

$$t = \frac{L-y_1}{v_k} \quad (2.2.9)$$

При скорости движения конвейера $v_k = 2,4$ м/с, при длине лавы $L=240$ м, длительность дегазации отбитого угля изменяется от нуля - при расположении комбайна на границе с конвейерным штреком, до 100 сек – при расположении комбайна на границе с вентиляционным штреком.

Выполним компьютерный расчет, методом конечных элементов, принимая во внимание следующие формулы:

удельный радиальный поток метана в сферической частице

$$q(r, t) = \frac{C_c}{\mu} \frac{\partial p(r, t)}{\partial r}, \text{ м/с} \quad (2.2.10)$$

Интегральный приток метана лаву с поверхности сферической частицы за время t

$$V_{ch4}(t) = 4\pi R_0^2 \int_0^t q(R_0, t) dt, \text{ м}^3 \quad (2.2.11)$$

Относительная дегазация частицы

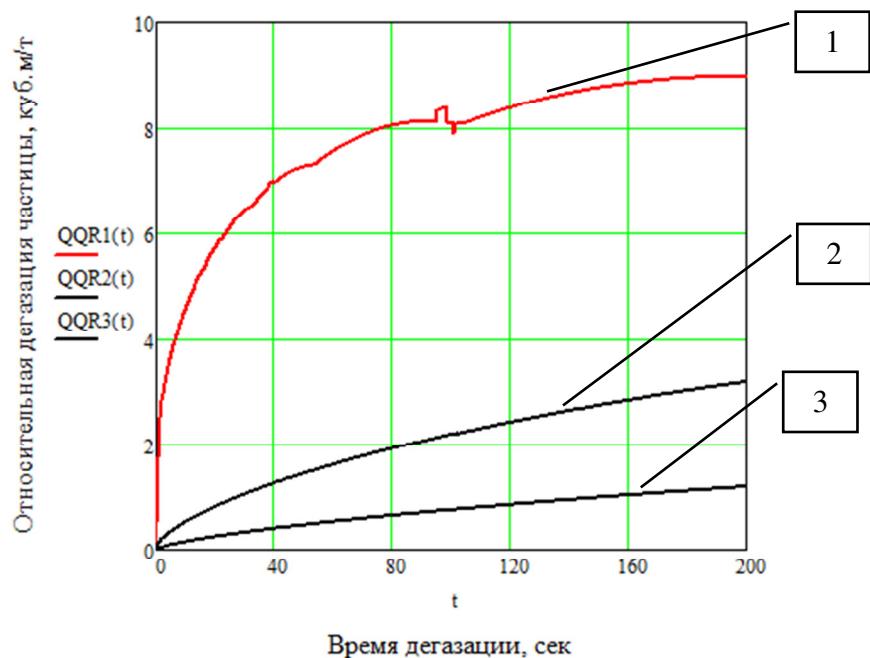
$$\Delta q_{\Gamma}(t) = \frac{V_{ch4}(t)}{\rho_y \frac{4\pi R_0^3}{3}}, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (2.2.12)$$

Приток метана в лаву при заданных параметрах работы комбайна

$$Q_{ch4} = (1 - n_3)v \cdot m \cdot \Delta h \cdot \frac{3}{R_0} \Delta q_{\Gamma}(t), \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.2.13)$$

где n_3 - зольность угля, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

На рисунке 2.2.1 представлена зависимость относительной дегазации сферической частицы угля в течение времени. Аномальная флуктуация на первом графике не имеет физического смысла и объясняется погрешностью компьютерного расчета методом конечных элементов.



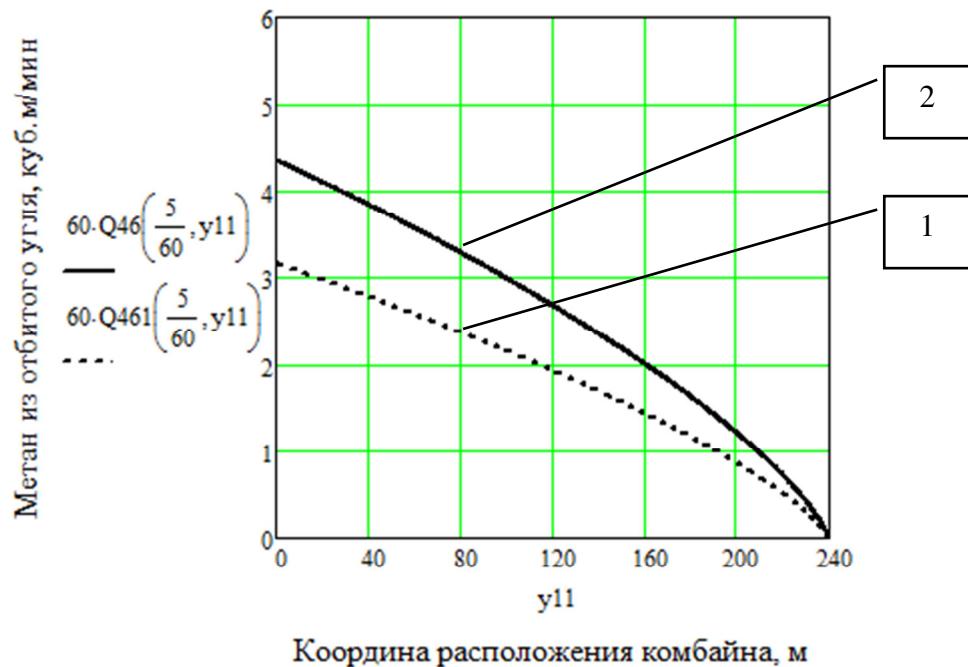
$$q_{\Gamma} = 12 \text{ м}^3/\text{т}; C_c = 0,5 \cdot 10^{-21} \text{ м}^2; p_0 = 1,65 \text{ МПа}; p_{\text{ат}} = 0,1 \text{ МПа}; \Pi = 0,02; a = 0,207 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}; b = 49,3 \text{ м}^3/\text{т}; T = 300 \text{ }^{\circ}\text{К}; \rho_y = 1,28 \text{ т/м}^3$$

$$1 - R_0 = 0,25 \text{ мм}; 2 - R_0 = 1 \text{ мм}; 3 - R_0 = 2,25 \text{ мм};$$

Рисунок 2.2.1 - Относительная дегазация сферической частицы угля при различных размерах в течение времени

В частности, сильно измельчённая частица угля радиусом $R_0=0,25$ мм за время 200 сек дегазируется на величину $9,0 \text{ м}^3/\text{т}$, а более крупная частица радиусом $R_0=4,5$ мм за это же время дегазируется на $1,2 \text{ м}^3/\text{т}$. Таким образом, дегазация сильно измельченных частиц происходит намного интенсивнее по сравнению с более крупными фракциями. Соответственно, притоки метана в лаву также возрастают при увеличении степени измельчения отбитого комбайном угля. Аналогичные результаты о сильном влиянии фракционного состава получены в работах [47,55], что подтверждает правомерность наших выводов.

На рисунке 2.2.2 представлена зависимость притоков метана в лаву из отбитого комбайном угля при среднем радиусе частиц $R_0=25$ мм в зависимости от координаты расположения комбайна в лаве.



$$q_r = 12 \text{ м}^3/\text{т}; C_c = 0.5 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2; p_{cp} = 1,27 \text{ МПа}; p_{at} = 0,1 \text{ МПа}; \Pi = 0,02; a = 0,207 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}; b = 49,3 \text{ м}^3/\text{т}; T = 300 \text{ }^\circ\text{К}; R_0 = 25 \text{ мм}, v = 5 \text{ м/мин}, n_3 = 0,27$$

$$1 - v_k = 2,4 \text{ м/с}; 2 - v_k = 3,8 \text{ м/с}$$

Рисунок 2.2.2 – Приток метана в лаву из отбитого угля в зависимости от расположения комбайна в лаве

Скорость движения комбайна при отбойке составляет 5 м/мин. В рассмотренном случае наибольший приток метана из отбитого угля имеет

место при расположении комбайна на максимальном удалении от конвейерного штрека, в направлении которого перемещается вентиляционный поток. В этом случае длительность нахождения отбитого угля на ленте конвейера в лаве максимальна и составляет 100 сек. Из анализа полученной на рисунке 2.2.2 зависимости можно сформулировать практическую рекомендацию о целесообразности повышения скорости движения конвейера, что будет способствовать снижению концентрации метана в исходящей струе.

Целесообразно также так организовать отбойку угля, чтобы исключить чрезмерное измельчение фракций угля. Из графика на рисунке 2.2.2 следует, что максимальный приток метана из отбитого угля составляет $4,4 \text{ м}^3/\text{мин}$ при скорости конвейера $2,4 \text{ м/с}$. Если же скорость повысить до $3,8 \text{ м/с}$, то приток метана уменьшится до величины $3,2 \text{ м}^3/\text{мин}$. Расчетная величина притоков метана существенно зависит от газопроницаемости мелких угольных фракций.

Корректировка проницаемости возможна на основе решения обратной задачи путем сопоставления с фактическими шахтными наблюдениями. Однако и на этой стадии анализа становится очевидным, что газопроницаемость угля в неразгруженном от горного давления пласте пласте и отбитых кусках угля различаются кардинально, в тысячи раз. Причиной такого значительного разлия является то, что газопроницаемость угольного пласта происходит преимущественно через трещины. В данном случае монолитный уголь между трещинами может считаться условно газонепроницаемой средой. Когда же мы рассматриваем модель частицы отбитого угля, то в данном случае проницаемость определяется другим физическим механизмом и происходит не через трещины, которых там нет, а по каналам открытой микропористости.

Следует обратить внимание на еще один фактор, который не учтен в модели – это темп истечения метана из глубины слоя отбитого гля, лежащего на конвейере. То есть в расчетах не учтен механизм, когда часть метана в глубине насыпанного слоя угля на конвейере может десорбироваться по описанному выше физическому механизму, однако не успеет попасть конвективно в пространство лавы. Однако принимая во внимание высокую

скорость движения лавного конвейера, в результате которого происходит интенсивное провортивание отбитого угля, можно предположить, что практически весь метан с конвейерной ленты все же выйдет в лаву.

2.3 Анализ влияния гранулометрического состава отбитого угля на притоки метана в исходящую из лавы струю

В процессе работы очистного комбайна отбитый уголь перемещают с помощью забойного конвейера вдоль лавы по направлению к конвейерному штреку. В течение этого времени из отбитых кусков угля свободный метан поступает в вентиляционный поток, повышая тем самым концентрацию метана исходящей из лавы струе. Очевидно, что чем меньше средний размер частиц отбитого угля, тем больше метана поступает в вентиляционный поток. Поэтому одним из путей управления концентраций метана в исходящей струе является регулирование гранулометрического состава отбиваемого угля. Этот путь управления газовыделением на практике достигается оптимизацией формы породоразрушающих зубьев на шнеках комбайна с целью исключения чрезмерного измельчения угля.

В этом смысле правомерно предположить, что при струговой выемке, при которой отбиваются более крупные куски угля, по сравнению с комбайновой выемкой, интенсивность притоков метана из угля в процессе транспортирования забойным конвейером будет меньше. Фактор меньшей газообильности лавы при использовании струговой выемки по сравнению с комбайновой является хорошо известным и подтверждается представленными выше расчётами.

Местоположение комбайна в лаве также оказывает влияние на притоки метана в исходящую струю. К примеру, если комбайн находится на выходе из лавы вблизи конвейерного штрека, притоки метана в исходящую струю из забойного конвейера будут минимальны, так как за более короткое время транспортирования угля от места отбойки до штрека метана выделяется

меньше. В этом случае, наибольший вклад в суммарный приток метана оказывает очистной забой угольного пласта, с поверхности которого метан под действием пластового давления переносится в призабойное пространство. Напротив, при расположении комбайна на максимальном удалении от конвейерного штрека приток метана в лаву - время транспортирования угля будет максимальным, а с поверхности очистного забоя минимальным. Поскольку две функциональные зависимости имеют различную направленность относительно линии забоя, очевидно, существует такое местоположение комбайна в лаве, при котором интегральный приток метана из указанных источников будет экстремальным. Это критическое местоположение комбайна представляет практический интерес при решении задачи обеспечения безопасности работ по газовому фактору.

На величину притоков метана из отбитого угля в лаву оказывает влияние скорость движения лавного конвейера. Чем больше скорость, чем меньше времени отбитый уголь находится в лаве и, следовательно, приток метана уменьшается. Таким образом, увеличивая скорость движения конвейера в лаве в теоретическом пределе можно создать такие условия, когда метан из отбитого угля почти не попадет в вентиляционный поток. Поэтому при прочих равных условиях для сокращения притока метана из отбитого угля следует включать наибольшую скорость движения лавного конвейера.

Выполним расчеты интенсивности притоков метана в зависимости от размеров фракций. В таблице 2.3.1 представлены результаты ситового анализа и качественная характеристика отдельных классов угля на шахте им. С.М. Кирова, по пласту "Болдыревский". Место отбора пробы – исходящая струя лавы № 25-93.

Таблица 2.3.1 – Гранулометрический состав угля после отбойки комбайном

– ОАО шахта им. С.М. Кирова, 02 02.2012 – лава 25-93				
Классы, мм	Наименование продуктов	Выход классов		Зола, %
		в кг	в %	
50...100	уголь	3.28	13.1	7.7
	сростки	0	0	0
	порода	3.41	13.6	88.1
	всего	6.69	26.6	48.1
25...50	уголь	0.9	3.6	5.8
	сростки	0.1	0.4	80.6
	порода	0.99	3.9	88.6
	всего	1.99	7.9	50.8
13...25	уголь	2.72	10.8	23.2
6...13	уголь	4.35	17.3	24.0
3...6	уголь	2.16	8.6	26.4
1...3	уголь	3.98	15.9	21.2
0...1	уголь	3.22	12.8	24.3
Сумма всех классов для каждого продукта	уголь	20.61	82.1	20.3
	сростки	0.1	0.4	80.6
	порода	4.4	17.5	88.2
	всего	25.11	100	32.4
Средне-взвешенный размер фракции - 27,3 мм				

В таблицах 2.3.2-2.3.4 представлен гранулометрический состав угля по всему направлению перемещения, начиная от отбойки комбайном до места загрузки перед бункером на земной поверхности. В грансоставе около 50% преобладают фракции в диапазоне до 13 мм. Крупных фракций более 150 мм после шахтной дробилки нет. Тем не менее, по экспертной оценке, выход из лавы негабаритных кусков с размерами 100...300 мм составляет не более 5 %. (в таблице 2.3.1 не отмечено).

В таблице 2.3.2 представлен гранулометрический состав угля после шахтной дробилки, осуществляющей измельчение угля после комбайна. Получен на первый взгляд парадоксальный результат: средний диаметр куска после комбайна (до дробилки) составляет 13,3 мм, а после дробилки - 26,3 мм (таблица 2.3.3). Однако парадоксальное несоответствие объясняется тем, что шахтная

дробилка измельчает в основном негабаритные куски угля, которые в отборе грансостава на первой стадии не участвуют.

Таблица 2.3.2 – Гранулометрический состав угля после отбойки комбайном

Шахта Красноярская 21 06.2012, пласт "Байкаимский"				
Место отбора – лавный привод до дробилки забоя 1306				
Классы, мм	Наименование продуктов	Выход классов		Зола,
		в кг	в %	%
100...150	уголь	3.4	3.1	8.0
	сростки	0	0	0
	порода	3.1	2.8	90.3
	всего	6.5	5.4	47.3
50...100	уголь	5.1	4.6	6.1
	сростки	0	0	0
	порода	3.1	2.8	90.7
	всего	8.2	7.4	38.1
25-50	уголь	8.1	7.5	5.2
	сростки	0	0	0
	порода	6.1	5.5	89.8
	всего	14.4	13.1	41.3
13...25	уголь	30.5	27.7	14.2
6...13	уголь	19.1	17.9	13.3
3...6	уголь	14.3	13.0	12.2
1...3	уголь	12.3	11.2	13.4
0...1	уголь	4.2	3.8	17.
Сумма всех классов для каждого продукта	уголь	97.8	88.8	13.0
	сростки	0	0	0
	порода	12.3	11.2	90.2
	всего	110.1	100	22.0
Примечание		Класс 0-13 составляет 45.9%		
Средне-взвешенный размер фракции - 13,3 мм				

Таблица 2.3.3 – Гранулометрический состав угля после шахтной дробилки

Шахта Красноярская 21 06.2012, пласт "Байкаимский" Место отбора – лавный привод после дробилки к/ш лава 1306				
Классы, мм	Наименование продуктов	Выход классов		Зола, %
		в кг	в %	
100...150	уголь	3.3	4.0	8.1
	сростки	0	0	0
	порода	2.6	3.2	90.7
	всего	5.9	7.2	44.5
50...100	уголь	4.2	5.	6.2
	сростки	0	0	0
	порода	3.0	3.7	90.7
	всего	7.2	8.8	41.5
25-50	уголь	4.2	5.1	5.7
	сростки	0	0	0
	порода	4.1	5.2	89.8
	всего	8.5	10.4	48.8
13...25	уголь	18.0	21.9	13.1
6...13	уголь	15.5	18.9	11.5
3...6	уголь	11.6	14.1	11.9
1...3	уголь	10.4	12.7	11.4
0...1	уголь	5.0	6.1	13.0
Сумма всех классов для каждого продукта	уголь	72.2	87.9	12.
	сростки	0	0	0
	порода	9.9	12.1	22.1
	всего	82.1	100	22.1
Примечание		Класс 0-13 составляет 51.8%		
Средне-взвешенный размер фракции – 26.3 мм				

На последующих стадиях перемещения угля до места загрузки в бункер средний диаметр фракции незначительно понижается до величины 23.5 мм, что представлено в таблице 2.3.4.

Таблица 2.3.4 – Гранулометрический состав угля

Шахта Красноярская 21 06.2012, пласт "Байкаимский"				
Место отбора – перед бункером п.3				
Классы, мм	Наименование продуктов	Выход классов		Зола, %
		в кг	в %	
100...150	уголь	2,5	3,4	6,8
	сростки	0	0	0
	порода	1,6	2,2	90,0
	всего	4.1	5,7	39,3
50...100	уголь	2,7	3,7	8,1
	сростки	0	0	0
	порода	1,7	2,3	9,2
	всего	4,4	6,1	39,8
25-50	уголь	5,0	6,9	7,1
	сростки	0	0	0
	порода	4,0	5,5	76,6
	всего	9,0	1,4	38,0
13...25	уголь	17,0	23,4	17,0
6...13	уголь	14,0	19,3	12,0
3...6	уголь	11,0	15,2	12,5
1...3	уголь	9,5	13,1	14,1
0...1	уголь	3,5	4,8	4,9
Сумма всех классов для каждого продукта	уголь	65,2	89,9	14,0
	сростки	0	0	0
	порода	7,3	10,1	82,7
	всего	72,5	100	21,2
Примечание		Класс 0-13 составляет 52,4%		
Средне-взвешенный размер фракции – 23,5 мм				

По данным таблицы 2.3.1 средний диаметр кусков угля составляет 27,3 мм. Зольность угля составляет 22%.

Положим, что удельный поток метана из сферической частицы диаметром d_i за время t нахождения угля на ленте в пределах лавы составляет

$$q_i(d_i, t) = \frac{C}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r}, \quad \text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \quad (2.3.1)$$

Тогда поток метана с поверхности частицы в течение времени ее нахождения в лаве определяется интегрированием

$$Q_i(t) = \pi d_i^2 \int_0^t q_i(d_i, t) dt, \text{ м}^3 \quad (2.3.2)$$

При отбойке угля комбайном с производительностью G_y суммарный поток метана за время нахождения угля на лавном конвейере составляет

$$Q_{CH4}(t) = G_y \sum_{i=1}^N n_i Q_i(t), \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.3.3)$$

Если предположить, что метан выделяется в основном только из угля и потоками метана из зольной части пренебречь, то при расчете G_y этот фактор следует учитывать умножением нагрузки на очистной забой на поправочный коэффициент, учитывающий содержание в отбитой массе чистого угля

$$G_y = (1 - n_3) \cdot A \quad (2.3.4)$$

где n_3 – зольность угля.

Выполним расчет приток метана из сферической частицы. Дифференциальное уравнение массопереноса в центрально-симметричной постановке задачи имеет вид (2.2.6). В разделе 2.2 представлены начальные и граничные условия задачи. Решение уравнения (2.2.6) выполнено численным методом средствами программного продукта Mathcad-14.

Расчет выполнен для гранулометрического состава угля на конвейерной ленте в соответствии с таблицей 2.3.2 при скорости движения ленты лавного конвейера 2,4 м/сек. Как следует из рисунка 2.3.1, наибольший приток метана в вентиляционный поток имеет место из мелких фракций несмотря на то, что их процентное содержание не высокое и не превышает 5%. При этом крупные

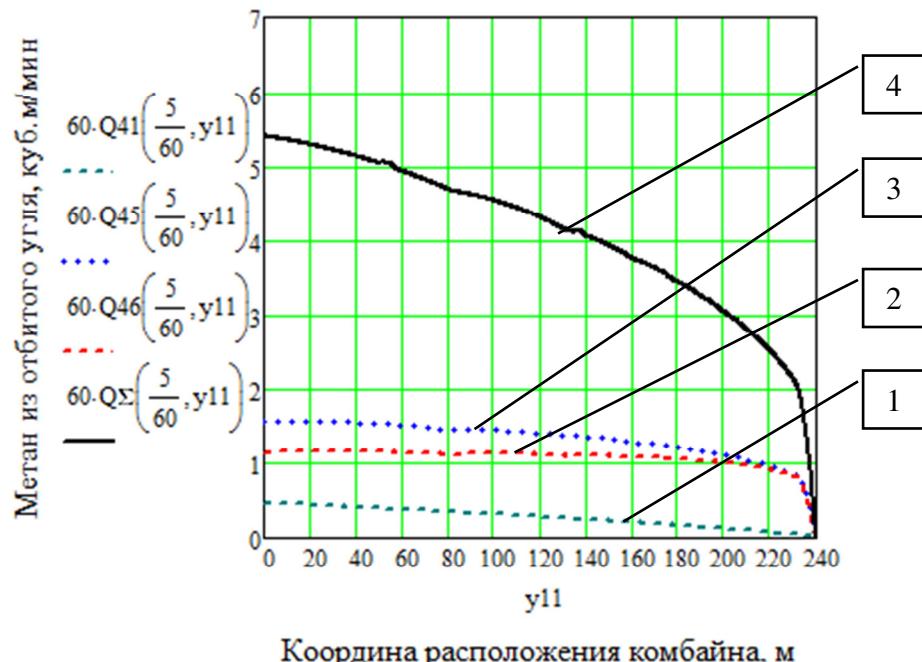
фракции диметром более 20 мм (содержание 90%) и более отдают метан в лаву весьма незначительно.

Притоки метана в лаву существенно зависят от скорости движения лавного конвейера. Притоки метана можно уменьшить, если увеличить скорость конвейера.

На рисунке 2.3.2 показана такая ситуация, когда при прочих равных условиях скорость ленты увеличили в два раза до величины 4,8 м/с. Получилось, что, при скорости ленты 2,4 м/с, максимальный приток метана из отбитого угля составлял 5,4 м³/мин, а при увеличении скорости в два раза максимальный приток метана уменьшился и составил 4,3 м³/мин (уменьшился на 20,3 %).

Таблица 2.3.2 - Гранулометрический состав угля на ленте

Средний диаметр фракций, мм	120	50	20	10	5	2	1
Содержание фракций, %	30	40	20	4	3	2	1



Размеры фракций: 1) 50 мм (40%); 2) 2 мм (2%); 3) 1 мм (1%) ; 4) все фракции. Скорость перемещения комбайна при отбойке – 5 м/мин.

Рисунок 2.3.1 – Притоки метана в лаву из различных фракций отбитого угля

2.4 Выводы

2.4.1 Притоки метана в лаву из очистного забоя и вмещающих пород происходят по законам фильтрации по каналам трещиноватости в результате перемещения газа в сторону свободной поверхности с учетом сорбции и десорбции метана на поверхности порового пространства. Процесс массопереноса метана в угле описывается дифференциальным уравнением массопереноса, отражающим линейный закон фильтрации Дарси, изотерму сорбции Ленгмюра закон сохранения массы и уравнение состояния газа.

2.4.2 Проницаемость угля в очистном забое определяется по данным газовой съемки концентрации метана в исходящей вентиляционной струе в ремонтную смену на основе решения обратной задачи путем сопоставления теоретической модели массопереноса с данными шахтных замеров. Предложена методика расчета проницаемости угля, которая базируется на решении одномерной задачи фильтрации метана из очистного забоя при известных данных о величине пластового давления метана, определяемого в шахтных условиях, и лабораторных измерениях параметров сорбции Ленгмюра

2.4.3 При работе очистного комбайна происходит интенсивное выделение метана из отбитого угля в процессе его транспортировки по лавному конвейеру. Дегазация измельченных фракций угля также описывается дифференциальным уравнением массопереноса по аналогии с процессами, происходящими в угольном пласте.

2.4.4 Выполнено компьютерное моделирование дегазации сферических фракций угля в течение времени транспортирования на лавном конвейере. Установлено, что наибольший приток метана в исходящую из лавы струю приходится на мелкие фракции.

2.4.5 На основе анализа закономерностей притоков метана из отбитого угля сформулирована рекомендация об исключении чрезмерного измельчения угля при работе комбайна, что позволяет уменьшить загазованность лавы.

2.4.6 Установлены расчетные зависимости, позволяющие учесть фактор скорости движения лавного конвейера на притоки метана в вентиляционную

струю. При больших нагрузках на очистной забой в условиях газоносных угольных пластов рекомендовано увеличение скорости движения конвейера, что позволяет сократить притоки метана в струю и обеспечить безопасный по газу режим работы очистного забоя.

2.4.7 Выполнен теоретический анализ влияния гранулометрического состава отбитого угля на притоки метана в исходящую из лавы струю. Получены уравнения для расчета притоков метана в исходящую струю в зависимости от фракционного состава отбитого угля, его сорбционных свойств, остаточного давления метана в отбитом угле, скорости движения лавного конвейера и производительности отбойки угля комбайном.

3 Определение параметров метанобильности очистного забоя по результатам газовой съемки

3.1 Методика газовой съемки лавы в ремонтную смену для определения метанобильности угольного пласта

Газообильность очистного забоя определяется метановыделением из обнаженной поверхности разрабатываемого угольного пласта, отбитого угля, транспортируемого по очистному забою и стенок горной выработки, по которой вентиляционная струя поступает в очистной забой [41,42,54].

Задача теоретического определения фактической газоносности сводится к суммированию метановыделений из различных источников, в том числе:

$$q_{\Sigma} = q_1 + q_2 + q_3 + q_4, \quad (3.1.1)$$

где q_1 -метановыделение из обнаженной поверхности разрабатываемого угольного пласта, $\text{м}^3/\text{мин}$;

q_2 - из отбитого угля, транспортируемого по очистному забою, $\text{м}^3/\text{мин}$;

q_3 - стенок горной выработки, по которой вентиляционная струя поступает в очистной забой, $\text{м}^3/\text{мин}$;

q_4 - притоки или оттоки воздушного потока в выработанное пространство из лавы, (в лаву), $\text{м}^3/\text{мин}$.

Существуют множество методик определения газоносности угольных пластов, основанных на прикладных научных исследованиях[43,101,103]. Однако рекомендации, описанные в нормативных документах, не всегда отвечают физическому смыслу, реальным условиям и практически игнорируют накопленный в фундаментальной и прикладной науке широкий опыт. В частности, в действующем нормативном документе - "Инструкции по применению схем проветривания..." (Приказ от 1 декабря 2011г. № 680) для расчета фактической газоносности разрабатываемых пластов в пределах

отработанного выемочного столба в нормативном документе - рекомендуют использовать формулу[101]

$$X_{\phi} = \frac{\frac{1440I_{\text{пл.ф}}}{A_{\phi}K_{\text{пл.ф}}K_{\text{т.у.ф}}} - X_{\text{o.ф}}}{\left[1 + \frac{1 - K_{\text{т.у.ф}}}{K_{\text{т.у.ф}}} e^{-n_l \left(\frac{1}{r_{\phi}} + V_{\text{oч.ф}} \right)} \right]} + X_{\text{o.ф}} \quad (3.1.2)$$

где X_{ϕ} – фактическая газоносность разрабатываемого пласта, $\text{м}^3/\text{т}$;

$I_{\text{пл.ф}}$ - среднее фактическое абсолютное метановыделение из разрабатываемого пласта ($\text{м}^3/\text{мин}$), которое определяется по данным телевинформации автоматической аппаратуры газовой защиты за весь период отработки выемочного столба по формуле средневзвешенного;

A_{ϕ} - средняя фактическая добыча угля в лаве-аналоге, $\text{т}/\text{сут.}$;

$K_{\text{пл.ф}}$ - коэффициент дренирования пласта лавы-аналога подготовительными выработками;

$K_{\text{т.у.ф}}$ - коэффициент, учитывающий степень дегазации отбитого угля в лаве-аналоге при его транспортировании по выработкам участка;

$X_{\text{o.ф}}$ - остаточная газоносность угля лавы-аналога, $\text{м}^3/\text{т}$;

r_{ϕ} - ширина захвата комбайна в лаве-аналоге, м;

$V_{\text{oч.ф}}$ - фактическая средняя скорость подвигания очистного забоя лавы-аналога, $\text{м}/\text{сут.}$

Несмотря на авторитетную ссылку, представленная нормативная формула, не способна отразить множество фактических производственных ситуаций, возникающих в шахтных условиях. Например, в формуле не учитываются газопроницаемость угля в очистном забое, величина пластового давления метана, параметры изотермы Ленгмюра, влияние опорного горного давления в призабойной зоне, режим работы очистного комбайна, мощность угольного пласта, гранулометрический состав отбитого угля и многие другие параметры, которые в значительной мере определяют газоносность пласта.

Следует также отметить еще одну некорректность формулы (3.1.2). Если

известны значения $I_{\text{пл.ф}}$, т.е. как указано - "данные телевизионной автоматической аппаратуры газовой защиты за весь период отработки выемочного столба", то фактическая газоносность определяется суммированием притоков метана в течение времени и затем делением на объем добычи угля в течение этого же времени. То есть в данном случае фактическая газоносность разрабатываемых пластов X_{ϕ} вычисляется простым математическим интегрированием и усреднением действием, без использования формулы (3.1.2)

$$X_{\phi} = \frac{\int_0^{\Delta t} I_{\text{пл.ф}}(t) dt}{\int_0^{\Delta t} A_{\phi}(t) dt} + X_{0.\phi}, \quad \text{м}^3/\text{т} \quad (3.1.3)$$

На наш взгляд, в рассмотренном случае было бы более информативно на основе шахтных данных построить факторную корреляционную зависимость газоносности X_{ϕ} от фактической добычи угля A_{ϕ} на действующей лаве или лаве-аналоге, а также с учетом других параметров влияющих на эффективность отработки пласта. Такой подход позволит повысить достоверность прогнозов текущей и ожидаемой газоносности разрабатываемого пласта. Однако при этом все равно остается открытым вопрос более полного учета всех физико-технических факторов, включая физические свойства пласта и вмещающих пород, а также технологические параметры системы разработки.

В диссертационной работе для расчета притоков метана в лаву из угольного пласта предлагается использовать более обоснованный подход. В частности, необходимо регулярно выполнять газовую съемку в течение ремонтной смены и фиксировать притоки метана, например, в середине ремонтной смены. Эта информация позволит вычислить газопроницаемость угольного пласта на данном горно-геологическом участке и принять оперативные решения по отработке пласта в последующие рабочие смены или долгосрочном планировании на перспективных лавах.

Далее, чтобы получить достоверный прогноз газоносности и притоков метана необходимо также иметь информацию о величине пластового давления метана и константах Ленгмюра. Одна из методик определения пластового давления описана в работе [109] и предусматривает метод измерений путем закрытия пластовых дегазационных скважин на время до 7 суток.. В этих же измерениях по кривой темпа нарастания давления в закрытой скважине, используя метод решения обратной задачи, можно вычислить значения констант Ленгмюра, что будет обосновано при отсутствии других возможностей.

Однако следует иметь в виду, что более достоверные значения констант Ленгмюра следует все же определять в лабораторных условиях на специальном оборудовании [120]. Если же иметь достоверные значения констант Ленгмюра и величину газоносности пласта, то в этом случае можно расчетным путем выйти на величину ожидаемого пластового давления [53]. Этот вариант пригоден в случаях, когда нет возможности бурения дегазационных скважин в шахтных условиях для определения фактических значений пластового давления'

По методике [51,109] с учетом кривой нарастания давления в дегазационной скважине определяют не только пластовое давление, а также газопроницаемость неразгруженного от горного давления угольного пласта. Как свидетельствует описанный опыт экспериментальная и теоретическая кривые совпадают при проницаемостях угля порядка микродарси. Однако следует иметь в виду, что проницаемость неразгруженного угля и проницаемость этого же угля в очистном забое различаются на несколько порядков. Поэтому при экспериментальном определении проницаемости угля в очистном забое следует использовать иной, разработанный нами подход, который базируется на анализе данных газовой съемки в лаве.

Целесообразно организовать работу очистного забоя так, что бы информацию о проницаемости угольного пласта получать в ремонтную смену, выполнив не сложные замеры концентрации метана и скорости

вентиляционного потока в лаве. В таблице 3.1.1. в качестве примера представлена требуемая информация, полученная при выполнении замеров на шахте им. С.М. Кирова ОАО "СУЭК-Кузбасс".

Таблица 3.1.1 -Газовая съёмка в лаве

Дата: 28.07.2013; 1 смена ш. им. С.М. Кирова. Лава 24-61			
№ секции	Расстояние, м	Скорость струи, м/с	Концентрация метана, %
10	15.9	4.06	0.06
20	31.8	4.43	0.12
30	47.6	4.28	0.15
40	63.5	4.34	0.2
50	79.4	4.42	0.23
60	95.3	4.38	0.26
70	111.2	4.36	0.28
80	127.1	4.08	0.35
90	142.9	4.03	0.43
100	158.8	4.07	0.46
110	174.7	4.28	0.48
120	190.6	4.44	0.5
130	206.5	4.13	0.53
140	222.4	3.78	0.55
150	238.2	3.76	0.59
160	254.1	4.02	0.65
170	270	3.98	0.69

Расход на входе в лаву: 1647 м³/мин; на выходе 1152 м³/мин

На рисунках 3.1.1и 3.1.2 представлены концентрации метана и скорость потока вдоль лавы. Для представленных измерений характерен отток вентиляционного потока в выработанное пространство величиной

$$\frac{1647 - 1152}{1647} \cdot 100\% = 30,0\%$$

Концентрация метана в вентиляционном потоке непрерывно возрастает и достигает максимума величиной 0,7%, что достигается на выходе потока из лавы в конвейерный штрек.

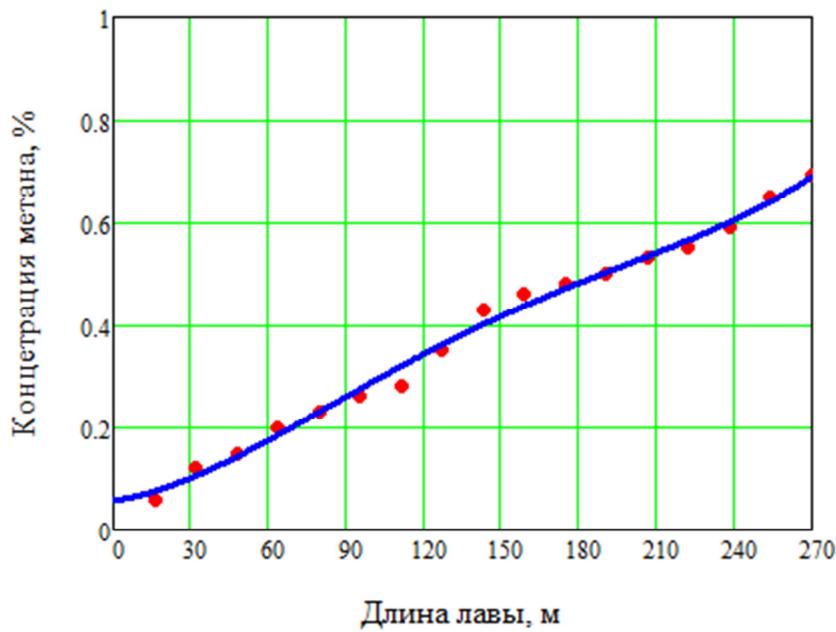


Рисунок 3.1.1 – Концентрация метана в вентиляционной струе

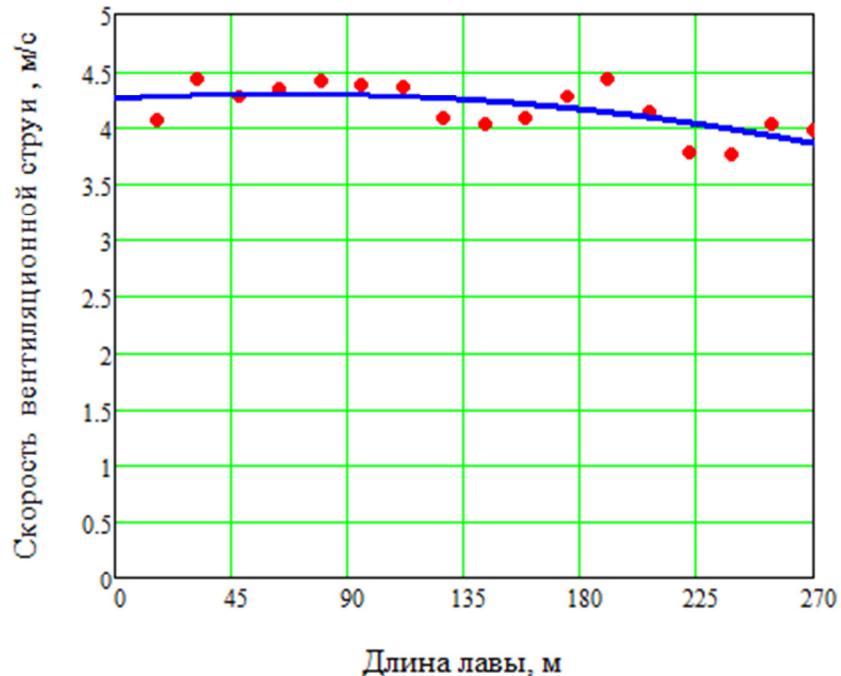


Рисунок 3.1.2 – Скорость вентиляционной струи вдоль лавы

По данным таблицы 3.1.1 строят зависимость объемного потока метана в вентиляционной струе по длине лавы (рисунок 3.1.3).

В работе [118] представлена методика определения суммарных массовых притоков метана в лаву. В частном случае массовый приток метана из угольного забоя и вмещающих пород составляет 7,1 кг/мин. Полученной

информации достаточно, чтобы на основе решения обратной задачи определить проницаемость угля в очистном забое, что представляет интерес для прогноза ожидаемых притоков метана в очередные рабочие смены. Например, в рассмотренном случае проницаемость составила 0,75 мД.

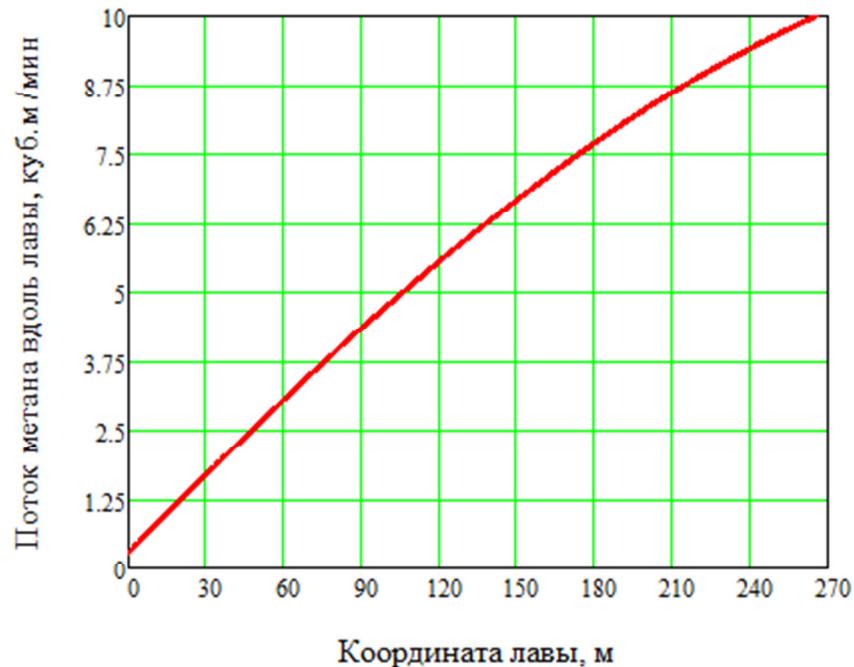


Рисунок 3.1.3 – Поток метана в вентиляционной струе

3.2 Методика расчета проницаемости угля очистном забое лавы перед очередными рабочими сменами

Как показано выше, по результатам шахтной газовой съемки в лаве в ремонтную смену можно вычислить притоки метана в выработанное пространство из очистного забоя угольного пласта и вмещающих пород. Для вычисления проницаемости угля в очистном забое следует установить долю метана, выходящего из угля и вмещающих пород. Предположим, что на долю очистного забоя приходится 95% метана, остальное - на вмещающие породы. Основанием для такого предположения является то, что согласно справочным данным проницаемость вмещающих пород, сложенных из аргиллита, при прочих равных условиях, на порядок меньше проницаемости угля. При этом отметим, что данный вопрос требует дополнительных экспериментальных

исследований, например, с помощью специальных широких датчиков измерения расхода, прикладываемых большой площадью к поверхности очистного забоя или породам кровли и почвы.

В методике расчёта нагрузки на очистной забой, описанной в работах [107,108,115,117,118], дано обоснование правомерности применения в расчетной модели дифференциального уравнения (2.1.1) массопереноса метана, описанного в разделе 2.1, которое в одномерной постановке задачи имеет вид

$$p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 = \frac{\mu \cdot \Pi}{k} \left[1 + A \frac{ab}{(1+ap)^2} \right] \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3.2.1)$$

Таким образом, фильтрация газа из пласта в сторону свободной поверхности происходит вследствие разности давлений при заданном начальном распределении давления газа в угольном пласте. В методике описан случай, характеризующий максимальную метанообильность пласта при условии, когда давление в пласте в начальный момент времени распределено равномерно и равно максимальному пластовому давлению

$$P(x,0) = P_{n_l}. \quad (3.2.2)$$

На границе со свободной поверхностью давление газа равно атмосферному, а на бесконечном удалении давление постоянное:

$$P(0,t) = P_0 ; \quad (3.2.3)$$

$$\frac{\partial P(\infty,t)}{\partial x} = 0. \quad (3.2.4)$$

Правомерность использования начального условия (3.2.3) обусловлена тем, что длительность дегазации очистного забоя в атмосферу перед каждым

очередным циклом заходки комбайна не превышает 60 мин. В течение этого времени дегазация забоя происходит на глубину не более 0,1 м, что существенно меньше ширины 0,8 м заходки комбайна. По этой причине расчетный приток метана из обнаженной поверхности забоя при использовании условия (3.2.3) практически не отличается от притока метана в задаче с начальным условием, учитывающим неравномерность распределения давления по глубине.

Удельный приток метана из глубины забоя рассчитывается по формуле (2.1.8). На рисунке 3.2.1 представлена расчетная схема очистного забоя, описанная в работах [57, 118], описывающая поступление метана из всех источников, в том числе из очистного забоя Q_1 .

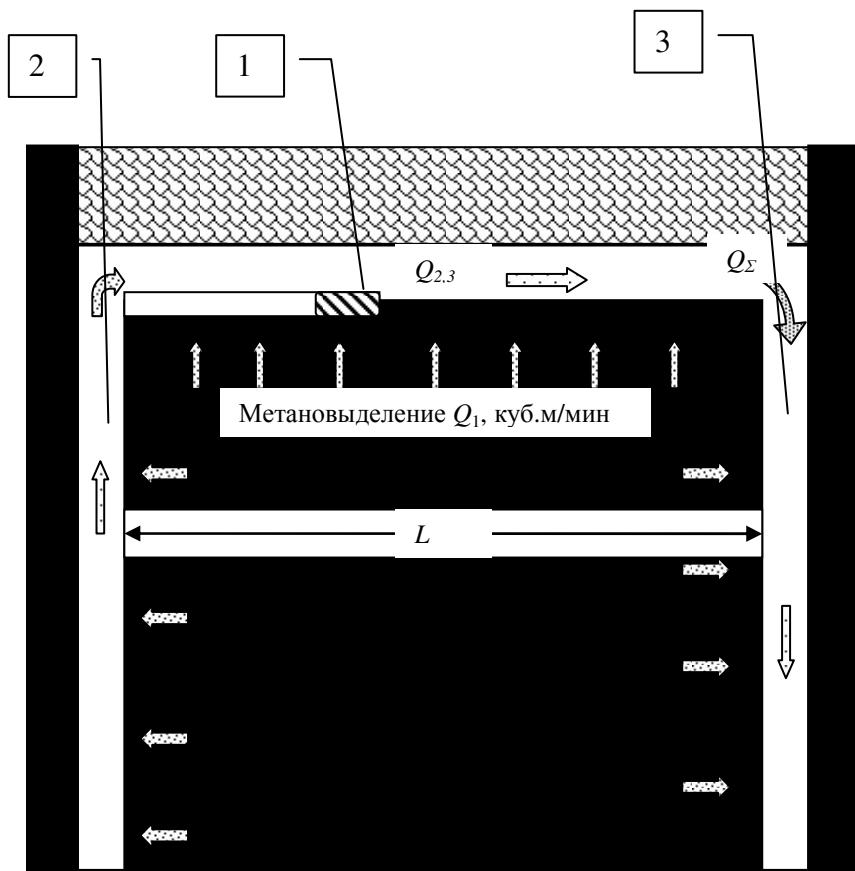
В модели принято допущение о плоскопараллельном потоке метана из очистного забоя. При скорости движения комбайна v и его расположении на концевом участке лавы длиной L , суммарный приток метана в выработку с обнаженной поверхности лавы мощностью m определяется интегрированием

$$Q_1(v) = \int_0^L 60 \cdot m \cdot q_1(0, \frac{L-x}{v}) dx, \text{ м}^3/\text{мин} . \quad (3.2.5)$$

По условию поставленной задачи нам известен приток метана из очистного забоя в середине рабочей смены в момент времени T_1 , отсчитываемый после остановки комбайна в конце третьей смены. Поэтому вместо расчетной формулы (3.2.5) следует использовать, как в частном случае, следующую формулу

$$Q_1(v) = m \cdot L \cdot q(0, T_1) \quad (3.2.6)$$

где $q(0, T_1)$ - удельный поток метана из очистного забоя в момент времени T_1 , рассчитываемый по формуле (3.2.6).



1 - очистной комбайн; 2 – вентиляционный штрек; 3 – откаточный штрек

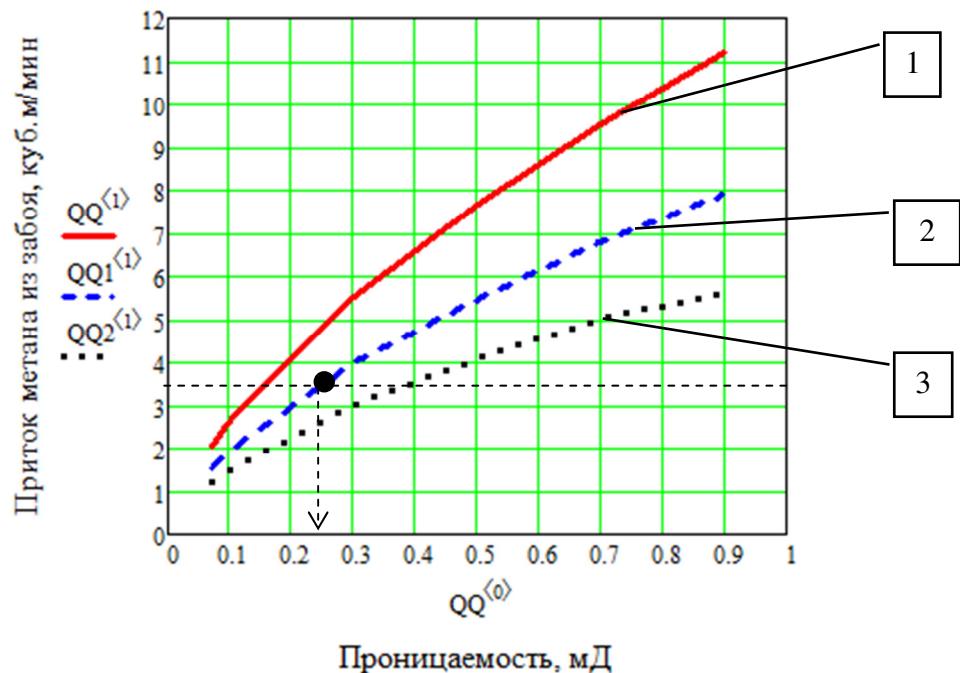
Рисунок 3.2.1 – Притоки метана в лаву

На базе дифференциального уравнения (3.2.1) методом конечных элементов выполним расчеты притоков метана. Исходные данные задачи представлены в таблице 3.2.1.

Таблица – 3.2.1 -Исходные данные

№ п/п	Параметр	Значение
1	Динамическая вязкость метана, Па·с	$0,018 \cdot 10^{-3}$
2	Температура газа	300 К
3	Постоянная сорбции Ленгмюра	$0,207 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}$
4	Максимальное газосодержащие по изотерме Ленгмюра, м ³ /т	49,3 м ³ /т
5	Пористость угля	0,02
6	Объемная масса угля	1280 кг/м ³
7	Длина зоны притоков метана	220 м
8	Мощность пласта	2,23 м

На рисунке 3.2.2 показана зависимость притока метана из очистного забоя через 3 часа после начала ремонтной смены от проницаемости угля при различных значениях газоносности и пластового давления метана. Приток метана возрастает с увеличением проницаемости и газоносности углей. Построение зависимости 3.2.2 компьютеризировано и при известных исходных данных не требует большого времени.



1) $q_r=12 \text{ м}^3/\text{т}$ ($P_{\text{пл}}=1,654 \text{ МПа}$); 2) $q_r=9 \text{ м}^3/\text{т}$ ($P_{\text{пл}}=1,179 \text{ МПа}$); 3) $q_r=7 \text{ м}^3/\text{т}$ ($P_{\text{пл}}=0,899 \text{ МПа}$)

Длина зоны притоков метана в лаве $L=220 \text{ м}$; мощность пласта $m=2,23 \text{ м}$

Рисунок 3.2.2 – Приток метана в лаву в зависимости от проницаемости угля

В качестве демонстрационного примера вычислим проницаемость угля, если по результатам газовой съемки в середине времени ремонтной смены приток метана составляет $3,5 \text{ м}^3/\text{мин}$. Пластовое давление определено ранее методом перекрытия устья дегазационной скважины и составляет $1,18 \text{ МПа}$. Константы изотермы Ленгмюра определены в лабораторных условиях и соответствуют газоносности угля $9,0 \text{ м}^3/\text{т}$. Судя по графику 3.2.2 искомая проницаемость на пересечении двух линий (точка на графике) составляет $0,25 \text{ мД}$.

Таким образом, продемонстрирован метод решения обратной задачи при определении проницаемости угля в очистном забое по результатам газовой съемки в ремонтную смену.

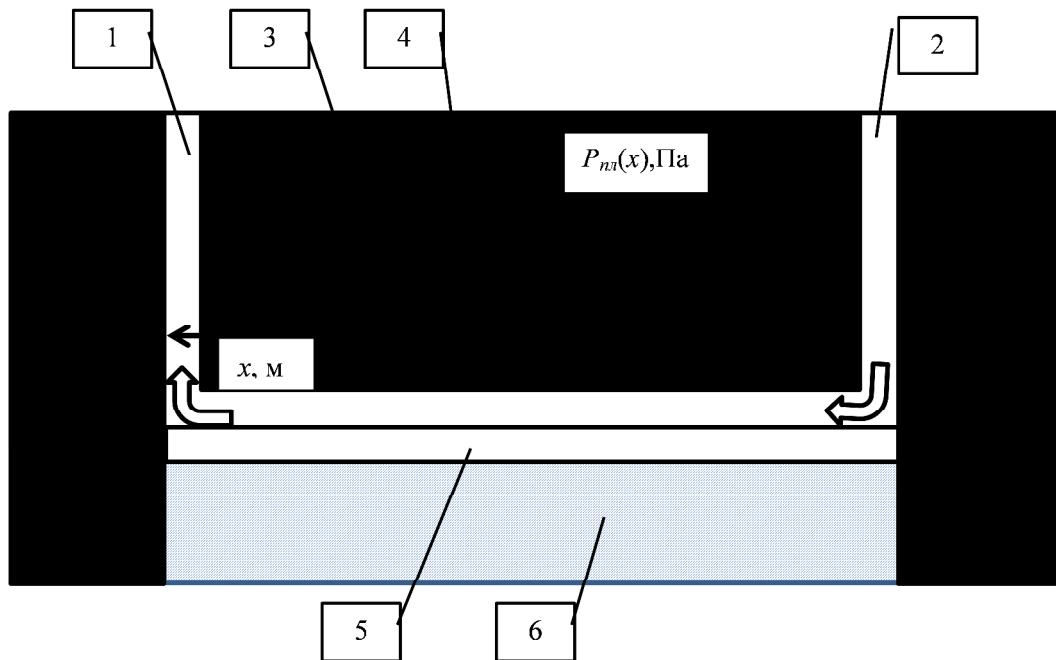
3.3 Методика определения распределения пластового давления метана вдоль очистного забоя

При расчете притоков метана в лаву из очистного забоя следует учитывать, что пластовое давление метана имеет наибольшее значение в центральной части забоя – в пространстве между вентиляционным и конвейерным штреками.

При подготовке выемочного столба к работе после проходки оконтуривающих штреков и выработок проходит более года, до начала добычи угля. В течение этого времени происходит частичная дегазация пласта за счет горизонтального массопереноса метана из пласта в штреки. Как свидетельствует шахтный опыт угля, прилегающий в выработке на расстоянии до 15 м имеет повышенную проницаемость и значительно дегазирован.

На расстоянии более 20 м угольный пласт относится к категории неразгруженного от горного давления и поэтому имеет низкую проницаемость и сохраняет в своем объеме природный метан.

Выполним компьютерное моделирование процесса дегазации пласта средствами Comsol Multiphysics. На рисунке 3.3.1 представлена геометрическая модель угольного пласта 3, расположенного между двумя выработками 1 и 2. Между лавой и выработанным пространством 6 расположена крепь 5. Длина лавы 240 м. Протяженность выемочного столба – несколько километров, что многоократно превосходит длину лавы. Поэтому справедливо моделирование в плоской постановке задачи.



1 и 2 – конвейерный и вентиляционный штреки; 3 –угольный пласт;
 4 – кривая пластового давления; 5 – крепь; 6 – выработанное пространство
 Рисунок 3.3.1 – Геометрическая модель в плане

В качестве примера выполним моделирование при исходных данных, представленных в таблице 3.3.1.

Таблица 3.3.1 – Исходные данные

№ п/п	Параметр	Значение параметра
1	Пластовое давление	$P_0 = 15 \cdot 10^5$ Па
2	Давление газа на свободной поверхности	$P_{at} = 10^5$ Па
3	Пористость угля	0,025
4	Пористость почвы	0,02
5	Пористость кровли	0,02
6	Проницаемость угля	$0,04 \cdot 10^{-15}$ м ²
7	Проницаемость почвы	$0,004 \cdot 10^{-15}$ м ²
8	Проницаемость кровли	$0,004 \cdot 10^{-15}$ м ²
9	Динамическая вязкость метана, Па·с	$1,08 \cdot 10^{-6}$ Па·с
10	Коэффициент изотермы сорбции Ленгмюра, 1/Па	$a = 0,11 \cdot 10^{-6}$ Па ⁻¹
11	Предельная метаноёмкость угля по изотерме Ленгмюра	$b = 50$ кг/м ³
12	Температура газа	300 К

В модели использованы дифференциальные уравнения массопереноса в угле и вмещающих породах, достаточно подробно описанные в предыдущих

разделах. Принято начальное условие в виде распределения пластового давления, нарастающего с глубиной по линейному закону

$$P = 0,95 \cdot P_0 + 0,001 \cdot P_0 \cdot (50 - y) \quad (3.3.1)$$

На границах модели выполняется условие первого рода – задано давление метана изменяющееся по закону (3.3.1).

При $y = 0$ м, что соответствует вертикальной координате залегания угольного пласта, давление равно $P_0 = 15 \cdot 10^5$ Па. При $y = 50$ м давление метана в породах кровли составляет $0,95 \cdot P_0$. Таким образом, градиент давления в вертикальном направлении составляет

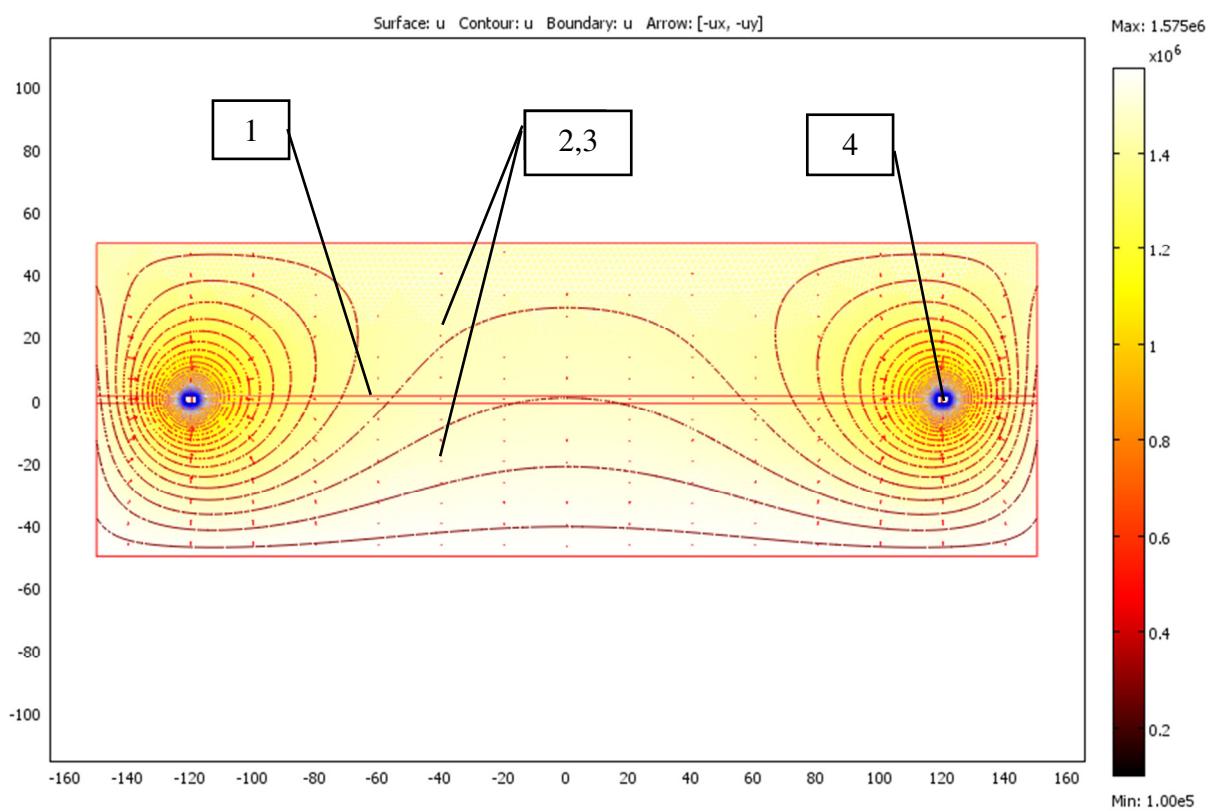
$$\left| \frac{0,95 \cdot 15 \cdot 10^5 - 15 \cdot 10^5}{50} \right| = 1500 \text{ Па/м}$$

Таким образом, на каждые 100 м погружения давление метана возрастает на 1,5 бар. В модели принято, что проницаемость вмещающих пород на порядок меньше проницаемости угля.

На рисунке 3.3.2 представлен результат компьютерного моделирования в виде изолиний распределения давления метана в установившемся режиме, который фактически наступает через время 6 месяцев. При больших временах распределение давление метана изменяется незначительно и фактором времени можно пренебречь.

На рисунке 3.3.3 представлено установившееся распределение давления метана в угольном пласте между выработками.

Видно, что вблизи штреков на расстоянии до 30 м давление метана составляет до 1,35 МПа, что меньше начального пластового давления 1,5 МПа на 10%. Этот фактор следует учитывать при расчете нагрузок на очистной забой в разделе, посвященном притокам метана из очистного забоя.



1 – угольный пласт; 2,3 – вмещающие породы; 4 - штрек
 Рисунок 3.3.2 – Изолинии распределения давления метана

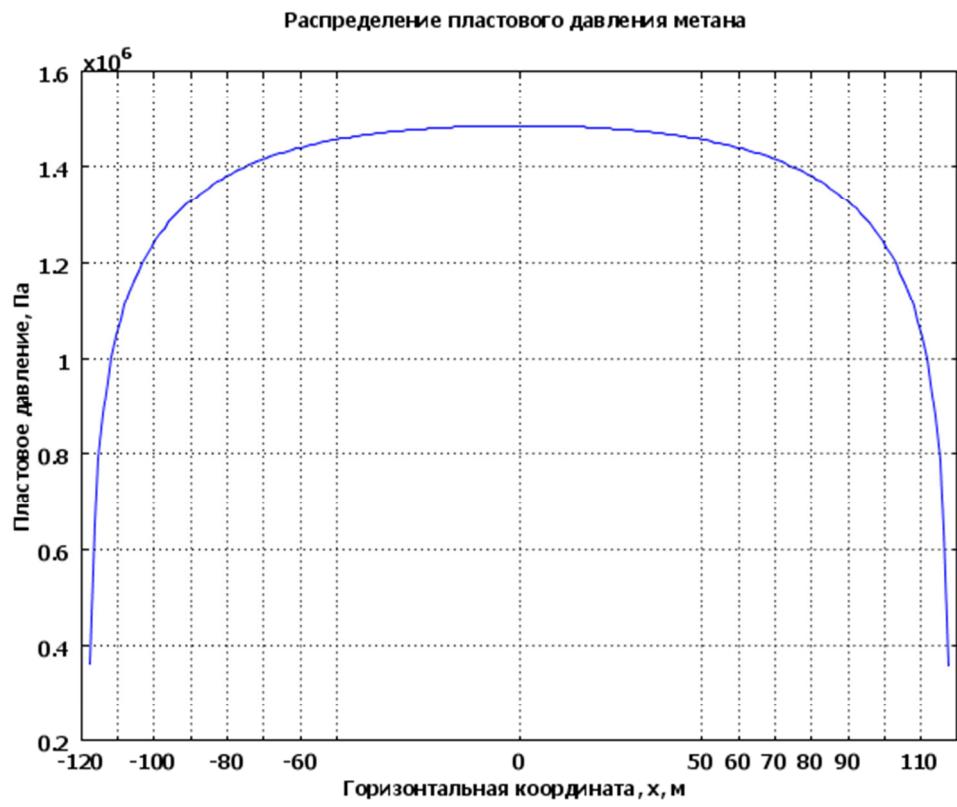


Рисунок 3.3.3 – Распределение давления в установившемся режиме

Таким образом, как следует из рисунка 3.3.3, центральная часть пласта между выработками практически не дегазируется и сохраняет исходное пластовое давление в течение всего времени отработки выемочного столба. Установившийся удельный приток метана из угольного пласта в штрек с двух сторон согласно расчетам по представленной модели составляет $0,002 \text{ м}^3/(\text{м}\cdot\text{мин})$. Следовательно, при длине штрека 1 км, абсолютный приток метана в штрек равен $2 \text{ м}^3/\text{мин}$. Аналогичные расчеты притоков метана из кровли приводят с следующему результату: удельный приток метана – $0,00028 \text{ м}^3/(\text{м}\cdot\text{мин})$, абсолютный приток на 1 км штрека – $0,28 \text{ м}^3/\text{мин}$. Таким образом, суммарный приток метана в штрек длиной 1 км составляет $2,28 \text{ м}^3/\text{мин}$. Для оценки достоверности прогноза рассмотрим случай, когда по штреку перемещается вентиляционная струя чистого воздуха расходом $2000 \text{ м}^3/\text{мин}$. В этом случае на концевом участке штрека длиной 2 км концентрация метана возрастет на величину

$$\frac{2,28 \cdot 2}{2000} \cdot 100 = 0,228 \%$$

Расчет носит оценочный характер и свидетельствует о соответствии по порядку величин расчетных и фактических значений. Отметим, что по данному расчету и шахтным измерениям текущей концентрации метана в вентиляционном потоке вдоль длины штрека можно, в первом приближении, вычислять проницаемость пласта. Однако в расчете остается открытым вопрос соотношения проницаемостей угля и вмещающих пород. Предположительно, проницаемость угля на порядок больше проницаемости пласта, что соответствует данным справочной литературы. В шахтных условиях этот вывод требует более детального подтверждения, поскольку величина проницаемости существенно зависит от компонент неравномерного горного давления.

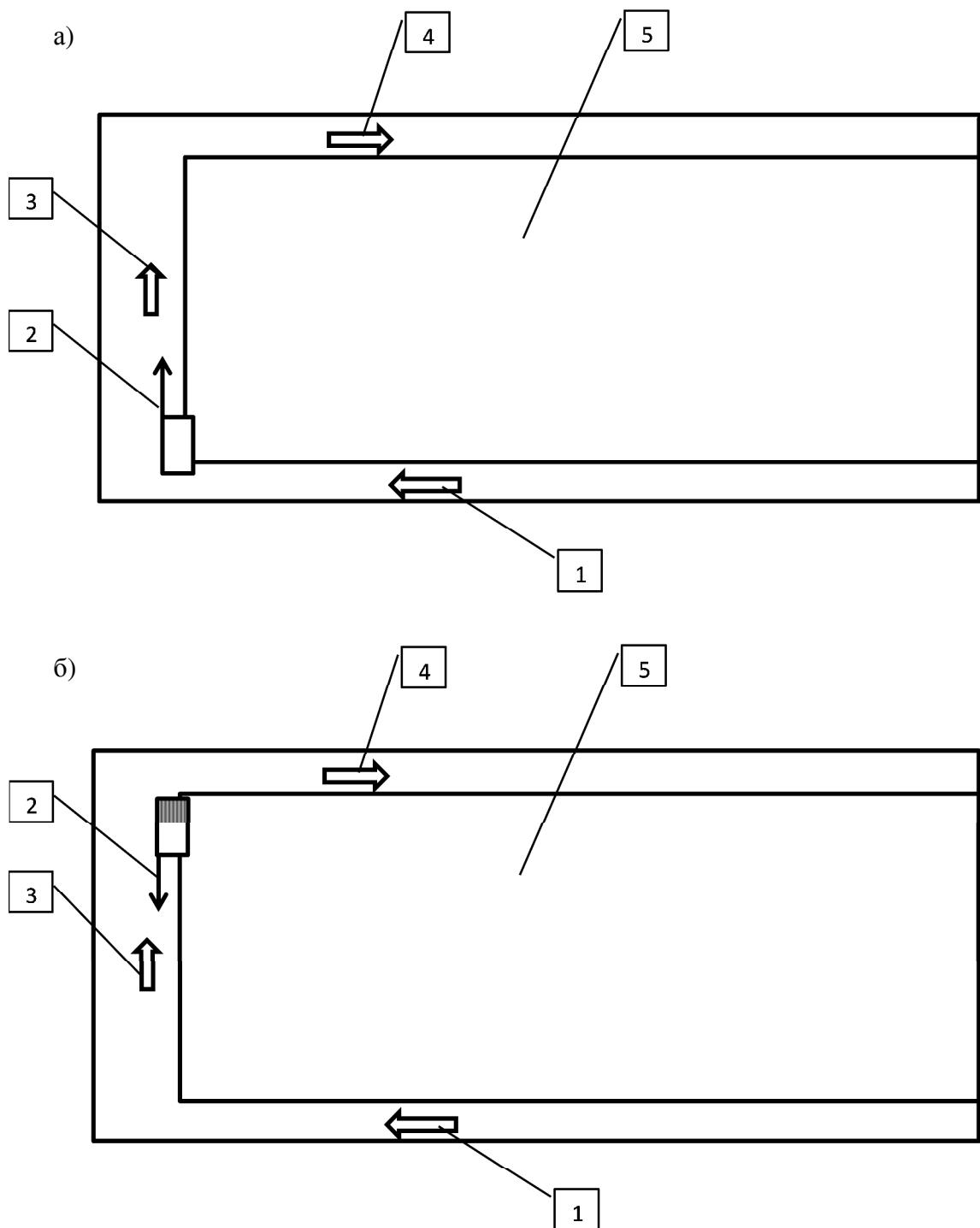
3.4 Шахтные исследования концентрации метана в исходящей из лавы струе в процессе работы очистного комбайна

В процессе отбойки угля очистным комбайном концентрация метана в исходящей струе зависит от притоков метана из угольного пласта и вмещающих пород, гранулометрического состава разрушающегося угля и скорости движения лавного конвейера. В ранних методиках расчета нагрузки на очистной забой по газовому фактору [52,107,115] предполагалось, что наиболее опасная ситуация по газу возникает при расположении комбайна в конце каждого очередного цикла производительной заходки и именно при этом расположении выполнялся расчет по газовому фактору, ограничивающий производительность. В процессе производительной отбойки угля по требованиям безопасности осуществляют непрерывный контроль за концентраций метана в вентиляционной струе на выходе из лавы. В случае, когда концентрация метана достигает максимально допустимого значения величиной 1,0% срабатывает система предупреждения, требующая остановки комбайна. В то же время, если концентрация метана меньше 1,0%, то в этом случае возможно увеличение скорости движения комбайна, что обеспечивает более высокую производительность при соблюдении норм безопасности по газовому фактору. Этот технологический прием является весомым резервом экономической эффективности.

Для теоретического обоснования предельно допустимой нагрузки на очистной забой необходимо изучить влияние фактора расположения комбайна в лаве на величину притоков метана в исходящую струю. На рисунке 3.4.1 представлены два варианта производительной заходки комбайна;

- а) по направлению вентиляционного потока;
- б) против движения вентиляционного потока.

Лава угольного пласта 5 проветривается вентиляционной струей 3, поступающей в потоке 1 из вентиляционного штрека. Исходящая из лавы струя перемещается в потоке 4 по конвейерному штреку.



1 – струя в вентиляционном штреке; 2 – направление заходки комбайна; 3 – струя в лаве; 4 – струя в конвейерном штреке; 5 – угольный пласт

Рисунок 3.4.1 – Варианты производительной заходки комбайна

При расположении комбайна в начале производительной заходки, по направлению вентиляционной струи (рисунок 3.4.1а), наибольший приток метана поступает из отбитого угля перемещаемого лавным конвейером,

поскольку время нахождения отбитого угля в лаве максимально. В этом случае при достижении комбайном конечного участка заходки приток метана в лаву из отбитого угля наименьший, поскольку из лавного конвейера уголь сразу же поступает в конвейерный штрек. Что касается притока метана из угольного пласта, то здесь картина противоположная - наименьший приток метана имеет место в начале производительной заходки, а наибольший к конце заходки, когда площадь свежеобнаженной поверхности угольного забоя максимальна. Очевидно, что функция суммарного притока метана из отбитого угля и очистного забоя имеет экстремум при каком-то расположении комбайна непосредственно в лаве.

В другом случае, представленном на рисунке 3.4.1б, когда отбойка угля комбайном ведется навстречу вентиляционного потока – наибольший суммарный приток метана реализуется в конце производительной заходки, когда время нахождения угля в лаве на конвейере и площадь свежеобнаженной поверхности забоя максимальны.

Поэтому с точки зрения безопасности по газу представляется целесообразным первый вариант отбойки, когда направление вентиляционной струи совпадает с направлением отбойки угля.

Для выявления существенности влияния фактора расположения комбайна в лаве на шахтах ОАО "СУЭК-Кузбасс" проведены измерения и собрана информация, отвечающая на поставленный вопрос относительно такого расположения комбайна в лаве, при котором концентрация метана в исходящей струе максимальна?

Продемонстрируем методический прием сбора и обработки информации на примере таблицы 3.4.1.

Таблица 3.4.1 – Таблица замера концентрации метана в исходящей струе

Дата: 13.08.2011		Шахта им С.М. Кирова, лава 93, пласт "Поленовский", длина лавы 250 м	
Скорость потока на входе в лаву – 3,8 м/с, скорость потока на выходе из лавы – 3,6 м/с; концентрация метана на входе в лаву – 0,01%.			
№ п/п	Время (абсолютное)	Концентрация метана в исходящей струе, %	Примечания
1	11 час. 00 мин	0.1	1. Производительная заходка комбайна (по направлению вентиляционного потока). 2. Скорость движения комбайна $V_k = \frac{250}{50} = 5 \text{ м/мин}$
2	11-05	0.37	
3	11-10	0.53	
4	11-15	0.72	
5	11-20	0.8	
6	11-25	0.85	
7	11-30	0.87	
8	11-35	0.9	
9	11-40	0.92	
10	11-45	0.85	
11	11-50	0.79	
-	-	-	Остановка комбайна и подготовка к обратному движению в течение 10мин.
1	12 час 00 мин	0.25	Зачистка забоя на обратном ходе (против вентиляционного потока) Скорость движения комбайна $V_k = \frac{250}{25} = 10 \text{ м/мин}$
2	12-05	0.28	
3	12-10	0.30	
4	12-15	0.28	
5	12-20	0.32	
6	12-25	0.34	

На рисунке 3.4.2 показана корреляционная зависимость концентрации метана в исходящей струе в зависимости от координаты расположения комбайна в процессе производительной заходки. Координата $x=0$ соответствует началу заходки комбайна в лаве, а завершение заходки соответствует координате $x = 250$. Максимальная концентрация метана 0,92% в исходящей струе имеет место при расположении комбайна в координате $x=180$ м. На выходе комбайна из лавы концентрация метана меньше и составляет 0,7%. На рисунке 3.4.3 показана корреляционная зависимость концентрации метана в исходящей струе в процессе зачистки.

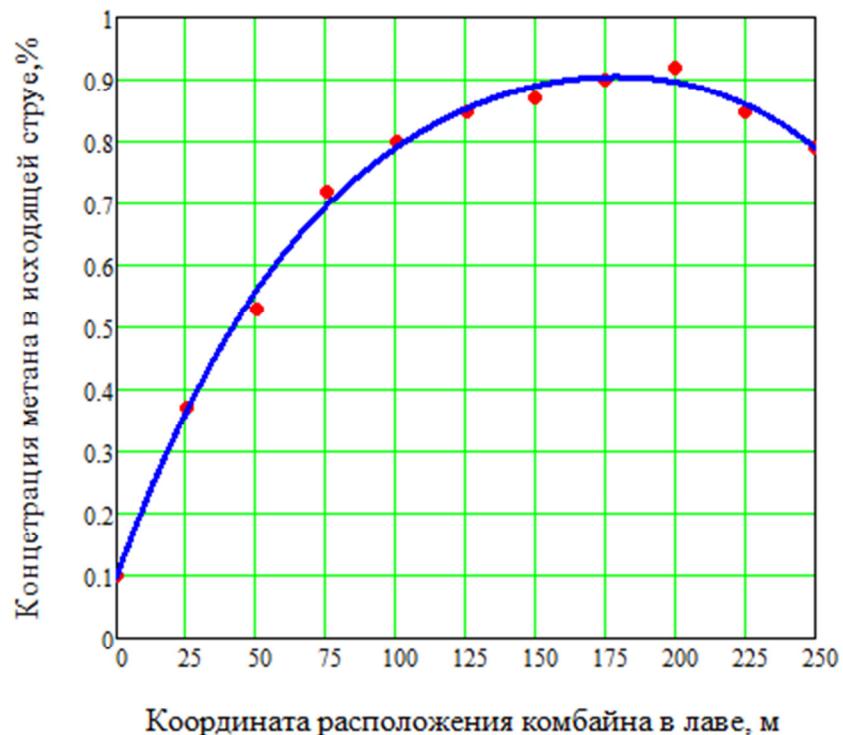


Рисунок 3.4.2 – Концентрация метана в исходящей струе в зависимости от расположения комбайна в лаве на стадии заходки

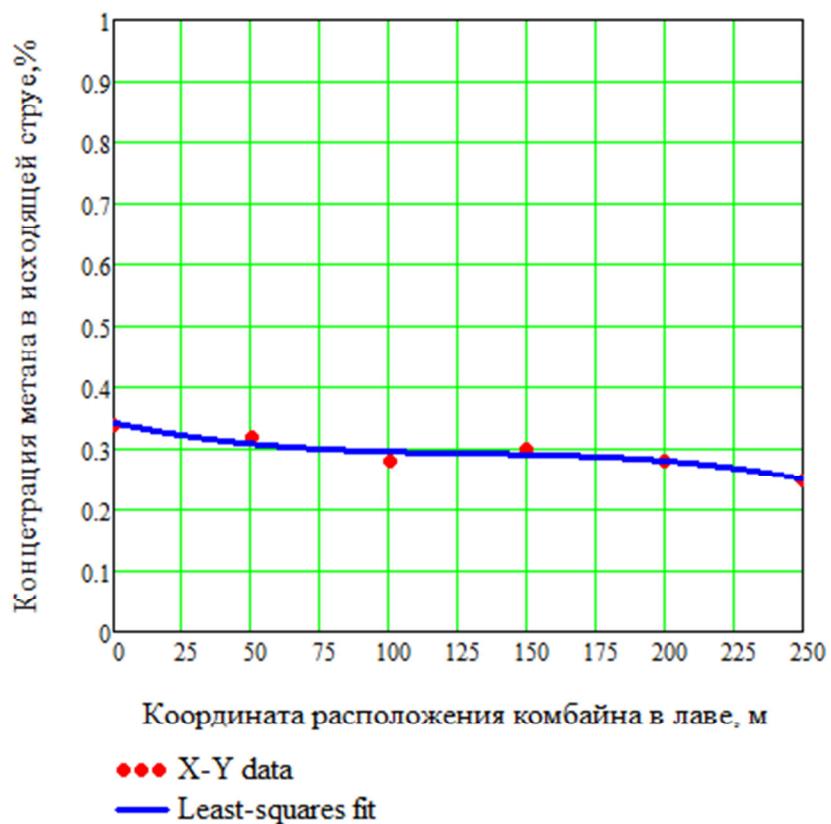


Рисунок 3.4.3 – Концентрация метана в исходящей струе в зависимости от расположения комбайна в лаве на стадии зачистки

Аналогичную информацию можно получить на основе сопоставления данных о работе комбайна и трендов записывающего оборудования, которое фиксирует изменение концентрации метана в исходящей струе в течение рабочей смены. На рисунке 3.4.4 представлена такая информация. Пунктирной линией выделены участки, где отмечено начало и конец производительной заходки комбайна в условиях шахты им. С.М. Кирова (дата 24.07.2013г). В данном случае направление вентиляционного потока совпадает с направлением производительной отбойки комбайна. Визуальный анализ информации приводит к следующим результатам:

Тренд 24.07.2013г. – максимум концентрации при расположении комбайна на расстоянии более 200 м от начала заходки, что соответствует расположению в относительных единицах относительно длины очистного забоя

$$\frac{194 \dots 260}{275} = 0,70 \dots 0,95$$

Результаты анализа других трендов представлены в таблице 3.4.2.

Таблица 3.4.2 – Участки расположения комбайна с максимумами концентраций (шахта им.Кирова, лава 25-94)

Дата	Участок расположения комбайна, на которых концентрация в исходящей струе максимальная	Расположение участка в долях единицы относительно длины забоя	Направление вентиляционного потока и производительной отбойки
24.07.2013г	194-260	0,70...0,95	совпадают
27.07.2013г.	200-250 м.	0,72...0,93	совпадают
27.07.2013г	180-240 м.	0,65...0,87	совпадают
28.07.2013г.	180-220 м.	0,65...0,8	совпадают
28.07.2013г	150-200 м	0,54...0,73	совпадают

На рисунке 3.4.5 представлены тренды для членковой схемы отбойки угля – на прямом и обратном ходе. Показателен тренд 25.07.2013, при котором в лаве 24-61 выполнено пять производительных заходок в сутки без остановок комбайна. Результаты обработки трендов - в таблице 3.4.3.

Таблица 3.4.3 - Участки расположения комбайна с максимумами концентраций при челноковой схеме работы комбайна (шахта им. Кирова, лава 24-61)

Дата	Расположение комбайна, на участке где концентрация в исходящей струе максимальна	Расположение долях единицы относительно длины забоя	Направление вентиляционного потока и производительной отбойки
24.07.2013 время 20.10-21.05	200...250 м	0,67...0,83	совпадают
24.07.2013, время 21.05-22.10	120...170 м	0,40...0,57	противоположно
25.07.2013, время 18.50-19.50	150...200	0,50...0,67	совпадают
25.07.2013, время 20.00...21.00	150-200 м	0,5...0,67	противоположно
25.07.2013, время 21.00...22.15	80 -160 м	0,27...0,54 (аномалия)	совпадают
25.07.2013, время 22-15...23.15	150-300 м	0,5...1,0	противоположно
25.07.2013, время 23-15...00.30	240- 270 м	0,80...0,90	совпадают
25.07.2013, время 0-30...01.30	200- 250 м	0,67...0,83	противоположно

Таким образом, усредненный по восьми трендам участок максимума концентраций, при совпадении направлений вентпотока и направления заходки комбайна, имеет место при расположении комбайна в интервале 0,65...0,84 от длины очистного забоя.

В случае, когда направление вентиляционного потока и направление заходки комбайна противоположны максимум концентрации реализуется на участке его расположения 0,52...0,77. Однако этот результат не является показательным, поскольку как видно из трендов при такой заходке имели место остановки комбайна из-за высокой концентрации метана в исходящей струе. Более правомерно утверждать, что при работе комбайна навстречу вентиляционной струе максимальная концентрация метана в исходящей струе имеет место на конечном участке производительной заходки вследствие

суммирования притоков метана из всего свежеобнаженного угольного забоя и по всей длине отбитого угля на лавном конвейере. Такая ситуация отражена на рисунке 3.4.5, тренд в течение времени 22-15...23-15.

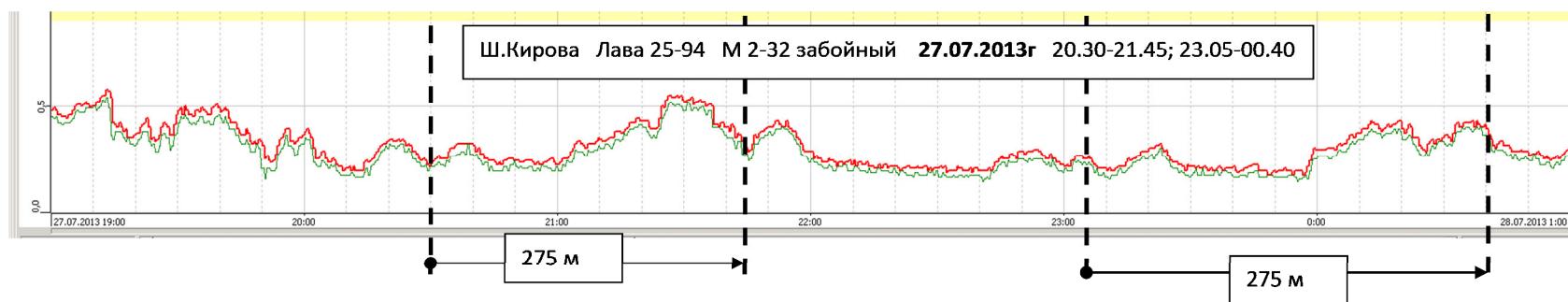


Рисунок 3.4.4 – Тренды записи концентрации метана в исходящей из лавы струе в течение времени

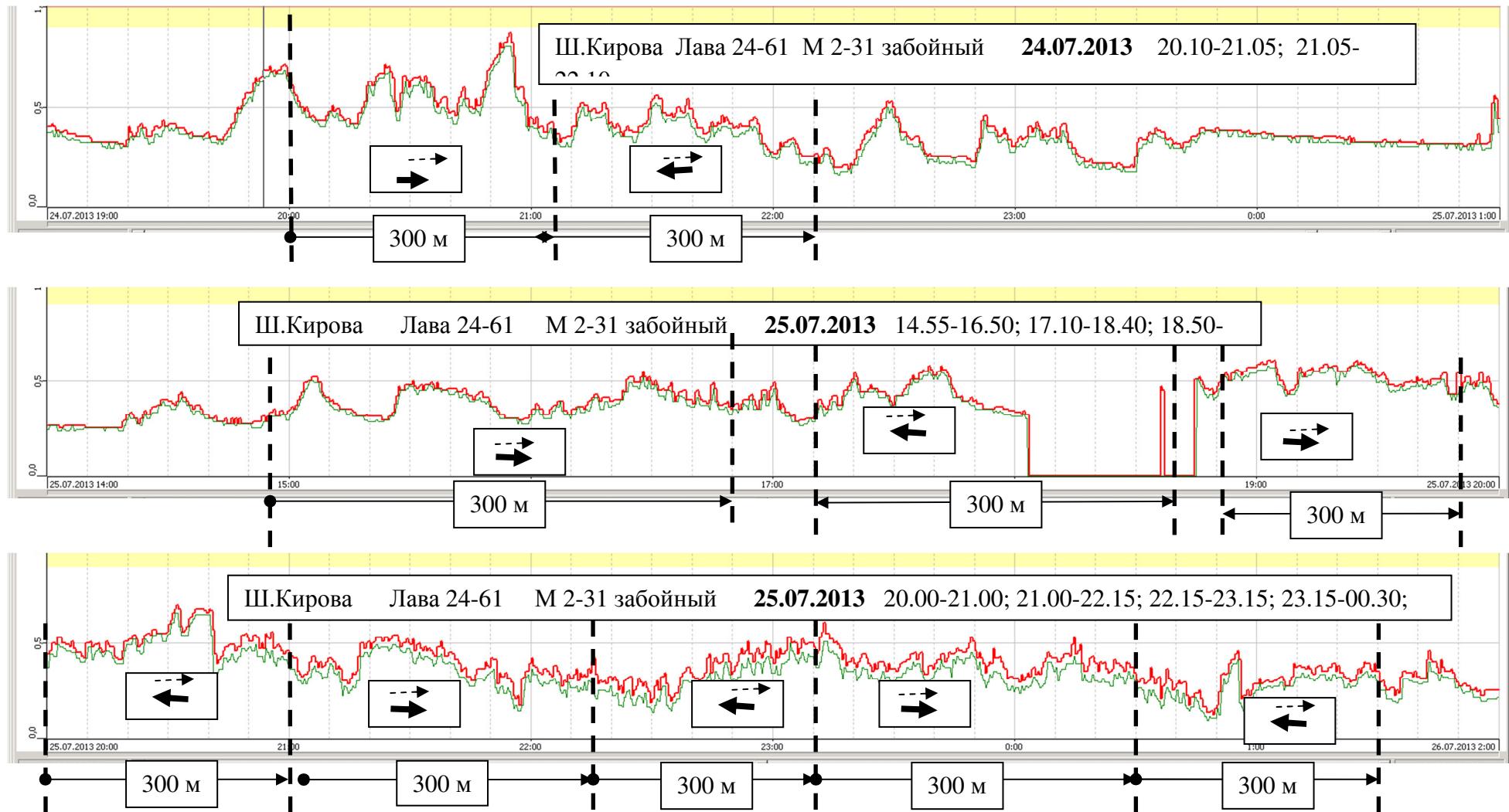


Рисунок 3.4.5 – Тренды записи концентрации метана в исходящей из лавы струе в течение времени

3.5 Выводы

3.5.1 Разработана методика газовой съемки лавы в ремонтную смену, результаты которой предназначены для определения проницаемости угольного пласта в очистном забое с целью последующего прогноза метанобильности угольного пласта в рабочие смены.

3.5.2 Обоснована целесообразность организации работы очистного забоя так, чтобы регулярно получать информацию о проницаемости угольного пласта в ремонтную смену, выполнив методически обоснованные замеры концентрации метана и скорости вентиляционного потока вдоль длины лавы.

3.5.3 Выполнено компьютерное моделирование процесса дегазации пласта выемочного столба между штреками в плоской постановке задачи. Установлено, что удельный приток метана из угольного пласта в штрек с двух сторон с течением времени стабилизируется, при этом центральная часть пласта между выработками практически не дегазируется и сохраняет исходное пластовое давление в течение всего времени отработки выемочного столба.

3.5.4 Разработана методика определения распределения давления метана в угольном пласте в пространстве между вентиляционным и конвейерным штреками, что представляет интерес при более точном расчете притоков метана из очистного забоя в методике прогноза предельной нагрузки на очистной забой по газовому фактору.

3.5.5 Выполнены шахтные исследования концентрации метана в исходящей из лавы струе в процессе работы очистного комбайна в зависимости от места его нахождения в процессе отбойки угля. Установлено, что в процессе отбойки угля при движении комбайна по направлению вентиляционной струи наибольший приток метана исходящую струю имеет место не в конце заходки, а на промежуточном участке перемещения комбайна. Это обусловлено различным характером притоков метана из свежеобнажённого угольного забоя и с поверхности отбитого угля на лавном конвейере: в первом случае при движении комбайна притоки метана из забоя непрерывно возрастают, а во втором случае падают.

3.5.6 Установлено, что при движении комбайна в процессе отбойки навстречу вентиляционной струе максимальная концентрация метана в исходящей струе имеет место на конечном участке производительной заходки вследствие суммирования притоков метана из всего свежеобнаженного угольного забоя и по всей длине отбитого угля на лавном конвейере.

4 Обоснование технологических мероприятий по интенсификации дегазации отрабатываемого угольного пласта

4.1 Анализ притоков метана в лаву на основе производственной статистики

При оптимизации работы угольной шахты с высокими нагрузками на очистной забой необходимо иметь информацию о притоках метана в лаву. В качестве примера рассмотрим производственную информацию, полученную в процессе эксплуатации лавы 24-55, шахта им. С.М. Кирова – ОАО "СУЭК-Кузбасс". В таблице 4.1.1 представлена типичная статистика за период 2013-2014 гг.

Таблица 4.1.1 – Данные шахты им. С.М. Кирова

Дата	Добыча угля, т/сут	Концентрация метана в исходящей из лавы струе, (среднее), %	Расход воздуха в лаве, $Q_{исх}$, м ³ /мин	Абсолютное газовыделение из лавы, м ³ /мин	Абсолютное газовыделение из выработанного пространства м ³ /мин	Абсолютное общее газовыделение из добычного участка, м ³ /мин
03.09.13	1500	0.4	1240	4.96	16.86	21.82
04.09.13	1400	0.4	1260	5.04	16.52	21.56
05.09.13	2100	0.3	1242	3.73	17.80	21.53
06.09.13	700	0.3	1218	3.65	15.44	19.09
07.09.13	0	0.3	1198	3.59	19.73	23.32
08.09.13	700	0.3	1205	3.62	19.75	23.37
09.09.13	1400	0.4	1200	4.80	21.06	25.86
...
02.12.14	9800	0.35	1225	4.29	58.19	62.48
03.12.14	10150	0.51	1180	6.02	56.97	62.98
04.12.14	9800	0.76	1175	8.93	58.11	67.04
05.12.14	0	0.17	1170	1.99	57.83	59.82
06.12.14	1000	0.39	1170	4.56	54.22	58.78
07.12.14	700	0.13	1170	1.52	54.22	55.74

Опишем табличные данные в виде графиков. На рисунке 4.1.1 представлена корреляционная зависимость среднесуточной концентрации метана в исходящей из лавы вентиляционной струе при различных нагрузках на очистной забой. Очевидно, проявляется фактор увеличения концентрации метана с ростом производительности, что обусловлено высокими притоками метана из очистного забоя и отбитого комбайном угля [45,46,47]. Концентрации

метана соответствуют допустимым нормам аэробиологической безопасности - менее 1%. Концентрация в диапазоне нагрузок от 6 до 12 тыс. т/сут изменяется в пределах от 0,2 до 0,9 %. Для статистики характерен большой разброс данных. Так, например, при нагрузке 6 тыс. т/сут минимум и максимум концентраций составляет, соответственно 0,4 и 0,9%. Такой же разброс данных имеет место при нагрузке 12 тыс. т/сут. При этом средние значения концентраций при указанных нагрузках составляют: 0,6 и 0,75%.

Таким образом, при работе очистного забоя даже при высоких нагрузках на очистной забой обстановка по газу может быть вполне спокойная. В то же время даже при относительно невысоких нагрузках менее 3 тыс. т/сут возникают ситуации с высокими концентрациями метана, достигающими 0,9%. Это свидетельствует о существенном влиянии горно-геологических факторов, управление которыми представляет большой практический интерес.

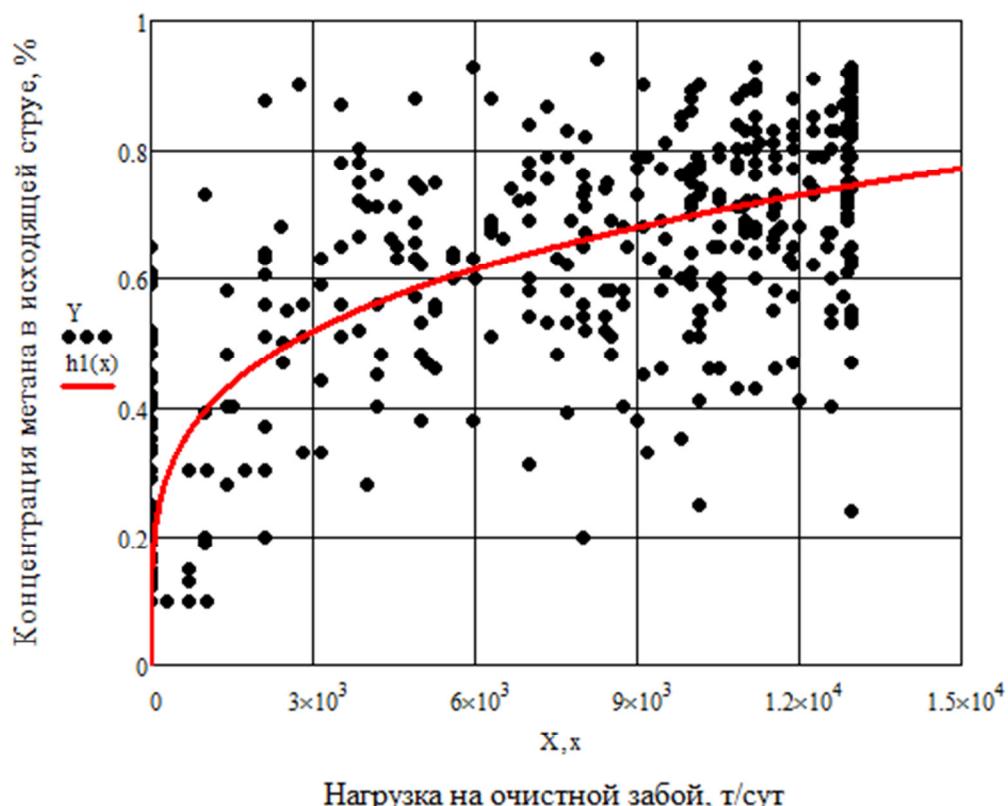


Рисунок 4.1.1 – Средняя концентрация метана в исходящей из лавы вентиляционной струе при различных нагрузках на очистной забой

При нагрузках на очистной забой более 5 тыс. т/сут средняя концентрация метана в струе составляет 0,695% при эмпирической дисперсии 0,145 и коэффициенте вариации 0,21.

На рисунке 4.1.2 представлена зависимость абсолютных притоков метана в лаву при различных нагрузках на очистной забой. Притоки метана при высоких нагрузках достигают $15 \text{ м}^3/\text{мин}$. Однако такие же притоки метана возможны в редких случаях при малых нагрузках на очистной забой. При этом тенденция увеличения притоков метана при высоких нагрузках очевидна. Из этого графика можно отметить, что при остановке добычных работ в очистном забое приток метана в лаву из угля и вмещающих пород в среднем составляет 2 $\text{м}^3/\text{мин}$. Этот показатель заслуживает внимания при определении проницаемости угля в зоне опорного давления на основе решения обратной задачи, решение которой продемонстрировано в третьем разделе.

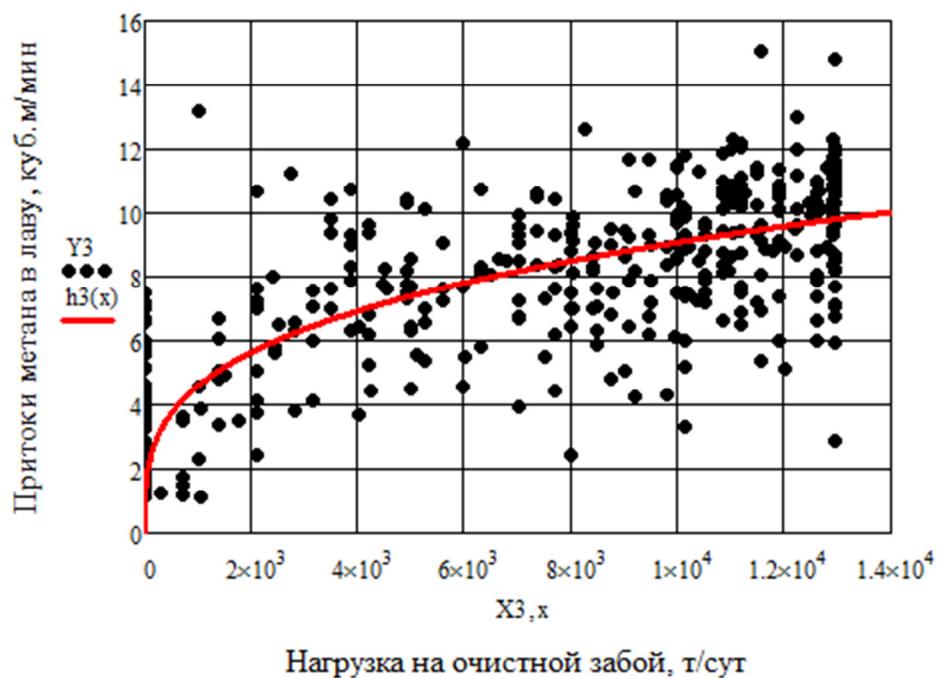


Рисунок 4.1.2 – Абсолютные притоки метана в очистной забой (лава 24-55)

В работе шахты зафиксирована производственная ситуация, когда в течение двух месяцев добычные работы не проводились. Тем не менее, притоки метана в лаву из угольного забоя и вмещающих пород имели место. Эта ситуация отображена графически на рисунке 4.1.3.

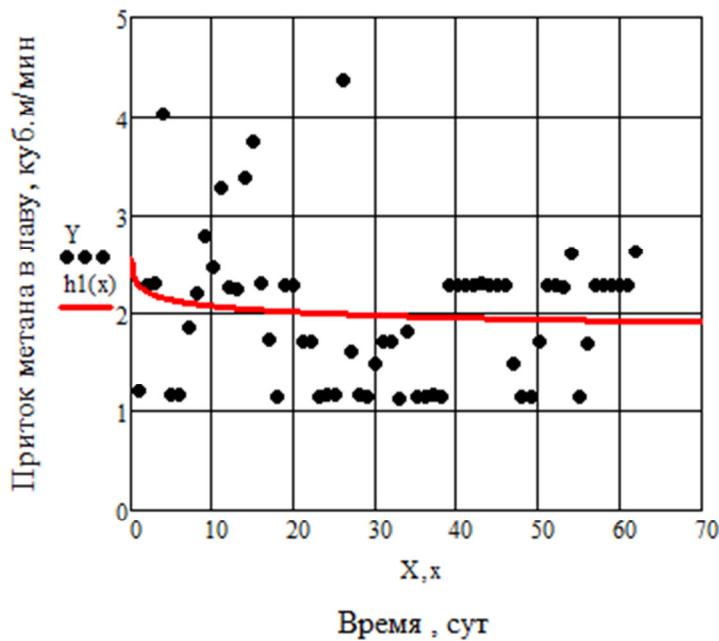


Рисунок 4.1.3 – Приток метана в лаву при остановке очистных работ

На рисунке 4.1.4 представлены фактические данные притоков метана в другую лаву при ее остановке в течение 23 суток. Так же как на рисунке 4.1.3. просматривается зависимость понижения притоков метана в лаву в течение времени. Однако значения через 7-8 суток являются аномальными, поскольку притоки метана составили $6,4 \text{ м}^3/\text{мин}$.

Возможно в это время производились какие-то специальные горные работы, которые привели к изменению горного давления и повышению проницаемости.

Другие фактические значения не нарушают общепонятного физического механизма описания притоков метана.

Результаты обработки статистики при нулевой нагрузке на лаву 24-55 следующие:

средний установившийся дебит метана – $1,99 \text{ м}^3/\text{мин}$;

среднеквадратичное отклонение от среднего значения – $0,74 \text{ м}^3/\text{мин}$;

коэффициент вариации – 0,37.

Лава 25-93

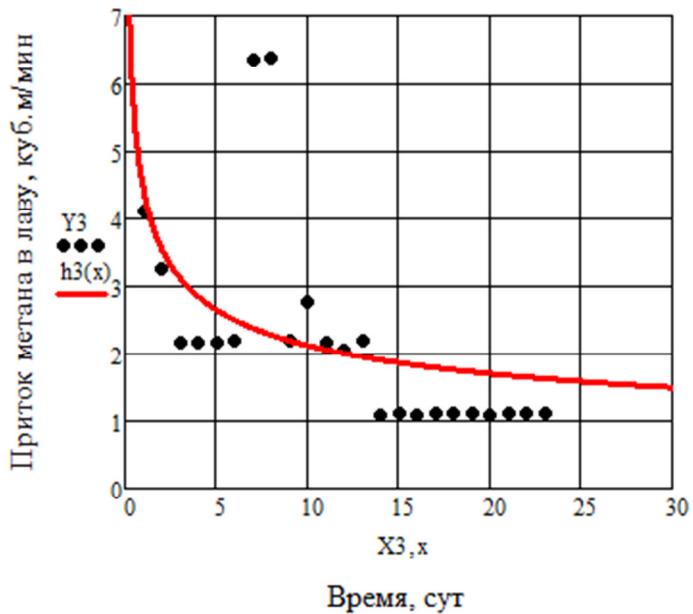


Рисунок 4.1.4 - Приток метана в лаву 25-93 при остановке добывчих работ

На рисунке 4.1.5 показана плотность случайного распределения случайной величины $N(x)$ по нормальному закону. На основе имеющейся зависимости для плотности вероятности вычислим вероятность события, что приток метана в лаву при нулевой нагрузке попадает в интервал от 0,5 до 3,5 $\text{м}^3/\text{мин}$. Интегрированием получаем искомую вероятность

$$P = \int_{0,5}^{3,5} N(x)dx = 0,96$$

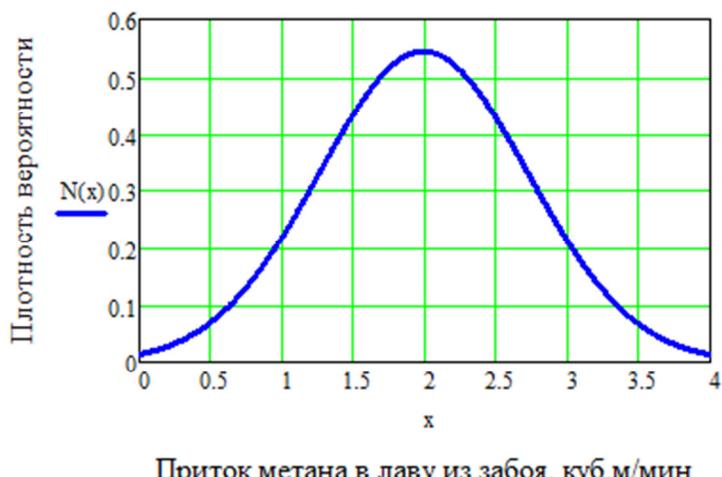


Рисунок 4.1.5 – Плотность нормально распределения случайной величины

Часть метана, содержащаяся во вмещающих породах и пластах-спутниках, поступает в выработанное пространство и оттуда через скважины, пробуренные с земной поверхности, метан отводится на поверхность с помощью вакуум-насосов. На рисунке 4.1.6 показана графическая зависимость, отражающая фактор увеличения притоков с увеличением нагрузки на очистной забой. Характерен большой разброс случайной величины относительно среднего значения. При отсутствии добычи угля приток метана составляет около $20 \text{ м}^3/\text{мин}$. При нагрузках на забой более 10 тыс. т/сут средний приток метана составляет около $60 \text{ м}^3/\text{мин}$. При этих условиях диапазон возможных значений притоков находится в пределах от 25 до $120 \text{ м}^3/\text{мин}$. При этом средний приток метана в выработанное пространство за весь период по данным таблицы 4.4.1 составляет $54,0 \text{ м}^3/\text{мин}$.

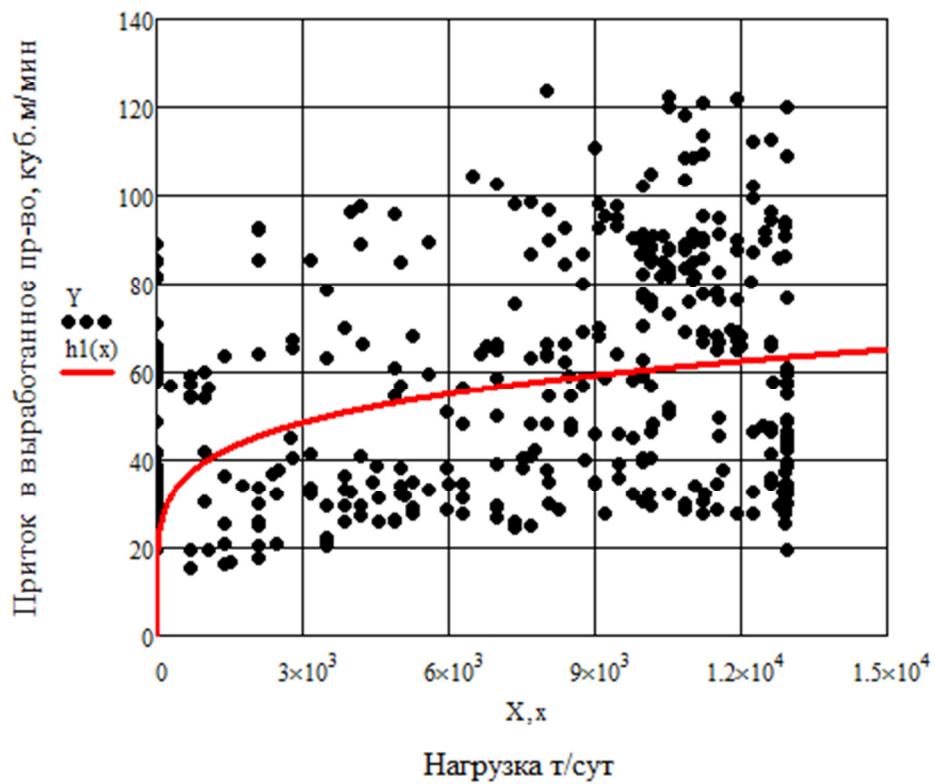


Рисунок 4.1.6 – Притоки метана в выработанное пространство при различных нагрузках на очистной забой

На рисунке 4.1.7 представлена аналогичная зависимость суммарных притоков метана в лаву и выработанное пространство (добычной участок) при

различных нагрузках на очистной забой. Видно, что зависимости 4.1.6 и 4.1.7 аналогичны по структуре и отражают одинаковый физический смысл. Однако в первом случае коэффициент корреляции составляет $r=0,35$, а во втором случае корреляция выше и составляет $r=0,43$. При этом достоверность вывода о наличии положительной корреляции абсолютная - превышает 99,99%.

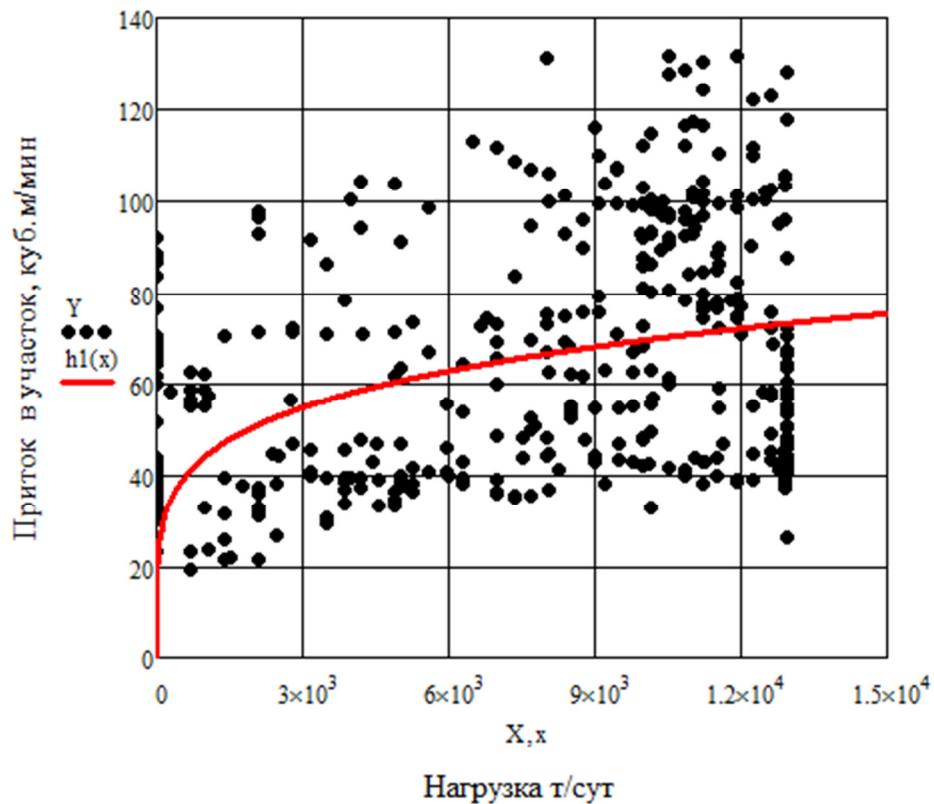


Рисунок 4.1.7 – Притоки метан в добычной участок при различных нагрузках на очистной забой

Выполнена также обработка статистического материала по лавам 24-52, 24-55, 25-92, 25-93, представленная на развернутом рисунке 4.1.8. Зависимости отражают следующие особенности:

- имеют место одинаковые физические механизмы притоков метана при повышении нагрузок на очистной забой - притоки метана монотонно увеличиваются и зависимости имеют тенденцию к установившемуся режиму;
- очень высокая дисперсия данных фактического материала - в некоторых случаях, даже при остановке очистных работ притоки метана в

исходящую струю достигают предельно высоких значений, характерных для высокопроизводительной работы забоя.

Несмотря большой разброс данных производственной статистики, общий физический смысл корреляционных зависимостей сохраняется, и техническая задача предварительной или заблаговременной дегазации сохраняет свою актуальность. Однако серьезным сдерживающим фактором является технологическая целесообразность мероприятий, которая должна соответствовать следующим основным критериям: простота технической реализации, малая трудоемкость, высокая оперативность и низкая себестоимость. В современных условиях, когда нагрузки на очистной забой значительно возросли, подготовительные мероприятия не в полной мере успевают за фронтом работ очистном забое. Так, например, при нагрузке 10 тыс.т/сут выемочный столб длиной 2000 м при длине лавы 300 м, мощность пласта 2 м, объемная масса 1,3 м³, будет отработан за время

$$\frac{300\text{м} \cdot 2\text{м} \cdot 2000\text{м} \cdot 1,3\text{т/м}^3}{10000} = 156 \text{ суток}$$

С учетом режима работы шахты длительность отработки выемочного столба составляет около года. При таких высоких нагрузках дегазационные работы с применением пластовой дегазации не в полной мере успевают подготавливать выемочный участок, что естественно сдерживает очистные работы.

Поэтому, что бы ликвидировать этот недостаток необходимо разработать простой и эффективный способ дегазации, применимый на участках, реализующих пластовую дегазацию. Решению этой задачи посвящен следующий раздел производственных экспериментов.

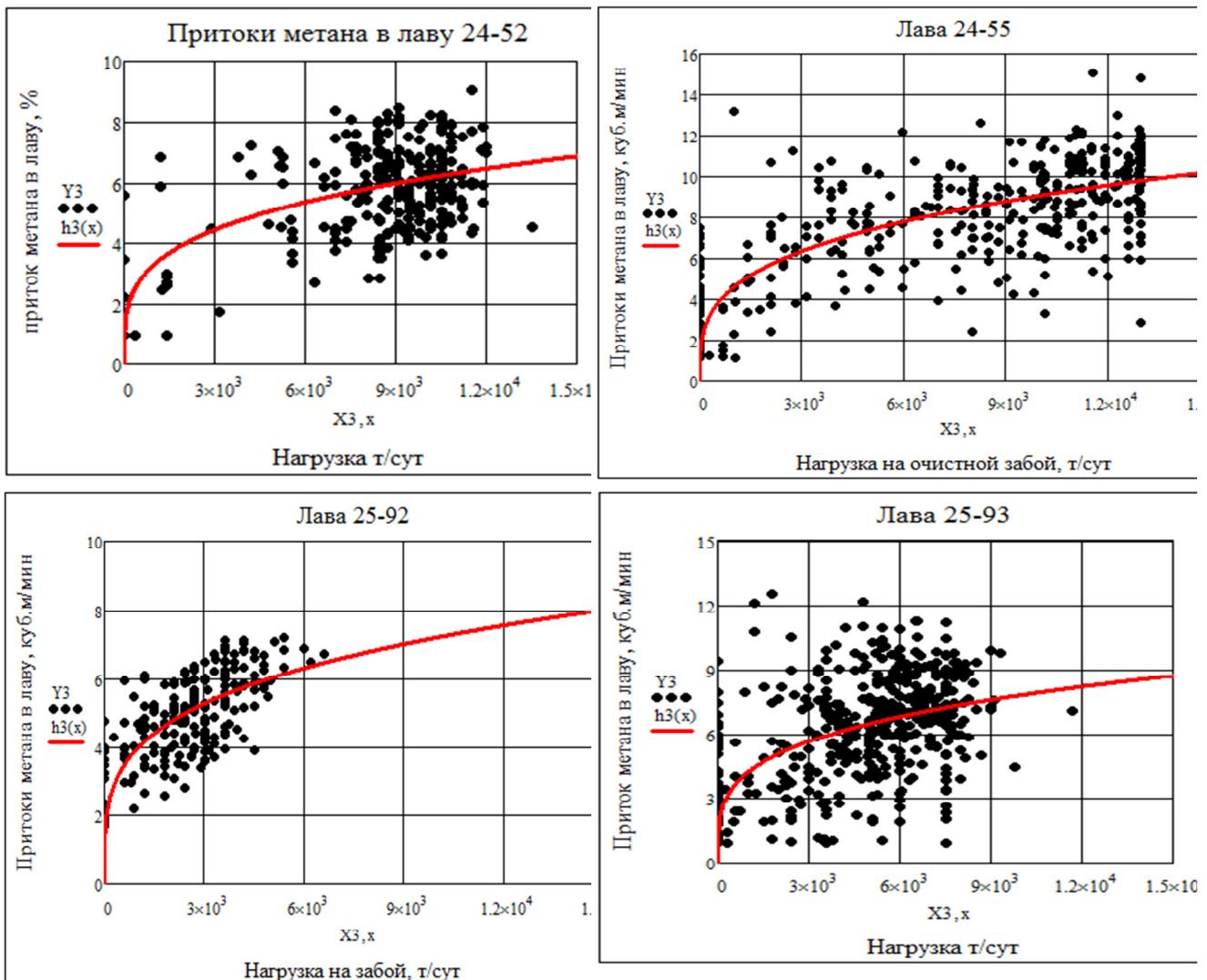


Рисунок 4.1.8 – Притоки метана в лаву в зависимости от нагрузки на забой

4.2 Обоснование метода пневматического воздействия на угольный пласт через дегазационные скважины

Предварительная дегазация угольных пластов, предусматривает бурение скважин в глубину выемочного столба из вентиляционного и конвейерного штреков, подсоединение устья скважин к шахтному газопроводу и откачуку метано-воздушной смеси на дневную поверхность. Дегазационная система состоит из вакуум-насосной станции, газопроводов, скважин, а также регулирующей запорной и предохранительной аппаратуры, включающей средства контроля и управления. Расстояние между скважинами выбирают в

зависимости от эффективности дегазации, которая в свою очередь зависит от природной газоносности и пластового давления метана. В частности на шахте им. С.М. Кирова расстояние между дегазационными скважинами длиной 80-120 м составляет 10-12 м. Без дополнительных мероприятий по подготовке выемочного столба к дегазации средние дебиты метана из скважин не превышают 16,1 л/мин.

Как отмечалось, важной производственной задачей является повышение эффективности дегазации за счет увеличения дебитов метана. Такую задачу можно решить за счет предварительного целенаправленного физического воздействия на угольные пластины с целью раскрытия микротрещин и повышения проницаемости. Фактором экономической эффективности вместе с метанобезопасностью при увеличении съема метана из угольного пласта является повышение нагрузки на очистной забой, а также при необходимости - снижение объема буровых работ за счет увеличения расстояния между дегазационными скважинами.

Общеизвестно, что причиной низких дебитов метана из угольных пластов является низкая газопроницаемость. Этот фактор действительно является очень важным и признается многими специалистами [24,26,27,89]. Однако, помимо низкой газопроницаемости неразгруженного от горного давления угля, на величину пластовой дегазации оказывает влияние способ бурения скважины. Этот фактор на первый взгляд представляется неочевидным. Однако при более внимательном рассмотрении следует обратить внимание на способ продувки скважины для выноса продуктов разрушения. Вынос продуктов разрушения в процессе бурения дегазационных осуществляют, как правило, следующими средствами:

- воздушная продувка;
- воздушная продувка с водой.

При разработке газоносных угольных пластов, в частности на шахте им. С.М. Кирова при бурении применяют метод очистки забоя от бурового шлама смесью воздуха и воды. Такой метод регламентирован требованиями

безопасности, чтобы исключить непредвиденные вспышки метана и воздуха в скважине, например, по причине нагрева при трении буровой коронки о забой и стенки скважины. Однако с другой стороны именно наличие влажного угольного шлама на забое скважины вызывает механическое закупоривание (кольматацию) стенок скважины. Фактически происходит затирание каналов проницаемости на поверхности ствола скважины водо-угольным шламом. В этом случае даже хорошо проницаемый угольный пласт, в котором пройдена дегазационная скважина, не будет пропускать метан.

Для полноты картины отметим, что существуют методы выноса продуктов бурения с помощью бурового раствора, например, при бурении глубоких скважин. Существует также метод очистки скважины с помощью отсоса продуктов разрушения за счет создания на забое давления меньше атмосферного. На практике также известен способ повышения продуктивности угольного пласта, в котором для повышения газоотдачи бурения скважины используют азот и реализуют так называемое "отрицательное дифференциальное давление". Этот способ описан на сайте компании "Austar Gas Pty Ltd" [150], которая специализируется на технологиях извлечения метана из угольных пластов. Термин "отрицательное дифференциальное давление" характеризует понижение давления в скважине, что бы исключить миграцию бурового раствора в массив вокруг скважины. В этом случае на полости и вокруг скважины не возникает искусственных аэродинамических препятствий на пути фильтрации метана из угля в скважину.

Исходя из описанного механизма влияния метода бурения, можно предложить различные технические решения, исключающие описанный недостаток. В частности, для раскрытия каналов проницаемости на полости скважины возможно использование энергетически слабого источника механического воздействия, доступного в шахтных условиях. Таким источником является сжатый воздух в шахтном трубопроводе, используемый для снабжения пневматической энергией шахтных установок. Преимуществом

такого технического решения является доступность энергии сжатого воздуха, трубопроводы которого проходят по подземным выработкам.

Главная идея разработанного нами способа интенсификации дегазации заключается в использовании энергии сжатого воздуха из системы шахтных трубопроводов. Практическая реализация способа осуществляется простыми техническими средствами, изготавливаемыми в шахтных мастерских.

Для реализации способа сжатый воздух под давлением до 6 бар (давление воздуха в трубопроводе) нагнетают в скважину, а затем, через некоторое время, метановоздушную смесь сбрасывают из скважины в магистральный дегазационный газопровод. В результате закачки и сброса воздуха происходит удаление из скважины остаточной воды, очистка от влаги и бурового раствора каналов проницаемости вокруг полости дегазационной скважины. Следствием такого воздействия является увеличение дебитов метана.

4.3 Описание технологии пневматической обработки угля через дегазационные скважины

Шахтные эксперименты выполнены с целью определения эффективности пневматического воздействия на угольный пласт через пластовые скважины. Известно, что дебиты метана из дегазационных скважин зависят от величины пластового давления метана, проницаемости угля и вмещающих пород.

Известны способы интенсификации процесса дегазации, среди которых выделим следующие:

- заблаговременное гидравлическое расчленение угольного пласта через скважины, пробуренные с земной поверхности;
- предварительное гидравлическое воздействие на угольный пласт через пластовые скважины;
- гидравлическое воздействие;
- пневматическая обработка пласта.

Во всех случаях методы направленного силового воздействия на каналы проницаемости угольного пласта позволяют увеличить их проходное сечение, что способствует интенсификации процесса дегазации.

Целесообразность методов воздействия определяется экономической целесообразностью в зависимости от достигаемой эффективности. Так, например, наибольшая эффективность дегазации достигается в способе заблаговременного гидравлического расчленения угольных пластов через скважины с земной поверхности. Однако фактор длинных денежных инвестиций от момента гидравлической обработки до экономической отдачи достигает 5 и более лет, что с одной стороны понижает рентабельность проектов, а с другой стороны позволяет через те же 5 лет достичь современных нагрузок на очистной забой в условиях высокой природной газоносности.

Технологии текущей дегазации с точки зрения срока возврата инвестиций более привлекательны, однако их эффективное применение требует решения задачи многократного повышения дебитов метана при минимальных затратах на реализацию механизмов повышения проницаемости угольного пласта.

Так, например, при существующих дебитах метана в условиях шахты им. С.М. Кирова дегазационный съем метана из разрабатываемого пласта к моменту выемки угля через один год дегазации не превышает $1,12 \text{ м}^3/\text{т}$:

$$\frac{0,01 \text{ м}^3/\text{мин} \cdot 2 \text{ скв} \cdot 60 \text{ мин}/\text{час} \cdot 24 \text{ час}/\text{сут} \cdot 364 \text{ сут}/\text{год}}{12 \text{ м} \cdot 2 \text{ м} \cdot 300 \text{ м} \cdot 1,3 \text{ т}/\text{м}^3} = 1,12 \text{ м}^3/\text{т}$$

Данный расчет выполнен по максимуму. Что касается фактического съема сметана, то его величина в несколько раз меньше, поскольку на рассмотренном участке множество скважин, в среднем 33% имеют дебит, близкий к нулю [58].

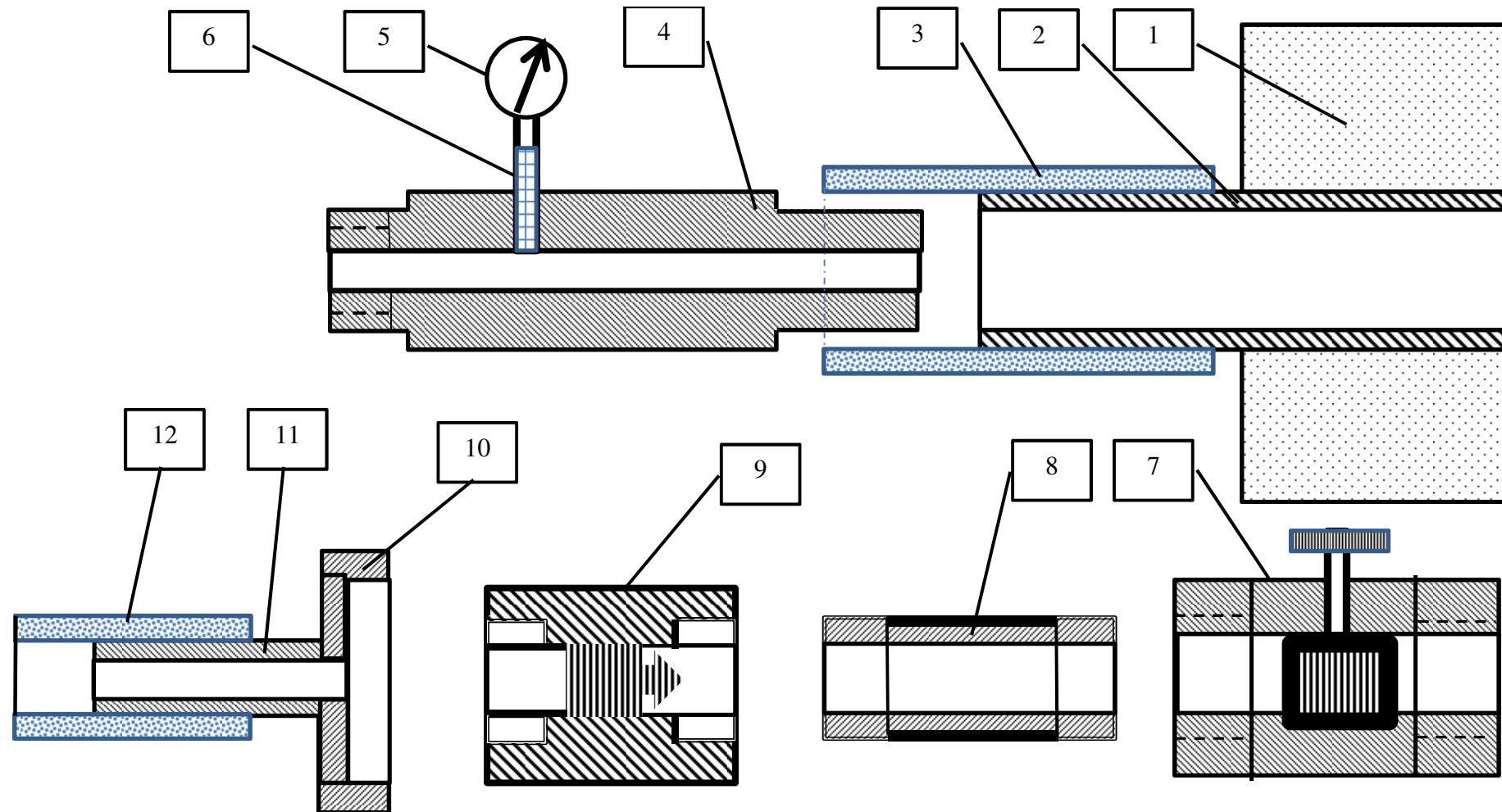
В разработанном способе для повышения эффективности дегазации пласта используют сжатый воздух из шахтного трубопровода под давлением

до 6 бар. Этим значением ограничивается величина силового воздействия сжатого воздуха на пространство вокруг дегазационной скважины.

На рисунке 4.3.1 представлена принципиальная схема реализации способа пневматической обработки пласта. В угольном пласте 1 пробурена дегазационная скважина, в устье которой установлена стеклопластиковая труба 2. Переходник 4 закрепляют в трубе посредством гофрированного шланга 3. В конструкции предусмотрен ниппель 6 и переносной манометр 5. Вентиль 7 через переходник 8 соединяют резьбовыми соединениями: с одной стороны с переходником 4, а с другой стороны – с обратным клапаном 9. В конец пневматического рукава 12 вставлена втулка 11 с гайкой 10, посредством которого через переходник (на рисунке не показан) осуществляют соединение с обратным клапаном. Второй конец пневматического рукава 12 подсоединяют к разветвлению шахтного пневмопровода (на рисунке не показан).

Пневматическую обработку угольного пласта осуществляют в следующем порядке.

Перед обработкой пласта измеряют дебит метана из скважины с помощью анемометра ЭМИС-МЕТА 210 или аналога. Затем подключают для пневматической обработки дегазационную скважину в соответствии с рисунком 4.3.1. Открывают первый вентиль 7 и второй вентиль шахтного пневмопровода (второй вентиль на рисунке не показан). Воздух под давлением до 6 бар поступает в скважину через трубу 2. Давление нагнетания фиксируют съемным манометром 5. В случаях, когда давление в шахтной сети понижается, что может произойти при произвольном отборе воздуха шахтными потребителями, происходит закрытие обратного клапана 9. При этом исключается обратный поток сжатого газа из скважины в шахтную пневматическую сеть.



1- угольный пласт; 2 –стеклопластиковая труба $\varnothing 74$ мм; 3 – соединительная гофра $\varnothing 74$ мм; 4 – переходник; 5 – манометр (съемный до 10 бар); 6 – ниппель; 7 – вентиль 1,5"; 8 – переходник; 9 – обратный клапан; 10 – гайка; 11 – ерш $\varnothing 32$ мм; 12 – пневмопровод (шланг с нитяной оплеткой, вход в ерш $\varnothing 32$ мм)

Рисунок 4.3.1 – Устройство для пневматической обработки пластовых дегазационных скважин

В ходе испытаний апробированы два варианта реализация способа:

Первый вариант, когда после повышения давления в дегазационной скважине до максимально возможной величины, воздух выдерживают в скважине в течение 10-15 минут. После этого газовую смесь из скважины сбрасывают в шахтный газопровод. В результате такой операции из скважины в процессе истечения газа удаляется свободная вода, которая часто скапливается в нисходящих скважинах. Кроме того, происходит пневматическая очистка каналов проницаемости угля вокруг скважины под действием истекающего под напором газа. Затем в течение последующего времени дегазации скважины измеряют установившийся дебит метана.

Второй вариант, когда воздух в скважине под давлением выдерживают в течение суток или более. В этом варианте возможны разовые сбросы газа из скважины перед последующей длительной выдержкой под давлением. Аналогично измеряют давление воздуха в скважине и установившийся дебит метана до и после пневмообработки.

На рисунке 4.3.2 представлен отвод от шахтного пневматического става, к которому подсоединяют гибкий рукав для воздуха.



Рисунок 4.3.2 – Отвод от шахтного пневматического става

Результаты шахтного эксперимента с пневматическим воздействием представлены в таблице 4.3.1.

Таблица 4.3.1 – Результаты шахтного эксперимента

№	Продолжительность воздействия, мин.	Давление в скважине, бар	Примечание
1	0,5	1	Режим нагнетания воздуха
2	2	1,5	
3	3	2,4	
4	40-60	5	
5	20-30	5	Режим выдержки под давлением воздуха. Давление понизилось до 4,2 бар. Видимых прососов воздуха из устья нет.
6	50-60		Длительность сброса давления до 2,5 бар произошло за 8-10 мин.

Начальный дебит метана в скважине до проведения эксперимента составлял 4,5 л/мин. Это был режим, установившийся в течение месяца. Дебит, измеренный в день эксперимента 30.07.2013, также составил 4,5 л/мин. Максимальное манометрическое давление в скважине в эксперименте составило 5 бар. В процессе постепенного сброса манометрического давления от 5 бар до нуля измеряли концентрацию метана. В процессе сброса давления в течение 30 минут из скважины выходил в основном воздух, без метана. Установившийся дебит метана, сразу после пневмо- воздействия и после сброса давления (через 40 мин), увеличился и составил 9 л/мин. Судя по концентрации, в установившемся режиме из скважины выходил 80...100% - ный метан.

Через двое суток, т.е. 31.07.2013, дебит метана в экспериментальной скважине составил 5,5 л/мин. Таким образом, в результате очень короткого пневматического воздействия, тем не менее, произошло увеличение дебита метана. Последующие замеры спустя трое суток показали, что дебит метана не изменился и составляет 5,5 л/мин.

При реализации второго варианта скважину под давлением выдерживали в течение суток. Начальное давление метана в скважине составляло 5,1 бар.

Через сутки давление понизилось до величины 4,7 бар. После сброса давления воздуха через 40 минут дебит метана составил 20 л/мин. Замеры на следующие сутки в последующие сутки в течение месяца показали, что дебит понизился до величины 15 л/мин. Отмечено, что режим истечения метана установился. При этом величина установившегося дебита 15 л/мин больше первоначального дебита 5,5 л/мин.

Способ апробирован также в условиях, когда дебит метана в дегазационных скважинах близок к нулю. Как отмечалось, количество таких скважин в ряде случаев составляет 33%. Установлено, что пневматической воздействие на "нулевые" скважины приводит к увеличению их дебитов до 10 л/мин и более, что имеет большое практическое значение при решении задачи дегазации выемочного столба.

По результатам пневматических испытаний нами выполнена оценка объема зоны. Для сравнения объем скважины длиной 150 м равен

$$V = \frac{\pi d^2}{4} L = \frac{3,14 \cdot 0,076^2}{4} \cdot 150 = 0,68 \text{ м}^3 \quad (4.3.1)$$

Объем зоны трещиноватости вокруг скважины равен

$$V_{\text{тр}} = n_{\text{пор}} \frac{\pi [D_{\text{тр}}^2 - d^2]}{4} L \quad (4.3.2)$$

$n_{\text{пор}}$ - пористость угля вместе с каналами проницаемости

$D_{\text{тр}}$ - диаметр зоны трещиноватости;

L - длина скважины.

Рассмотрим случай, когда скважину заполнили воздухом под давлением $P_0 = 7$ бар. При этом воздух заполнил объем скважины и зону трещиноватости

$$V + V_{\text{тр}}$$

Уравнение состояния газа в этом случае имеет вид

$$P_0(V + V_{\text{tp}}) = \frac{m_0}{\mu} RT \quad (4.3.3)$$

Затем из скважины стали сбрасывать воздух с расходом $G_1 = 100 \text{ л/мин}$ в течение $\Delta t_1 = 20 \text{ мин}$. В конце процесса давление в скважине составило $P_1 = 4 \text{ бар}$. Количество сброшенного воздуха

$$\Delta V = G_1 \cdot \Delta t_1 \quad (4.3.4)$$

Масса сброшенного воздуха плотностью $\rho_{\text{в}} = 1,25 \text{ кг/м}^3$

$$m_1 = \Delta V \cdot \rho_{\text{в}} \quad (4.3.5)$$

Уравнение состояния газа в объеме скважины о зоне трещиноватости

$$P_1(V + V_{\text{tp}}) = \frac{[m_0 - m_1]}{\mu} RT \quad (4.3.6)$$

Имеем два уравнения (4.3.3) и (4.3.6) с двумя неизвестными m_0 и V_{tp} . Из решения системы уравнений находим искомый параметр - объем зоны трещиноватости

$$V_{\text{tp}} = \frac{RT}{P_0 - P_1} \cdot \frac{m_1}{\mu} - V$$

Выполним оценочный расчёт:

$$\Delta V = G_1 \cdot \Delta t_1 = 100 \cdot 20 = 2000 \text{ л} = 2 \text{ м}^3$$

$$m_1 = 2 \cdot 1,25 = 2,5 \text{ кг}$$

$$V = \frac{\pi d^2}{4} L = \frac{3,14 \cdot 0,076^2}{4} * 150 = 680 \text{ л} = 0,68 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{tp}} = \frac{RT}{P_0 - P_1} \cdot \frac{m_1}{\mu} - V = \frac{8,31 \cdot 300}{(7-4) \cdot 10^5} \cdot \frac{2,5}{29 \cdot 10^{-3}} - 0,68 = 0,036 \text{ м}^3$$

Следовательно, для цилиндрической фигуры диаметр зоны трещиноватости составляет

$$D_{tp} = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{tp}}{\pi \cdot n_{por} \cdot L} + d^2}$$

$$D_{tp} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,036}{\pi \cdot 0,05 \cdot 150} + 0,076^2} = 0,109 \text{ м}$$

Таким образом, на основе выполненного расчёта можно утверждать, что воздух проник на глубину

$$(0,109-0,76)/2=0,017 \text{ м}=17 \text{ мм.}$$

Следовательно, при сбросе воздуха из скважины будет обеспечена прочистка ближней зоны вокруг скважины от бурового шлама и тем самым будет повышена проницаемость стенок скважины.

Вторым не менее важным выводом является то, что воздух содержащий кислород не проникает глубоко в угольный пласт. Следовательно, фактор смешивания кислорода с метаном внутри угольного пласта полностью исключается. Прочистка каналов фильтрации, как показали производственные испытания способ на шахте им. С.М. Кирова приводит к старту процесса дегазации даже "нулевых скважин". В последующем удаление угольного метана из пласта приводит к сорбционной усадке угля, что в свою очередь повышает проницаемость угля на большем удалении от скважины – практически по всему объему между дегазационными скважинами. Отличительной особенностью способа является то, что запускается стартовый механизм дегазации, который имеет тенденцию к самопроизвольной интенсификации.

После старта дегазации, вызванного пневматическим воздействием нами предложен и апробирован в шахтных условиях механизм повышения проницаемости за счет автопневмовоздействия. С этой целью скважины, из которых истекает метан, следует сначала закрывать на 1-3 суток с целью повышения давления метана в скважине, а затем открывать.

При реализации технологической операции закрытии устья скважины происходит повышение пластового давления метана вокруг скважины, что сопровождается сорбционным набуханием угля [139]. При достижении сорбционных деформаций предельных прочностных значений происходит распространение дополнительных систем трещин, что приводит к увеличению газопроницаемости угольного пласта в пространстве вокруг дегазационной скважины. Чем больше перепад давлений и длительность дегазации, тем больший объем угольного пласта подвергается сорбционным деформациям.

Объемная деформация угля в процессе сорбционной усадки при замещении молекул метана углеродом составляет

$$\theta_c = \left(\frac{a \cdot b \cdot P_0}{1 + b \cdot P_0} - \frac{a \cdot b \cdot P}{1 + b \cdot P} \right) \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \frac{\mu_{\text{CH}_4}}{\mu_c} \quad (4.3.7)$$

где a – максимальная сорбционная емкость в уравнении Ленгмюра, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 b – коэффициент Ленгмюра, Па^{-1} ;
 P_0 – пластовое давление метана, Па ; P – текущее давление метана, Па ; μ_{CH_4} и μ_c – молярные массы метана и угля, соответственно, $\text{кг}/\text{моль}$;
 ρ_c – объемная масса угля, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Средние механические напряжения в угле, возникающие при сорбционных деформациях в зажатой среде, составляют

$$\sigma = \frac{E_0 \cdot \theta_c}{3(1-2\gamma)} \quad (4.3.8)$$

где E_0 – модуль деформации угля, Па ; γ – коэффициент Пуассона.

Как свидетельствуют расчеты, изменение давления метана в поровом пространстве вызывает в структуре угля сорбционные механические напряжения почти на порядок более высокие по сравнению с изменением давления газа. На этом основании обоснован рациональный режим вариации пластового давления в более 5 бар, что приводит к появлению напряжений,

сравнимых с предельными прочностными значениями для угля. Данный теоретический результат в виде увеличения дебита метана из пластовой скважины за счет сорбционных деформаций имеет надежное экспериментальное подтверждение в шахтных условиях [59].

Таким образом, предложенный способ интенсификации пластовой дегазации обладает преимуществами по сравнению с известными, отличается простотой практикой реализации и рекомендуется к широкому применению..

4.4 Выводы

4.4.1 На основе производственной статистки установлено увеличение концентрации и притоков метана в исходящей из лавы струе в зависимости от нагрузок на очистной забой. При этом отмечена высокая дисперсия результата с коэффициентом вариации порядка 0,21 при нагрузках на очистной забой более 5 тыс.т/сут.

4.4.2 По результатам измерений концентрации метана в исходящей из лавы струе установлено, что при остановке работ в очистном забое, по крайней мере через неделю и в течение последующих двух месяцев, приток метана в исходящую струю стабилизируется, что свидетельствует о реализации квазиустановившегося режима массопереноса.

4.4.3 При современных нагрузках на очистной забой более 5 тыс.т/сут применяемые технологии текущей пластовой дегазации не обеспечивают должного уровня дегазации, что в условиях действующих шахт требует применения более технологичных, оперативных и эффективных способов.

4.4.4. Описана одна из причин низкой газоотдачи угольных пластов, заключающаяся в закупоривании угольным шламом ствола дегазационной скважины в процессе буровых работ с очисткой скважины воздушно- водяным потоком.

4.4.5 Разработан новый способ интенсификации пластовой дегазации, основанный на использовании шахтного сжатого воздуха из системы шахтных

трубопроводов, нагнетаемого в скважину за время до 30 мин под давлением до 6 бар с последующим сбросом давления.

4.4.6 Выполнена производственная апробация способа пластовой дегазации с использованием сначала сжатого воздуха, а затем сжатого метана. Доказана возможность повышения дебитов метана из дегазационных скважин в 1,5 – 2 раза за счет предварительного пневматического воздействия.

5 Обоснование рекомендаций по расчету нагрузок на очистной забой в условиях высокопроизводительной разработки угольных пластов

5.1 Методика расчета допустимой нагрузки на очистной забой по результатам газовой съемки в ремонтную смену, с учетом фактических источников метана и величины пластового давления

Ученые и горные инженеры МГГУ и ОАО "СУЭК-Кузбасс" в течение последних 5 лет проводят совместные исследования в направлении разработки и совершенствования Методики расчета предельно допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору, результаты которых отражены в публикациях [21,41,52,53,56,79,80,107,108,115,117,118]. Выделим вклад ученых, представивших диссертации, в эту актуальную разработку:

- канд. техн. наук Мазаник Е.В. (научный руководитель проф. Сластунов С.В.) для условий Кузбасса предложил способ значительного повышения нагрузок на очистной забой на базе заблаговременной дегазации шахтных полей через скважины, пробуренные с земной поверхности [80];

-канд. техн. наук Лупий М.Г.(научный руководитель проф. Коликов К.С.) описал влияние предельно высоких нагрузок на очистной забой (15 тыс. т/сут и более) на притоки метана в исходящую струю [79];

- канд. техн. наук Иванов Ю.М. (научный руководитель проф. Каркашадзе Г.Г.) разработал метод расчета притоков метана в исходящую струю с учетом массопереноса вентиляционного потока между лавой и выработанным пространством на основе результатов газовой съемки вдоль очистного забоя [41];

- канд. техн. наук Волков М.А. (научный руководитель проф. Коликов К.С.) предложил методику определения пластового давления метана, проницаемости неразгруженного пласта и параметров сорбции Ленгмюра по результатам шахтных испытаний дегазационных скважин [21];

- канд. техн. наук Шмат В.Н. (научный руководитель проф. Сластунов С.В.) усовершенствовал методы пластовой и заблаговременной дегазации

угольных пластов с целью снижения газоносности для повышения нагрузок на очистной забой [135].

Вклад данной диссертационной работы в Методику расчета нагрузок на очистной забой заключается в том, что повышенное внимание уделено учету притоков метана в исходящую струю из очистного забоя и отбитого угля с различным гранулометрическим составом, в течение времени его транспортирования до откаточного штрека.

На рисунке 5.1.1 представлена последовательность расчетов по усовершенствованной Методике. Исходные данные для расчета имеют однозначное толкование и состоят из горно-геологических и физических параметров угольного пласта и технологических параметров системы разработки и применяемого очистного оборудования. Исходные данные получают в лабораторных и шахтных условиях. Фундаментальные свойства газа и законы массопереноса описаны в справочной литературе и научных монографиях.

Лабораторные исследования, включают определение объёмной массы угля, пористости и констант сорбции Ленгмюра. Для этой цели служит производственная углехимическая лаборатория, обслуживающая шахты. В этой же лаборатории проводят ситовый анализ и определяют гранулометрический состав отбиваемого комбайном угля. Рекомендуемая периодичность анализа грансостава - один раз в месяц. Грансостав зависит от крепости угля и условий разрушения угля комбайном.

Шахтные исследования включают определение пластового давления метана в дегазационных скважинах выемочного столба. Рекомендуется периодичность измерений – одна измерительная скважина в месяц.

Шахтная газовая съемка лавы в ремонтную смену является самой информативной операцией, влияющей на достоверность прогноза.

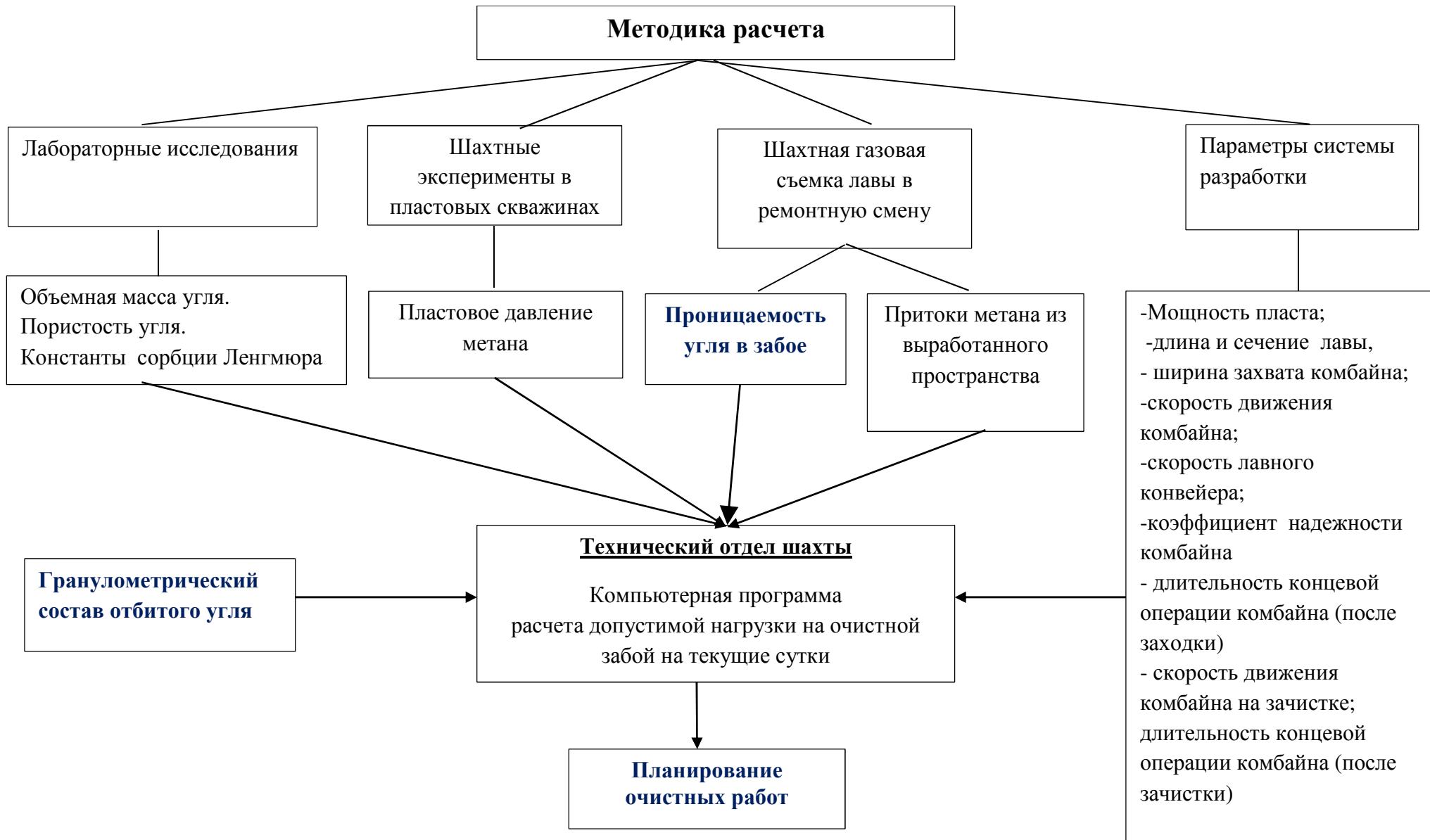


Рисунок 5.1.1 –Последовательность расчетов

Учитывая важность задачи обеспечения метанобезопасности такие данные должны поступать регулярно, а на участках повышенной газоносности ежесуточно. По результатам газовой съемки в очистном забое определяют проницаемость угля в забое и притоки метана из выработанного пространства.

Параметры системы разработки отражены в проектно-технической документации, в том числе: мощность разрабатываемого пласта, длина и сечение лавы, ширина захвата комбайна, скорость движения комбайна, скорость лавного конвейера, коэффициент надежности комбайна, длительность концевой операции комбайна (после производительной заходки), скорость движения комбайна на зачистке, длительность концевой операции комбайна (после зачистки) и другие.

По предлагаемой методологии все данные поступают в технический отдел шахты, где по компьютерной программе производят расчет нагрузки на очистной забой по газовому фактору на последующие рабочие смены. Результаты прогноза имеют практическое значение при планировании очистных работ по фактору предельно допустимой производительности добычи угля.

Новизна научно-технических предложений, разработанных в диссертационной работе, на рисунке 5.1.1 выделена жирным цветом.

Продемонстрируем на примере описанную методику расчета. Исходные данные для расчета представлены в таблице 5.1.1.

Таблица 5. 1.1 – Исходные данные расчета

Название пласта "Болдыревский"; лава 24-55		
№п/п	Свойство, параметр	Значения параметров
1	Угольный пласт, %	2,0
1	Пористость, %	Кровля, %
		2,0
		Почва, %
2	Проницаемость	Угольный пласт, м^2
		$0,2 \cdot 10^{-15}$
		Кровля, м^2
3	Константы сорбции Ленгмюра	Почва, м^2
		$0,01 \cdot 10^{-15}$
		$0,01 \cdot 10^{-15}$
4	Пластовое давление метана, Па	$k, \text{Па}^{-1}$
		$0,207 \cdot 10^{-6}$
5	Объемная масса угля, $\text{кг}/\text{м}^3$	49,3
		$16,54 \cdot 10^5$ (расчет по изотерме Ленгмюра)
6	Природная газоносность пласта, $\text{м}^3/\text{т}$	1280
7	Мощность пласта (полная мощность угольных пачек), м	12
	Высота выемки угля комбайном из пласта, м	2,23
9	Длина лавы, L , м	240
10	Ширина заходки комбайна, м	0,9
11	Минимальное сечение очистной выработки, м^2	6,8
12	Коэффициент безаварийной работы комбайна в рабочей смены в течение всего срока эксплуатации (надежность)	0,95
13.1	Длительность концевой операции комбайна (после производительной заходки – перед операцией зачистки забоя), t_1 , сек	180
13.2	Скорость обратного движения комбайна (на зачистке) перед очередным циклом заходки, $v_{зач}$, м/мин	10
13.3	Длительность концевой операции комбайна (после зачистки) перед очередным циклом, t_2 , сек	180
	Суммарное время перед очередным циклом заходки (расчетное), сек	1860

14	Концентрация метана в воздушном потоке в штреке – на входе в очистной забой, %		0, 05
15	Режим работы очистного забоя	Количество рабочих смен в сутках	4=(3+1)
		Длительность рабочей смены, час	6
		Длительность ремонтной смены, час	6
		Время остановки комбайна в начале и конце рабочей смены, мин	10+10=20
16	Коэффициент раскрытия трещин в отбитом угле зависит от кусковатости		0,6
17.1	Эмпирический коэффициент перетока воздуха в выработанное пространство (при отсутствии результатов газовой съемки)		1,2
17.2	Если известны результаты газовой съемки, то допустимый приток метана рекомендуется определять по методике из диссертации Ю.М. Иванова. Расчет выполнен по прилагаемой подпрограмме:		
17.2.1	Фактические относительные объемные потери (с плюсом) или притоки (с минусом) воздуха в выработанное пространство, в долях единицы		$\eta\eta = -0,00204$
17.2.2	Массовый приток метана (с плюсом) отток (с минусом) в исходящую из лавы струю из выработанного пространства, кг/мин		$QF=-1,277$

При условиях по таблице 5.1.1 расчетная нагрузка на очистной забой составляет 11470 т/сут, что удовлетворительно соответствует исходным данным лавы-аналога.

5.2 Методика оценки экономической целесообразности технических решений, направленных на повышение нагрузок на очистной забой

При принятии решений о технологических мероприятиях по дегазации угольных пластов с целью повышения нагрузок на очистной забой необходимо иметь надежную информацию относительно ожидаемой экономической отдачи. Такая информация может быть получена достаточно оперативно на основе данных работы предприятия по месяцам.

Для повышения достоверности выводов при анализе данные за длительный период времени фактор разновременных затрат будем учитывать ставками дисконта. В результате получим значения чистой текущей стоимости (NPV - *Net present value*), которая учитывает сумму дисконтированных значений себестоимости угля, приведённых к текущему моменту оценки проекта заблаговременной или текущей себестоимости.

В качестве примера в таблице 5.2.1 в столбцах 1,2 и 6 приведены данные по месяцам себестоимости угля и среднесуточной нагрузки на очистной забой при работе шахты начиная от января 2012 г. до июня 2015 г. (всего 42 месяца).

Таблица 5.2.1 – Показатели работы шахты

Январь 2012г- сентябрь 2015г, порядковый номер месяца	Себестоимость добычи угля, C_0 , руб/т	Номер дисконта относительно сентября 2015 г, i	Коэффициент дисконта по месяцам, R_i	Себестоимость добычи угля с учетом дисконта на сентябрь 2015 г $C=C_0 \cdot R_i$	Месячная нагрузка на очистной забой, G , тыс.т/мес
1	2	3	4	5	6
01	219.9	44	1.549	340.6	315.3
02	380.5	43	1.534	583.7	311.4
03	162.5	42	1.519	246.8	730.6
04	230.3	41	1.504	346.3	619.2
05	280.5	40	1.489	417.6	427.4
...
...
38	78147.052	7	1.072	83780	3.36
39	37531.234	6	1.062	39840	9.12
40	982.299	5	1.051	1032	263.49
41	804.220	4	1.041	836.9	300.12
42	658.908	3	1.03	678.9	415.26

По условию поставленной задачи необходимо построить зависимость себестоимости угля от нагрузки на очистной забой в ценах сентября 2013года. Такая зависимость, на практике представляет интерес при принятии обоснованного решения относительно ожидаемой выгоды от мероприятий по дегазации угольных пластов с целью повышения нагрузки на очистной забой.

Себестоимость угля в январе 2012., то есть 44 месяц назад - если отсчитывать от сентября 2015г., составляла 219,9 руб/т при производительности добычи 315,3 тыс. т/мес. Себестоимость, приведенная к моменту времени на сентябрь 2015г. будет больше из-за инфляции и других факторов. Годовая ставка дисконта составляет $a=0,12$. Среднемесячную ставку дисконта вычислим путем деления среднегодовой ставки на $N = 12$ месяцев.

Ежемесячный коэффициент дисконтирования составляет

$$R_i = \frac{1}{\left(1 + \frac{a}{N}\right)^i} \quad (5.2.1)$$

где i – номер шага отчета (месяца);

a – годовая ставка дисконтирования;

N – количество месяцев, $N = 12$.

В ценах на момент принятия решения в сентябре 2015 г. себестоимость будет больше с учетом дисконтирования. Приведенную себестоимость получим перемножением себестоимости $C_0 = 219,9$ руб/т в январе 2012 года на коэффициент дисконтирования при $i = -44$

$$R(-34) = \frac{1}{\left(1 + \frac{0,12}{12}\right)^{-44}} = 1,549$$

Расчет:

$$C = C_0 \cdot R_i = 219,9 \cdot 1,549 = 340,6 \text{ руб/т}$$

В таблице 5.2.1 в столбцах 3,4 и 5 приведено продолжение аналогичных расчетов.

На основе скорректированных данных построена корреляционная зависимость приведенной себестоимости угля от достигаемой нагрузки на очистной забой, в ценах сентября 2015г., представленная на рисунке 5.2.1. Сплошной линией показаны значения без учета дисконтирования. Точки и пунктирная линия и учитывают фактор разновременных затрат и поэтому линия расположена выше. В том и другом случае по мере увеличения производительности добычного участка себестоимость падает.

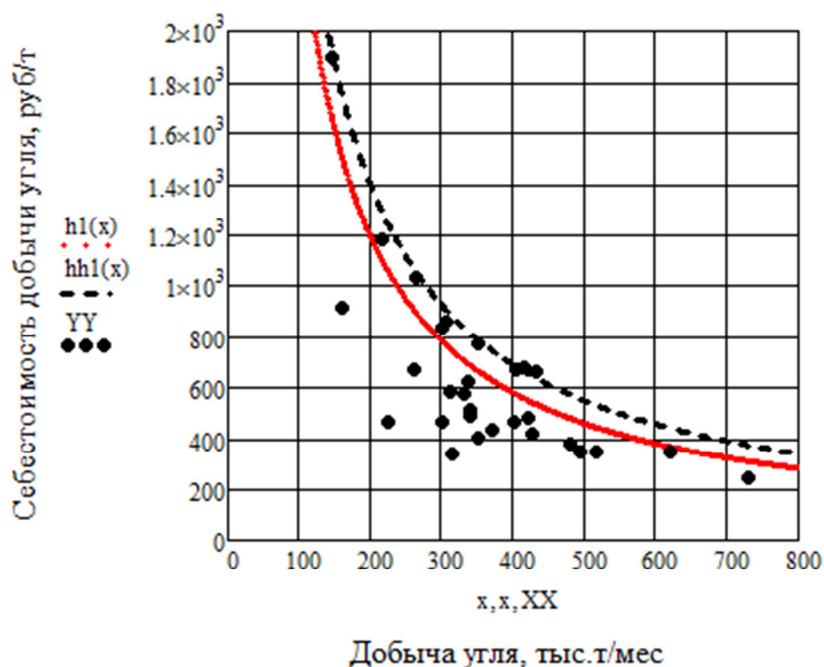


Рисунок 5.2.1 - Корреляционная зависимость себестоимости добычи угля от величины нагрузки на очистной забой

Рассмотрим вариант, когда в результате мероприятий по дегазации нагрузка на забой возрастает с 600 до 700 тыс.т/мес, т.е на 16,7 %. Как свидетельствует корреляционная зависимость в этом случае себестоимость добычи угля понижается на величину

$$(455.098 - 388.804) = 66,3 \text{ руб/т}$$

Понижение себестоимости в процентах составляет

$$\frac{66,3}{455,098} \cdot 100\% = 14,6\%.$$

Следовательно, ожидаемая экономия средств за месяц в результате увеличения производительности добычи на величину 100 тыс. т/мес составит 66,3 руб/т·100 тыс.т=6,63 млн. руб/мес.

Полученная цифра является ориентиром при принятии к реализации технологических решений, обеспечивающих повышение нагрузок на очистной забой.

5.3 Экономическая эффективность на основе интенсификации дегазационных работ методом пневматического воздействия

В базовом технологическом варианте пластовой дегазации выемочного столба в течение времени эксплуатации дегазационных скважин, при установившемся среднем дебите, из скважины извлекается метан в следующем относительном количестве

$$\Delta q = \frac{q \cdot t}{m \cdot R \cdot (L - l_0) \cdot \rho}, \text{ м}^3/\text{т}, \quad (5.3.1)$$

где q – средний дебит метана, $\text{м}^3/\text{с}$;

t – время дегазации выемочного столба перед началом работы очистного комбайна;

m - мощность пласта, м;

R – расстояние между скважинами, м;

L – длина лавы, м;

l_0 – зона дегазации между через оконтуривающие выработки, м;

ρ – плотность угля, $\text{т}/\text{м}^3$.

Выполним оценочный расчет применительно к очистным работам по пласту "Болдыревский" шахты им. С.М. Кирова: $q=10$ л/мин; $t=6$ мес; $m=2,23\text{м}$; $R=12$ м; $L=240$ м; $l_0=40$ м; $\rho=1,28 \text{ т}/\text{м}^3$.

Результат расчета по формуле (5.3.1):

$$\Delta q = 0,84 \text{ м}^3/\text{т.}$$

Таким образом, при начальной природной газоносности угольного пласта 12 м³/т базовая технология обеспечивает понижение газоносности перед началом очистных работ до величины 11,16 м³/т.

Далее рассмотрим сравнительный вариант, когда в результате разработанных в диссертации технологических мероприятий по пневматическому и автопневматическому воздействию на пласт через дегазационные скважины достигнуто повышение средних дебитов метана до величины 25 л/мин. Отметим, что примерно такие же результаты получены в результате шахтных испытаний технологии. В этом случае газоносность угольного пласта, рассчитанная по формуле (5.3.1) будет понижена на величину 2,1 м³/т. Следовательно, газоносность пласта в результате разработанных мероприятий составит 9,9 м³/т.

Воспользуемся методикой расчета нагрузки на очистной забой, представленной в разделе 5.1. При тех же исходных данных имеем результат, представленный в таблице 5.3.1.

Таблица 5.3.1 – Прогноз нагрузки на очистной забой

№п /п	Варианты подготовки угольного пласта	Газоносность, м ³ /т	Нагрузка на очистной забой, т/сут
1	Без пластовой дегазации	12,0	11470
2	Базовая пластовая дегазация (без физических воздействий)	11,16	12200
3	Пластовая дегазация в пневматическим воздействием	9,9	13310

На основе выполненных расчетов, можно утверждать, что при реализации базовой технологии пластовой дегазации предельно допустимая нагрузка на очистной забой увеличивается примерно на 6,4%, что является весовым фактором обеспечения безопасности. В то же время, при реализации разработанной нами технологии пневматического воздействия,

нагрузка возрастает на 16%, что представляет весомый практический интерес.

Если воспользоваться методикой расчета себестоимости угля в зависимости от нагрузки на очистной забой, представленной в разделе 5.2, то получим, что увеличение производительности очистных работ от величины 12,2 до 13,3 тыс. т/сут приводит к снижению себестоимости добычи угля примерно на 55,1 руб./т. Из этого следует, что дополнительные технические мероприятия на интенсификацию дегазации, приводящие к указанному росту нагрузки, не должны превышать суммарные затраты более чем 730 тыс. руб в месяц. Другими словами, при меньших месячных затратах мероприятия имеют технико-экономическую перспективу.

5.3 Выводы

5.3.1 Усовершенствована методика расчета допустимой нагрузки на очистной забой, разработанная специалистами НИТУ "МИСиС" (горный институт) и ОАО "СУЭК-Кузбасс", новизной которой является учет выделения из очистного забоя и отбитого комбайном угля.

5.3.2 Показано, что в дополнение к имеющейся геологической информации в качестве исходных данных для расчета текущих нагрузок на очистной забой следует использовать:

- значения пластового давления метана, определённые в пластовых дегазационных скважинах выемочного столба;
- значения проницаемости угольного пласта в очистном забое, вычисленные по результатам газовой съёмки в ремонтную смену;
- константы сорбции Ленгмюра, определённые в лабораторных условиях.

5.3.3 Вычисления допустимых нагрузок на очистной забой базируются на использовании фундаментальных дифференциальных уравнениях массопереноса метана, решаемых методом конечных элементов современными средствами компьютерного моделирования.

5.3.4 Разработанная методика расчета нагрузок на очистной забой предназначена для использования в техническом отделе шахты для текущего и долговременного планирования очистных работ с допустимыми по газу условиями безопасности.

5.3.5 Разработана методика оценки шахтной себестоимости угля в зависимости от нагрузки на очистной забой, учитывавшая экономические показатели с учетом ставки дисконтирования. В основе расчетов лежит метод корреляции на базе значений себестоимости угля в различные месяцы. Методика позволяет оценить экономическую отдачу от мероприятий по повышению производительности очистных работ.

5.3.6 Установлено, интенсификации дегазационных работ методом пневматического воздействия имеет экономическую перспективу, обусловленную повышением нагрузок на очистной забой при соответствующих дополнительных материальных затратах, зависящих от достигаемого дебита метана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержатся научно-обоснованные технические и технологические решения в области повышения безопасности разработки угольных пластов на основе разработанного метода интенсификации газовыделения из пластовых скважин и совершенствования метода прогноза газообильности очистного забоя для обоснования допустимых нагрузок на очистной забой по газовому фактору с учетом гранулометрического состава отбитого угля, параметров сорбции, газопроницаемости угля в очистном забое и распределения пластового давления метана по глубине очистного забоя во время отбойки, внедрение которых вносит существенный вклад в развитие угледобывающей отрасли РФ.

Основные научные выводы и результаты работ, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Разработан метод интенсификации дегазации угольного пласта через скважины, обеспечивающий повышение газопроницаемости пласта за счет сорбционных деформаций угля в результате существенного повышения давления метана в скважине вплоть до пластового при перекрытии устья с дальнейшим свободным истечением.
2. Разработан метод интенсификации дегазации низкопроницаемых угольных пластов, предусматривающий последовательно: нагнетание в скважину воздуха под давлением 5 – 10 бар в течение 20 – 30 мин, сброс газа, закрытие устья скважины на время 1 – 3 суток и съем метана в шахтный газопровод.
3. Обоснован метод расчета притоков метана в исходящую струю лавы, учитывающий гранулометрический состав отбитого угля, параметры сорбции Ленгмюра и распределение пластового давления угольного метана по глубине очистного забоя в момент отбойки.
4. Разработана методика расчёта притоков метана из очистного забоя, включающая аналитические решения следующих задач: массопереноса

метана с учетом сорбционных свойства угля, определяемых в лабораторных условиях; пластового давления метана – по результатам шахтных измерений в дегазационных скважинах; газопроницаемости угля в очистном забое – по результатам газовоздушной съемки в лаве в ремонтную смену.

5. Разработана методика определения распределения пластового давления метана между откаточной и вентиляционной выработками, учитывающая дегазацию угольного пласта этими выработками в течение всего срока отработки выемочного столба.

6. Усовершенствована методика расчета допустимой нагрузки на очистной забой, дополнительно учитывающая газопроницаемость угля, определяемую по результатам газовоздушной съемки лавы в ремонтную смену, гранулометрический состав отбитого угля, распределение пластового давления между откаточной и вентиляционной выработками. Методика имеет компьютерную реализацию и предназначена для оперативного планирования безопасных и высокопроизводительных очистных работ.

Список литературы

1. Агафонов А.В., Ильяшов М.А., Кочерга В.Н., Скипичка С.И., Круковская В.В. Новые закономерности метановыделения при интенсивной отработке пологих угольных пластов. Журнал "Записки горного института". Изд: Национальный минерально-сырьевой университет "Горный" (Санкт-Петербург). ISSN: 0135-3500. Том: 205 Год: 2013 С. 77-85.
2. Алексеев А. Д. Физика угля и горных процессов: монография; НАН Украины, Ин-т физики горных процессов. - К. : Наукова думка, 2010. - 422с.
3. Алексеев А.Д., Василенко Т.А., Гуменник К.В., Калугин Н.А. Диффузионно-фильтрационная модель выхода метана из угольного пласта. Журнал технической физики, 2007, 77. вып. 4. С. 65-74.
4. Антощенко Н.И. Физико-математическая модель динамики метановыделения из подрабатываемых угольных пластов/Н. И. Антощенко, С. И. Кулакова // Горный журнал. –М.: Издательский дом "Руда и металлы", 2012.-№ 8. - С. 89-93.
5. Артемьев В.Б., Коршунов Г.И., Логинов А.К., Ютяев Е.П., Шик В.М. Охрана подготовительных выработок целиками на угольных шахтах: Монография // СПб.: Наука, 2009. 231 с.
6. Айруни А.Т., Кузнецов Г.И., Слепцов Е.И. Способы и средства дегазации угольных пластов в практике наиболее развитых стран мира. - М.: ВИНТИ, т. 36. 1985. -219 с.
7. Айруни А.Т., Галазов Р.А., Сергеев И.В. и др. Комплексное освоение газоносных угольных месторождений. - М.: Недра, 1990.– 216 с.
8. Айруни А.Т., Бобин В.А., Зверев И.В. и др. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах., М., Наука, 1987, 342с.
9. Афанасьев В.Я., Линник В.Ю. Методологические основы прогнозирования подземной разработки угольных месторождений с

- учетом показателей сырьевой базы. Монография. Государственный университет управления. – М.: ГУУ, 2012. –347 с.
- 10.Баклашов И.В. Геомеханика: Учебник для вузов. Том 1. Основы геомеханики. М.: МГГУ, 2004. —208 с.
- 11.Баклашов И.В., Картозия Б.А., Шашенко А.Н., Борисов В.Н. Геомеханика: Учебник для вузов. Том 2. Геомеханические процессы. М.: МГГУ, 2004. — 49 с:
12. Баренблatt Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкости и газа в природных пластах. – М.: Недра, 1984. –211с.
- 13.Бобин В.А. Научные аспекты метода виброволнового воздействия, интенсифицирующего добычу шахтного метана. Доклады Второй международной конференции "Сокращение эмиссии метана". Новосибирск, 2000, стр. 462-465.
- 14.Бобин В.А. Сорбционные процессы в природном угле и его структура. — М.: ИПКОН АН СССР, 1987. 135 с.
- 15.Большинский М.И. , Лысиков Л.А. , Каплюхин А.А. Газодинамические явления в шахтах. Монография. Севастополь: "Вебер", 2003. 284 с.
- 16.Борщевич А. М., Ковалев Р. А., Бухтияров А. Ф., Сарычева И. В. Ограничение нагрузки на очистной забой по газовому фактору // Известия ТулГУ. Естественные науки. 2010. №1. С.232-239.
- 17.Бронштейн И.Н. Семенджиев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – 13-е изд., испр.- М.: Наука. Гл.ред. физ-мат. Лит., 1986. -544 с.
- 18.Бурчаков А.С., Жежелевский Ю.А., Ярунин С.А. Технология и механизация подземной разработки пластовых месторождений: Учебник для вузов.-М.: Недра, 1989.-431с.
- 19.Васенин И.М., Крайнов А.Ю., Пичугин В.А. , Черепов А. А. Математическое моделирование фильтрации метана в окрестности дегазационной скважины//Известия высших учебных заведений. Физика.- Томск.:изд. Федеральное государственное бюджетное образовательное

- учреждение высшего профессионального образования Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2012.- Том: 55.- № 9-3.- С. 27-29.
20. Васючков Ю.Ф. Горное дело: Учеб. Для техникумов – М.: Недра. – 190.- 512 с.
21. Волков М. А. Обоснование выбора технологии дегазации выемочных участков при высокопроизводительной отработке газоносных угольных пластов на основе учета ограничений нагрузки по газовому фактору: автореферат дис. ... кандидата технических наук: по спец. 05.26.03 - «Пожарная и промышленная безопасность» (в горной промышленности). Москва, МГГУ, 2012, 22 с.
22. Галазов Р.А., Айруни А.Т., Сергеев И.В. и др. Газообильность каменноугольных шахт СССР. Эффективные способы искусственной дегазации угольных пластов на больших глубинах. – М.: Наука, 1987. – 198с.
23. Гринько Н.К., Гапанович Л.Н., Батурина О.Б. Обеспечение нагрузки на очистной забой 2-3 млн. т угля в год на шахтах России // Уголь. — 1998. №5. С. 15-18.
24. Гришин В.Ю., Мазаник Е.В., Шевченко Л.А. Новые технологии дегазации шахт Кузбасса // Безопасность жизнедеятельности. 2014. № 3. С. 19-22.
25. Гурьянов В.В., Труфанов В.Н., Матвиенко Н.Г., Бобин В.А. Формы нахождения метана в углях и геотехнологические методы дегазации угольных пластов. Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ. 2000. 64 с.
26. Груздев В.А., Никишев Д.Б. Совершенствование технологии отработки высокогазоносных угольных пластов. Горный информационно-аналитический бюллетень. • М.: МГГУ, 2002, № 11.-С. 158-161.
27. Дрижд Н. А., Шарипов Н. Х., Ли К. Д., Шмидт И. М. Обоснование возможности извлечения метана из неразгруженных угольных пластов// Наука и техника в газовой промышленности.- М.: Газпром-промгаз, 2014.- №: 1 (57).- С. 57-63.

- 28.Дмитриев А.М., Куликова Н.Н., Бодня Г.В. Проблемы газоносности угольных месторождений. – М.: Недра, 1982. –263с.
- 29.Ермолаев А.М., П. В. Егоров, А. А. Ермолаев. Определение предельной нагрузки на очистной забой по газовому фактору в сверхкатегорных шахтах. "Уголь", 2006, №11
<http://www.ukkbel.ru/learning/index.php?article=1850>
30. Еременко В.А., Разумов Е.А., Заятдинов Д.Ф. Современные технологии анкерного крепления. Материалы Международной молодежной конференции «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых». 19-23 ноября 2012 г. — Т 2. – Москва: ИПКОН РАН, 2012. – С. 520-523.
- 31.Забурдяев В.С. О необходимости разработки высокоэффективных способов и средств воздействия на массив угля через подземные скважины с целью снижения взрывов газа и пыли // Горный информационно-аналитический бюллетень. МГГУ. - 2004. - С. 140-143.
- 32.Забурдяев В.С. Дегазация разрабатываемого пласта – эффективный способ повышения производительности и безопасности работ в метанообильных шахтах. М., ГИАБ,1999г. №1, с.149-150.
- 33.Забурдяев В.С., Новикова И.А., Семыкин Ю.А. Эффективность дегазации сближенных угольных пластов вертикальными скважинами при высоких скоростях подвигания лав. Журнал "Безопасность труда в промышленности". 2011, №12. с. 52-53.
- 34.Забурдяев В.С., Новикова И.А., Семыкин Ю.А., Сметанин В.С. Структура газового баланса метанообильных шахт. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).// Отдельный выпуск №8 «Экология, безопасность». — М.: МГГУ, 2011, с.369-375.
- 35.Забурдяев В.С. / Управление метановыделением на выемочном участке при камерно-столбовой системе разработки угольного пласта // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № S1. С. 321-331.
- 36.Забурдяев В.С., Новикова И.А., Семыкин Ю.А. Метановыделение и

- дегазация пласта 52 на шахте «Котинская» (ОАО «СУЭК-Кузбасс») Журнал "Безопасность труда в промышленности". 2012, №2, с. 6-7.
37. Забурдяев В.С. Особенности разгрузки и дегазации сближенных угольных пластов / Безопасность труда в промышленности.-М.: Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности. 2013.- № 11.- С. 45-48.
38. Иванов Б.М., Малинникова О.Н., Индыло С.В. и др. Анализ причин аварий, вызванных газодинамическими явлениями в угольных шахтах. М. МГГУ «Неделя горняка-2006» «Безопасность». С.123-146.
39. Иванов Ю.М., Коршунов Г.И., Гридина Е.Б., Пасынков А.В. Повышение безопасности – залог успешности компаний// ГИАБ. 2011, № 7. С. 193 - 199.
40. Иванов Ю.М. Дегазация угольных пластов при высоких нагрузках на очистной забой на шахтах ОАО «СУЭК-Кузбасс»/Сб. трудов III Международной научно-практической конференции «Перспектива развития Прокопьевско-Киселевского угольного района как составная часть комплексного инновационного плана моногородов». – Прокопьевск: Изд-во филиала ГУ КузГТУ в г. Прокопьевске, 2011. С. 83-85.
41. Иванов Ю.М. Управление газодинамическим состоянием массива горных пород для безопасной ресурсосберегающей подземной разработки газоносных угольных пластов : автореферат дис. ... кандидата технических наук. по спец. 05.26.03 - «Пожарная и промышленная безопасность» (в горной промышленности). Москва, МГГУ, 2012, 21 с.
42. Инструкция по расчету количества воздуха, необходимого для проветривания действующих угольных шахт. М., «Недра», 1975, 80 с.
43. Ильинов М.Д. Лабораторные исследования прочностных и фильтрационно-емкостных параметров углей при сложном напряженном состоянии применительно к проблеме предварительной дегазации угольных пластов / М.Д. Ильинов, А.Т. Карманский, В.А. Коршунов, И.Н.

Гизатулина // Газовая промышленность.-М.: ООО "Газоил пресс", 2012.- №S672 (672).-С. 68-71.

- 44.Иофис М.А. Научные основы управления деформационными и дегазационными процессами при разработке полезных ископаемых – М.: ИПКОН АН СССР, 1984. – 230 с.
- 45.Каледина Н.О., Кобылкин С.С. Моделирование процессов вентиляции шахт для обеспечения метанобезопасности горных работ // Горн. журн. - 2011. - №7. - С.101-103.
- 46.Каледина Н.О., Мещеряков Д.А. Аэрологическая безопасность угольных шахт // ГИАБ. - 2011. - Отд. вып. - С.227-237.
- 47.Каледина Н.О. Качурин А.Н. , Сарычева И.В. Теоретическое обоснование модели метановыделения в подготовительный забой из отбитого угля //Известия ТулГУ. Науки о земле. 2011 год, Вып. 1. С.124-129.
- 48.Каркашадзе Г.Г. , Ермак Г.П., Ютяев Е.П. Безопасная отработка газоносных угольных пластов по газовому фактору на основе учета свойств углепородного массива и параметров системы разработки/ Г.Г. Каркашадзе, //Горный информационно-аналитический бюллетень. Издательство «Горная книга». № 5, 2014. С. 152-156.
- 49.Каркашадзе Г.Г., Иванов Ю.М., Шмат В.Н. Анализ процесса гидравлической обработки низко проницаемого угольного пласта с применением насосов высокого давления. — Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). / Отдельный выпуск №8 «Экология, безопасность». — М.: МГГУ, 2011. — С.154-158.
- 50.Каркашадзе Г.Г., Иванов Ю.М. Ермак Г.П. Моделирование напряженного состояния массива при посадке основной кровли газоносных угольных пластов. - Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). / Отдельный выпуск №8 «Экология, безопасность». — М.: МГГУ, 2011. — С.159-168.
- 51.Каркашадзе Г.Г., Шмат В.Н., Волков М.А. Методика определения пластового давления, проницаемости и сорбционных свойств угольного

- пласта по результатам шахтных измерений. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). / Отдельный выпуск №8 «Экология, безопасность». — М.: МГГУ, 2011. С.195-203.
- 52..Каркашадзе Г.Г., Мазаник Е.В., Семыкин Ю.А. Притоки метана в исходящую из лавы струю с учетом гранулометрического состава отбитого угля/ Сб. трудов XV международной научно-практической конференции «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности». Кемерово, 2013. С. 298-302.
- 53.Каркашадзе Г.Г., Алексеев А.Д., Стариков Г.П., Васильковский В.А., Спожакин А.И. Совершенствование методики расчета нагрузки на очистной забой с учетом пластового давления метана в угольном пласте». Горный журнал, №4, 2009 г. С.47-50.
- 54.Каркашадзе Г.Г., Иванов Ю.М., Ермак Г.П. Определение концентрации метана в выработанном пространстве по результатам съемки параметров вентиляционного потока вдоль лавы// Горный информационно-аналитический бюллетень.- 2012.- № 4. Депон. рук. Депозитарий изд-ва «Горная книга». Спр. № 880/04-12 от 23 января 2012 г. (12 стр.).
- 55.Каркашадзе Г.Г., Мазаник Е.В., Семыкин Ю.А. Методика расчёта притоков метана из отбитого угля в лаве в процессе очистных работ. №7, 2014. С.18-22.
- 56.Каркашадзе Г. Г., Мазаник Е. В., Семыкин Ю. А. Совершенствование расчета нагрузки на очистной забой по газовому фактору на основе производственных испытаний и средств компьютерного моделирования. Сб. научн. трудов. Выпуск 2. «Пути повышения эффективного и безопасного освоения пластовых месторождений подземным способом». Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр» (Библиотека горного инженера), 2014, с. 308-314.
- 57.Каркашадзе Г.Г., Семыкин Ю.А., Лупий М.Г. Методика расчета притоков метана из очистного забоя по результатам газовой съемки в ремонтную смену// ISSN 0236-1493//Горный информационно-аналитический

бюллетень. - №7. – 2014.-С. 206-211.

58. Каркашадзе Г.Г., Хаутиев А.М-Б., Поляков В.В.. Метод измерения дебита метана из пластовых скважин выемочного столба// Сборник научных трудов. Выпуск 2 «Пути повышения эффективного и безопасного освоения пластовых месторождений полезных ископаемых подземным способом» / Сост. А.В. Фомин.-М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2014.- С.283-286.
59. Каркашадзе Г.Г., Хаутиев А. М-Б. Механизм повышения газопроницаемости угольного пласта в процессе циклической сорбционной усадки и разбухания угля// Горный информационно-аналитический бюллетень. -М.: Горная книга, 2015. - № 5. - С.
60. Качурин Н.М/, Воробьев С.А., Качурин А.Н., Сарычева И.В. Математические модели метановыделения в подготовительные и очистные забои из отбитого угля/ // Изв.ТулГУ. Технические науки.- Тула.: 2014.- № 1. - С. 158-164.
61. Качурин Н.М., Борщевич А.М., Бухтияров А.А. Теоретическое обоснование ограничения нагрузки на очистной забой по газовому фактору// Изв ТулГУ. Науки о Земле. 2009. Вып. 4. С. 84-88.
62. Качурин Н.М., Борщевич А.М., Бухтияров А.А. Предельно допустимая нагрузка на очистной забой по газовому фактору//3-я Международная конференция по проблемам рационального природопользования. «Проблемы создания экологически рациональных и ресурсосберегающих технологий добычи полезных ископаемых и переработки отходов горного производства». Тула. 2010. С. 188 – 193.
63. Качурин Н.М., Борщевич А.М., Бухтияров А.А. Газовыделения с поверхности обнажения разрабатываемого угольного пласта на метанообильных шахтах// 3-я Международная конференция по проблемам рационального природопользования. «Проблемы создания экологически рациональных и ресурсосберегающих технологий добычи полезных ископаемых и переработки отходов горного производства». Тула. 2010. С.

- 64.Килимник В.Г., Якубсон Г.Г., Ефимова Н.В., ФГУП ЦНИЭИуголь. Угольная отрасль России в начале XXI века. Научно-технический журнал «Горная промышленность». <http://www.mining-media.ru/arhiv/2008/4/18>
- 65.Ковалев В.А., Козырева Е.Н. Шевченко Л.А. Анализ газовых балансов выемочных участков шахт // Отрасль знаний: Экология и охрана труда: Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2012. № 4 (92). С. 61-63.
- 66.Козырева Е.Н., Шинкевич М.В. Уточнение технологических решений при проектировании выемочных участков и управлении газовыделением Вестник КузГТУ: 2014, № 3, С. 28-32.
- 67.Кожуховский И.С. Системные преобразования в угольной промышленности: сущность и предпосылки государственного регулирования.//Актуальные проблемы государственного и регионального развития. -М.: Эдиториал УРСС, 1999.-е. 105-125.
- 68.Кожуховский И.С. Реструктуризация угольной промышленности. Журнал «Вопросы экономики» М.:2000.№1.-с. 147-155.
- 69.Колесниченко И.Е. Основы интенсивной и безопасной разработки метаноносных пластов угля. Журнал "Горная Промышленность" №3 2003.
- 70.Коликов К.С., Кашапов К.С., Иванов Ю.М. Опыт заблаговременного извлечения метана из угольных пластов Карагандинского бассейна// Технологии нефти и газа. 2011, №1. С. 37-41.
- 71.Костеренко В.Н., Смирнов О.В. О количественной оценке нормируемых параметров дегазации угольных шахт. ГИАБ. №6. 2011 С. 378-389
- 72.Концепция обеспечения метанобезопасности угольных шахт России на 2006-2010 г.г. (Пучков Л.А., Сластунов С.В., Каледина Н.О. и др.). М.: Изд-во МГГУ, 2006.
- 73.Коровкин Ю.А. , Савченко П.В. , Саламатин А.Г. , Постников В.И . Теория и практика длиннолавных систем. Под ред. Е.Я. Диколенко - М.. "Техгормаш", 2004.-600с.

74. Коршунов Г.И., Ютяев Е.П., Серегин А.С., Афанасьев П.И., Курта Н.В. Заблаговременная дегазация угольных пластов с использованием импульсного гидродинамического воздействия в режиме гидрорасчленения // Горный информационно-аналитический бюллетень.–М.:Горная книга, 2013.- №2. - С. 225-231.
75. Лейсле А.В. Анализ опыта дегазации выемочных участков, отрабатывающих высокогазоносные пласты Кузнецкого бассейна.// Вестник ПНИПУ - Геология. Нефтегазовое дело.- Пермь.: ПНИПУ, 2012.- №2.- С. 115-120.
76. Линник В.Ю. Формирование баз данных для прогнозирования развития сырьевой базы угольной промышленности. Монография. Государственный университет управления. – М.: ГУУ, 2011. – 103 с. (6,5 п.л.)
77. Линник Ю.Н. Мерзляков В.Г., Линник В.Ю. Прогнозная оценка условий безопасности ведения горных работ на шахтах в период до 2030 года. // Маркшейдерский вестник, – М.: ФГУП «Гипроцветмет», 2010. - № 4. С. 38-44. (6/4,5 с.)
78. Линник В.Ю. Сравнительный анализ технического уровня и эффективности применения очистного оборудования угольных шахт. В журнле: Горное оборудование и электромеханика. – М.: Новые технологии, 2012. № 1. С.2-8.
79. Лупий М.Г. Обоснование технологии комплексной дегазации выемочных участков при высокоинтенсивной разработке газоносных угольных пластов. Автореферат дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук по спец. 05.26.03 - «Пожарная и промышленная безопасность» (в горной промышленности). Москва, МГГУ, 2010, 21 с.
80. Мазаник Е.В. Совершенствование технологии дегазации угольных шахт на основе заблаговременной поэтапной скважинной подготовки шахтных полей Автореферат дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук по

- спец. 05.26.03 - «Пожарная и промышленная безопасность» (в горной промышленности). Москва, МГГУ, 2010, 21 с.
- 81.Малышев Ю.Н., Трубецкой К.Н., Айруни А.Т. Фундаментально-прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов. - М.: Изд-во АГН, 2000. -519с.
- 82.Мелехин Е.С., Кошелец А.В. Добыча метана из угольных пластов как основа повышения безопасности и эффективности добычи угля.// Минеральные ресурсы России. Экономика и управление: 2012. - №2. - С. 51-55.
- 83.Малинникова О.Н., Ерусланов А.П., Прохватилов С.А. Газообильность выработанного пространства выемочного участка при наличии тектонических разломов // Безопасность труда в промышленности.-М.: Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности, 2014.-№ 5.-С. 46-48.
- 84.Мясников А.А., Садохин В.П., Жирнова Т.С. Применение ЭВМ для решения задач управления метановыделением в шахтах. М.. «Недра», 1977. 248с.
- 85.Научное обоснование исходных данных и разработка рекомендаций по дегазации выемочных участков блока № 3 на поле шахты им. С.М. Кирова. -ИПКОН РАН. М., 2005. - 82 с.
- 86.Ножкин Н.В. Заблаговременная дегазация угольных месторождений. М.: Недра. 1979. 271с.
- 87.Оганов С.А., Костеренко В.Н., Садов А.П., Байсаров Э.Э. Строительство горизонтальных скважин с дневной поверхности для дегазации угольных шахт с целью предупреждения внезапных выбросов метана и обеспечения эффективного управления газовыделением на выемочных участках, а также для решения задач защиты горных выработок от водопритоков// Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса.- М.: Всероссийский научно-исследовательский институт организации,

управления и экономики нефтегазовой промышленности, 2014. - № 1. - С. 36-41.

- 88.Петухов И.М. И.М. Батутина. Геодинамика недр./ – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Недра коммюникешнс ЛТД, 1999.-256 с.
- 89.Пичугин В.А., Васенин И.М., Крайнов А.Ю. Моделирование предварительной дегазации угольных пластов // Известия высших учебных заведений. Физика.- Томск: ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2013.- Том: 56 №: 6-3.- С. 155-157.
- 90.Поздеев И.А. Анализ газодинамических процессов и методов управления ими в зоне влияния очистных работ / Вестник Сибирского государственного индустриального университета.: 2013.-№ 4 (6).- С. 25-29.
- 91.Полевщиков Г.Я. Программа инноваций по управлению газодинамикой высокотехнологичных подземных горных работ / Полевщиков Г.Я., Рябков Н.Я., Ютяев Е.П. // Сб. научных трудов. Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня. № ОВ7С. М.: «Мир горной книги», 2008. С. 150-157.
- 92.Полубаринова-Кочина П.Я. О неустановившейся фильтрации газа в угольном пласте. Прикладная математика и механика. Том XVII, 1953. Институт механики Академии наук союза ССР. С 735-738.
93. Презент Г.М., Баймухаметов С.К., Швец И. А., Сластунов С.В., Коликов К.С. Заблаговременная дегазация шахтных полей и добыча угольного метана через скважины с поверхности // Уголь, 1997. №10, С.41-44.
- 94.Проблемы разработки угольных пластов, извлечение и использование шахтного метана в Печорском бассейне/И. В. Сергеев, В.С. Забурдяев, А.Д. Рубан, Е.Я. Диколенко и др.-М.: ННУГП-ИГД им. А.А. Скочинского 2002.- 350 с.

- 95.Проблемы разработки метаноносных пластов в Кузнецком угольном бассейне/Ю.Н. Малышев, Ю.Л. Худин, М.П. Валильчук и др.- М.: Издательство Академии горных наук 1997.- 453 с.:
- 96.Пучков Л.А., Сластунов С.В., Коликов К.С. Извлечение метана из угольных пластов. М., изд-во МГГУ, 2002, 383с.
- 97.Пучков Л.А., Сластунов С.В. «Системный подход к решению проблемы угольного метана» // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: Труды VII международной научно-практической конференции – Кемерово: ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского, ИУУ СО РАН, КузГТУ, ЗАО КВК «ЭкспоСибирь», 2005. – С. 8-15.
- 98.Пучков Л.А., Сластунов С.В., Логинов А.К., Ютяев Е.П. Принципиальные технологические решения для промышленной апробации технологии заблаговременной дегазационной подготовки высокогазоносных угольных пластов в Кузбассе / // Наука и техника в газовой промышленности. 2009 №3. С.58-62.
- 99.Пучков Л.А., Сластунов С.В. Проблемы угольного метана – мировой и отечественный опыт их решения, Изд. МГГУ. ГИАБ. 2007. с. 5-25.
100. Ржевский В.В. , Новик Г.Я. Основы физики горных пород. Изд. 3-е. перераб. И доп. М., «Недра». 1978. 390с.
101. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. Макеевка; Донбасс: МакНИИ, 1989. 319 с.
102. РД 05-328-99. Инструкция по безопасному ведению горных работ на шахтах, разрабатывающих угольные пласты, склонные к горным ударам - Сер. 05. -Вып. 2. -М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2013. - С. 120-303 с.
103. Рубан А.Д. Проблема шахтного метана в России. Уголь. 2012, № 1, С.23-27.
104. Рубан А.Д., Шатиров С.В., Гринин И.В. Газо-угольная стратегия в топливообеспечении России. М.: ННЦ ГП - ИГД им. А.А. Скочинского, 2000. -101 с.

105. Семыкин Ю.А. Опыт ведения работы высокопроизводительной лавы №808 шахты. ISBN: 0236-1493//Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск № 2. Сборник научно-технических работ горных инженеров СУЭК. – 2013. - С.296-299.
106. Сергеев И. В., Забурдяев В. С. Эффективность дегазации на участках с высокой нагрузкой на лаву. — М.: ЦНИЭуголь, 1978г., 43 с.
107. Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г.. Коликов К.С. Обоснование допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору. Москва, Труды научного симпозиума «Неделя горняка-2009», ИД ООО «Роликс», 2009г., с.151-159.
108. Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Коликов К.С., Ермак Г.П. Аналитическая методика расчета допустимой нагрузки на очистной угольный забой по газовому фактору. Журнал Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. № 6. 2013. С.53-59
109. Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Мазаник Е. В. // Методика и результаты измерения пластового давления метана и сорбционных свойств угольного пласта. Газовая промышленность. - 2012. - спец. вып.. - С. 48-49
110. Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Иванов Ю.М., Шмат В.Н. Разработка технологических рекомендаций по предварительной дегазации пласта «Болдыревский» из подготовительных выработок на поле шахты им. Кирова ОАО «СУЭК-Кузбасс»// ГИАБ, 2011, ОВ «Экология, метанобезопасность», с. 22-30.
111. Сластунов С.В. Заблаговременная дегазация и добыча метана из угольных месторождений. М. :Изд-во МГГУ. 1995. 441с.
112. Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Ютяев Е.П. Оценка потенциального уровня извлекаемости метана из угольных пластов. Горный информационно-аналитический бюллетень.-2009. №ОВ-11 “Метан.- С.27-36.

113. Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Лупий Г.М. Влияние газоносности, горного давления и пластового давления метана на выбросопасность угольного пласта. Горный информационно-аналитический бюллетень.- 2009. №OB-11 “Метан”. -С. 37-44.
114. Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Коликов К.С. Современные проблемы метанобезопасности при высокопроизводительной отработке угля. ГИАБ, Труды научного симпозиума Неделя Горняка – 2011, отдельный выпуск 1, 2011. С. 202-210.
115. Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Ютяев Е.П., Семыкин Ю.А. Методика расчета допустимой нагрузки на очистной забой по результатам газовой съемки в ремонтную смену с учетом физических свойств пласта и технологических параметров системы разработки/ Сб. трудов XV международной научно-практической конференции «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности». Кемерово, 2013. С. 318-321.
116. Сластунов С.В, Ермак Г.П. Обоснование выбора и эффективная реализация способов дегазации при интенсивной отработке газоносных угольных пластов – ключевой вопрос обеспечения метанобезопасности угольных шахт. // Уголь.- М.: 2013.-№1. С. 21-24.
117. Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Коликов К.С., Ермак Г.П. Методика расчета допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору. Сборник научных трудов «Современные проблемы шахтного метана» (к 85-летию проф. Н.В. Ножкина) // -М.: ИД ООО Роликс, 2014 г., С.15-25.
118. Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г., Ермак Г.П., Ютяев Е.П. Предварительный и оперативный прогноз допустимых нагрузок на очистной забой при интенсивной отработке газоносных угольных пластов. Журнал "Уголь", 2015 г. №3. С. 30-35
119. Стариakov Г.П., Мамлеев Ш.В. Кинетика массопереноса метана при очистной выемке угольных пластов/ Наукові праці УкрНДМІ НАН України - № 10. – 2012. – С. 271-278.

120. Тайлаков, О.В. Кормин А.Н, Смыслов А.И. Совершенствование метода определения газоносности угля для повышения эффективности дегазации угольных пластов / Газовая промышленность.- М.: ООО "Газоил пресс", 2012. -№: 11 (682).-С. 46-47.
121. Таразанов И. Г. Итоги работы угольной промышленности России за 2012 год. Журнал "Уголь", 2013г. №3.
122. Трубецкой К.Н., Рубан А.Д, Забурдяев В.С. Особенности метановыделения в высокопроизводительных угольных шахтах. Журнал «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых». Изд. СО РАН. 2011г. № 4. С. 76-85
123. Трубецкой К.Н., Гурьянов В.В. О возможности повышения газоотдачи угольных пластов на основе управления геомеханическим состоянием углевмещающей толщи // Уголь. 2006. - № 2. - С. 64-66.
124. Устинов, Н.И. и др. Газообильность и нагрузка очистных забоев при высокопроизводительной выемке газоносных угольных пластов Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень. МГГУ. 2001. -№ 5. - С. 49-54.
125. Устинов Н.И., Забурдяев Г.С., Воронюк Ю.С. Система «уголь-метан»: особенности газоотдачи угольных пластов. // Сокращение эмиссии метана. Материал 2-й Международной конференции. Новосибирск: СО РАН. 2000. С. 465-471.
126. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Приказ от 1 декабря 2011 г. № 680 об утверждении инструкции по применению схем проветривания выемочных участков шахт с изолированным отводом метана из выработанного пространства с помощью газоотсасывающих установок. Зарегистрировано в Минюсте РФ 29 декабря 2011 г. № 22815. Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти, 2012, № 17.

127. Фейт Г.Н., Малинникова О.Н., Зыков В.С., Рудаков В.А. Прогноз опасности внезапных выбросов и горных ударов по энергии массива / Физико-техн.пробл. разработки полезн. ископаемых. 2002. -№ 1. - С.67-70.
128. Фельдман Э.П. Василенок Т.А., Калугина Н.А. Физическая кинетика системы угольный пласт – метан: массоперенос, предвыбросные явления// ФТИРПИ.: 2014.-№3.-С.46-65.
129. Черных В.А. Черных В.В. Учебное пособие: Физические основы неклассической теории фильтрации нефти и газа/ СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт, 2005.-58с.
130. Черняк И.Л., Ярунин С.А., Бурчаков А.С. Технология и механизация подземной добычи угля. Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности `Физические процессы горного производства`. М. Недра 1981г. 384 с
131. Шевченко, Л.А. Пути повышения эффективности дегазации угольных пластов Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень.- М.: Горная Книга, 2011.- Отдельный выпуск №7.
132. Шевченко Л.А. К вопросу об экспериментальном определении газодинамических характеристик угольных пластов // Сборник современные тенденции и инновации в науке и производстве Материалы IV международной научно-практической конференции. Кемерово, 2015.- С. 122-123.
133. Шевченко Л.А., Гришин В.Ю. О едином критерии эффективности дегазационных скважин // Сборник: Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах Материалы X Международная научно-практическая конференция. г. Кемерово, 2013. С. 107-110.
134. Шевченко Л.А., Ткаченко Д.А. Влияние длины дегазационных скважин на структуру их дебита // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2015. № 2 (108). С. 78-82.
135. Шмат В.Н. Совершенствование технологии пластовой дегазации

угольных пластов в условиях их интенсивной разработки. Автореферат дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук по спец. 05.26.03 - «Пожарная и промышленная безопасность» (в горной промышленности). Москва, МГГУ, 2012. 23с.

136. 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.:Сибирский государственный индустриальный университет, 2014. - № 16. -С. 16-23.
137. Шувалов Ю.В., Ютяев Ю.П. Работа высокопроизводительных очистных забоев на шахтах ОАО «СУЭК-Кузбасс» в современных условиях. Сб. трудов научно-практ. конф. «Освоение минеральных ресурсов Севера: проблемы и решения». Т.1. Воркута, 2009. С. 214-217.
138. Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф. Об измерении давления газа в угольных пластах. Академия наук СССР. Сибирское отделение. №3, 1988. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, Изд. «Наука». С.3-23.
139. Этингер И.Л. Напряжение набухания в системе «газ-уголь» как источник энергии в развитии внезапных выбросов угля и газа. Новосибирск. Изд. ФТПРПИ. 1987. № 2. с.79-90.
140. Эттингер И. Л. Природная равновесная система уголь—метан и методы ее изучения, — Успехи химии, 1965, т, 34, вып. 7, 1185—1198.
141. Эттингер И.Л. Растворимость и диффузия метана в угольных пластах // ФТПРПИ. 1987. - № 2. - С.79-90.
142. Эттингер И.Л. Физическая химия газоносного угольного пласта. М.: Наука, 1981.-104 с.
143. Ютяев Е.П. Влияние геомеханических процессов в массиве на выбор параметров технологических схем отработки пологих пластов Ленинск-Кузнецкого месторождения // «Записки Горного института». Т.185, 2010. С.50-55.
144. Сайт компании Austar Gas Pty Ltd (AG). <http://austargas.com.au/austar-gas.html>
145. Coal Mine Methane Global Overview/U.S. Environmental Protection Agency's Coalbed Methane Outreach Program. 2006, August.