

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

*На правах рукописи*

Гаращенко Жанна Максимовна

КРИТЕРИИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К  
УНИФИЦИРОВАННОМУ ВЫЕМОЧНОМУ МОДУЛЮ КОМПЛЕКСА С  
УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ УСЛОВИЙ ОТРАБОТКИ ЦЕЛИКОВ  
УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Габов В.В.  
доктор технических наук, профессор  
Иванов С.Л.

Санкт-Петербург - 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>ГЛАВА 1 АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОТРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ ЦЕЛИКОВ .....</b>	<b>10</b>
1.1 Уголь, откуда появляются целики потери .....	10
1.2 Целики угольных шахт и актуальность их отработки.....	13
1.2.1 Параметры целиков и их особенности.....	17
1.3 Условия, технологии и технические средства отработки угля из целиков.....	21
1.4 Способы отделение угля от угольного массива.....	29
1.5 Возможные риски, влияющие на отработку угольных целиков .....	35
1.6 Выводы по Главе 1 .....	37
<b>ГЛАВА 2 ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОТРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ ЦЕЛИКОВ .....</b>	<b>40</b>
2.1 Группирование целиков.....	40
2.2 Ключевые факторы и методологические подходы отработки угольных целиков .....	43
2.3 Структура технологического процесса отработки угольных целиков .....	44
2.3.1 Гидросистемы унифицированных выемочных модулей .....	48
2.3.2 Технические требования к УВМ.....	50
2.3.3 Обоснование структуры УВМ и параметров .....	52
2.3.4 Описание технологии перемещения комплекса в локальном забое .....	56
2.3.5 Осуществление вентиляции при отработке целиков.....	60
2.4 Требования к исполнительным органам в уступной технологии .....	63
2.4.1 Анализ процесса разрушения угля приложением статических и динамических нагрузок .....	67
2. 5 Ранжирование критериев отработки целиков .....	70

2.6 Выводы по Главе 2 .....	77
<b>ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ УГОЛЬНОГО МАССИВА СКОЛОМ ПРИ ПРИЛОЖЕНИИ СТАТИЧЕСКОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ .....</b>	<b>80</b>
3.1 План экспериментальных исследований .....	80
3.1.1 Экспериментальное оборудование и средства контроля для исследования процесса внедрения пик.....	80
3.1.2 Планирование эксперимента.....	81
3.2 Экспериментальные образцы для проведения экспериментов .....	83
3.3 Экспериментальные исследования приложения при статическом воздействии пики на образец .....	86
3.4 Выводы по Главе 3 .....	95
<b>ГЛАВА 4 ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО СПОСОБА ОТРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ ЦЕЛИКОВ ПРИГОДНЫХ К ИЗВЛЕЧЕНИЮ .....</b>	<b>97</b>
4.1 Конструкция унифицированного выемочного модуля .....	97
4.2 Основные технико-технические параметры УВМ.....	100
4.3 Технические характеристики УВМ.....	104
4.4 Выводы по Главе 4 .....	108
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>110</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>112</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А Акты внедрения .....</b>	<b>129</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патенты на полезные модели .....</b>	<b>132</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В Расчет гидравлики.....</b>	<b>134</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность темы исследования**

Системы разработки угольных пластов длинными столбами с оставлением между выемочными участками неизвлекаемых ленточных целиков являются самыми распространенными на шахтах России. При этом потери угля в таких целиках могут достигать до 20 % от общего объема запасов в выемочном столбе. Вместе с тем, выемка таких целиков, например, на шахтах «Галдинская-Западная-1», «Польсаевская» и других по тем или иным причинам затруднена или невозможна в связи с ухудшением эксплуатационного состояния выработок и охраняемых объектов. Однако в ряде случаев можно выделить оставленные запасы, отработка которых технически возможна. К ним относят целики, выполнившие свои основные и вспомогательные функции, а именно оставленные между участковыми подготовительными выработками. Такие целики не требуют проведения капитальных выработок для их отработки.

Следует отметить, что неотработанные вовремя целики и другие малые участки запасов при погашении выработок ведут к увеличению экономических и материальных потерь. При этом применение стандартного шахтного оборудования, предназначенного для выемки основных запасов, неэффективно для отработки целиков в связи со спецификой технологии выемки малых участков, где высок объем подготовительно-заключительных работ в цикле выемки и малая интенсивность.

Снизить эксплуатационные потери в целиках, оставляемых между выемочными столбами для охраны участковых подготовительных выработок, возможно применением унифицированных выемочных модулей, имеющих малый размер, технологичных в монтаже и демонтаже, осуществляющих отработку целика локальными забоями, что требует выработки критериев и технологических требований к подобного рода унифицированным выемочным модулям.

### **Степень разработанности темы исследования**

Вопросами разработки технических средств и особенностями отработки целиков занимались такие ученые, как: Аушев Е.В., Буялич Г.Д., Бокий Б.В.,

Бреннер В.А., Габов В.В., Гребёнкин С. С., Дудин А. А., Ермакова И.А., Ефремов И.А., Ефременков А.Б., Жараспаев М., Зубов В.П., Костенко В.К., Лысенко М.В., Оглоблин Д.Н., Пилюгин В.И., Прокопенко С.А., Семенцов В.В., Страданченко С.Г., Тихонов А.В, Хорешок А.А., Хорин В.Н., Ярошенко В.В., Kumar A., Kumar R. и другие исследователи. Ими были разработаны модели возможной отработки и доработки целиков с применением бурошнековой выемки, проходческих комбайнов, самоходных крепей, разработаны требования непосредственно к унифицированным выемочным модулям очистных забоев. Однако вопросам выработки критериев и на их основе параметров к унифицированным выемочным модулям комплексов, обеспечивающих снижение эксплуатационных потерь угля при системе разработки пологих угольных пластов длинными столбами, уделялось недостаточно внимания, что требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

**Объектом исследования** является процесс отработки локального забоя исполнительным органом унифицированного выемочного модуля.

**Предметом исследования** является конструкция унифицированного выемочного модуля в составе комплекса при отработке угольных целиков в границах полей действующих шахт.

**Цель исследования** – обоснование параметров унифицированных выемочных модулей, обеспечивающих снижение эксплуатационных потерь угля при системе разработки пологих угольных пластов длинными столбами.

**Идея исследования** – для уменьшения эксплуатационных потерь угля при системах разработки пологих угольных пластов длинными столбами отработку межстолбовых целиков необходимо производить с применением унифицированных выемочных модулей, расположенных на одной линии с забоем лавы.

Для достижения цели исследований необходимо решение следующих **задач**:

1. Провести анализ и обобщение экспериментальных и теоретических исследований по теме диссертации.

2. Обосновать выбор структуры и параметров унифицированных выемочных модулей в составе очистного механизированного комплекса для отработки угольных целиков, возможных к извлечению в границах полей действующих шахт.

3. Оценить потенциальные риски, связанные с функционированием комплекса, и выбрать основные критерии, характеризующие унифицированные выемочные модули в составе очистного механизированного комплекса отработки целиков.

4. Провести оценку энергоемкости процесса внедрения скальвающего инструмента типа «пика» в уголь.

#### **Научная новизна работы заключается:**

1. В обосновании подхода к избирательной технологии отработки ленточных целиков, применением унифицированных выемочных модулей и порядком отработки локального забоя при обеспечении критериев защищенности и энергетической эффективности.

2. В установлении взаимосвязи формы инструмента и совершаемой им работы разрушения при отработке целика унифицированными выемочными модулями.

#### **Соответствие паспорту специальности**

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности ВАК 2.8.8. Геотехнология, горные машины по пункту 14 «Критерии и технологические требования при создании новых и совершенствования применяемых горных машин с учетом особенностей условий их эксплуатации при разработке месторождений твердых полезных ископаемых» области исследования паспорта научной специальности.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Проведена систематизация и группировка целиков по их пригодности к извлечению, учитывающая их назначение, форму и геометрические параметры, расположение, возможность отработки.

2. Предложены структура процесса отработки целиков, пригодных к извлечению в пределах границ полей действующих шахт, и номенклатура параметров технических средств для осуществления этого процесса.

3. Установлено, что увеличение угла заострения инструмента типа «пика», вызванного его изнашиванием, способствует кратному повышению затрат энергии в 5 раз на внедрение инструмента в угольный массив.

4. Разработаны новые научно обоснованные технические решения, защищенные патентами: секция механизированной крепи (патент № 211803 от 23.06.2022) и фронтальный очистной агрегат (патент № 214566 от 03.11.2022) для отработки участков в границах полей действующих шахт как по падению, так и по восстанию.

5. Результаты диссертационной работы планируются к использованию ООО «СПб-Гипрошахт» в проекте «Отработка запасов шахты Воргашорская с прирезкой блока 43-ю» (акт внедрения от 28.11.2024), в деятельности предприятия ООО «Городской институт проектирования металлургических заводов» в качестве вспомогательного оборудования и средств механизации трудоемких работ, а также планируются к использованию в виде технических предложений (акт внедрения от 26.01.2025) и в деятельности предприятия «ЕвроХим-Усольский калийный комбинат» на ряде участков Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей при механизации трудоемких работ при выемке сильвинита (акт внедрения от 28.11.2024), (Приложение А).

**Методология и методы исследования.** В работе применялся комплексный метод исследования, включающий как теоретические, так и экспериментальные исследования, обобщение результатов исследований по проблемам технологии подземной разработки угольных месторождений; обобщение опыта использования очистного оборудования, а также результатов ранее выполненных исследований разрушения горных пород статическим, динамическим воздействием; обработку экспериментальных данных; сопоставление расчетных и экспериментальных данных для реализации технических решений отработки целиков в угольных шахтах.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Отработка ленточных целиков унифицированными выемочными модулями со стопорными устройствами обеспечивается выемкой угля параллельными полосами по ширине локального забоя, равными шагу расстановки

унифицированных выемочных модулей, с формированием уступной формы обрабатываемого забоя с количеством уступов 3 или более в зависимости от мощности пласта.

2. Основным критерием при создании унифицированного выемочного модуля комплекса отработки угольных целиков является энергетическая эффективность, определяемая отношением затрат энергии для отработки угольного забоя унифицированным выемочным модулем к работе штатной горной машины, затраченной на получение того же объема угля в подобных условиях эксплуатации.

3. Контроль гарантии защиты и надежности работы оборудования при отработке целиков с применением модуля реализуется на основе критерия защищенности, определяемого коэффициентами деформации кровли и прочности крепи, а так же коэффициентами относительной деформации сечения выработки и гарантированного отсутствия смещения модуля в период цикла отработки забоя, при этом каждый из этих коэффициентов должен быть меньше единицы.

**Степень достоверности результатов исследования** научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается применением современных апробированных методов исследований, включающих физическое моделирование процессов внедрения исполнительного органа унифицированного выемочного модуля в угольный массив; выполнением многокритериального анализа унифицированного выемочного модуля комплекса для отработки целиков; удовлетворительной сходимостью авторских данных и данных, полученных ранее по рассматриваемой тематике; применением сертифицированного оборудования при получении экспериментальных данных.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения и результаты работы докладывались на следующих конференциях: XXXI Международный научный симпозиум «Неделя горняка 2023» (Москва, 2023 г.); XXII Международная научно-техническая конференция «Чтения памяти В.Р. Кубачека. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» (г. Екатеринбург, 2024, 2025г.); II Международная научно-практическая конференция «Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородных ресурсов» (Санкт-Петербургский горный университет, «Химпром», 2023г.); 83 международная научно-

техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2025 г.).

**Личный вклад автора** заключается в участии на всех этапах процесса написания диссертационной работы, в постановке цели и задач исследования; разработке программы и методики лабораторных испытаний; разработке экспериментального стенда для определения процесса разрушения по характеру и диапазону затрачиваемых усилий; в разработке схемных и технических решений состава очистного механизированного комплекса с унифицированными выемочными модулями для отработки целиков, возможных к извлечению; обработке и интерпретации экспериментальных данных; подготовке публикаций по результатам работы.

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 7 печатных работах (пункт из списка литературы № 15, 18, 19, 20, 21, 22, 36) в том числе в 3 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 2 патента (Приложение Б).

**Структура работы.** Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 124 наименований, и 3 приложения. Диссертация изложена на 137 страницах машинописного текста, содержит 35 рисунков и 14 таблиц.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую и искреннюю признательность первому научному руководителю д.т.н., профессору кафедры машиностроения Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II **Габову В.В.** за научное руководство и доброе отношение при работе над диссертацией.

# ГЛАВА 1 АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОТРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ ЦЕЛИКОВ

## 1.1 Уголь, откуда появляются целики потери

Полнота выемки запасов угольных шахт при ведении горных работ обеспечивается только основными запасами с редким исключением, в связи с быстрым ухудшением состояния выработок. Для этого необходимо обеспечить полную или частичную выемку целиков согласованно с основной отработкой, при минимальных затратах и наличии действующих общешахтных систем. Однако в настоящее время, нет заинтересованности в отработке ленточных целиков, требующих больших экономических затрат, а в ряде стран добыча угля прекращается вовсе.

Так, в западной Европе, в частности, в Англии [63] и во Франции прекратили добычу угля [64], из-за больших затрат на добычу. В Германии только 2 шахты остались в качестве резерва, которые поддерживаются государством. Из шахт сделали музеи. Из-за того, что эти страны, в большинстве своем, отказываются от применения угля, в качестве энергетического ресурса и придерживаются «зеленой энергетики» на территории своих государств [108]. Они закупают твердое топливо в других государствах: Китае, Африке, России и др. и переходят на сжигание газа.

Активная добыча твердых полезных ископаемых ведется в Юго-Восточной Азии, где потребность в их добыче только растет, даже, несмотря на импорт полезных ископаемых. В течение 2024 года поставки российского угля в Китай сократились приблизительно на 8 % по сравнению с 2023 г., достигнув около 94 млн. т., тогда как основные конкуренты - Австралия и Индонезия - сохранили стабильный объём экспорта за счёт расширения производства в Квинсленде и Калимантане [97]. В то же время российское Министерство энергетики и китайские партнёры ведут переговоры об отмене импортных пошлин и расширении железнодорожной пропускной способности на Восточном направлении, что позволит восстановить экспорт на уровне не менее 100 млн. т.

уже в 2025 г. [48]. Кроме того, совместная работа горнодобывающих компаний России и Китая по освоению перспективных месторождений в Кузбассе и Якутии создаёт предпосылки для дальнейшего наращивания поставок высококалорийного угля, востребованного на северо-востоке Китая.

Что касается Индии [121], её экономика по-прежнему в значительной степени опирается на уголь как на один из основных источников электроэнергии, причём внутреннее производство покрывает лишь порядка 75 % потребностей [48,50]. В России добывается высококачественный антрацит и каменные коксующиеся угли, которые широко применяются в металлургии и для технологии PCI (pulverized coal injection) [47]. Потребность в этом полезном ископаемом, позволила объёмам экспорта в Индию в 2024 г. вырасти примерно на 5 %, до 25 млн.т. Межправительственная рабочая группа России и Индии изучает возможность открытия морского маршрута между портами Владивостока и Ченнаи, что при реализации позволит сократить логистические потери почти вдвое и станет дополнительным стимулом для увеличения поставок российского угля в Индию. В связи с этим возникает необходимость повышения полноты выемки запасов и интенсификации добычи на действующих месторождениях.

Не отстает по возможности наращивания добытого угля и Вьетнам. До 2030 г. импорт угля во Вьетнам будет увеличиваться, в связи с наиболее развивающейся экономикой Юго-Восточной Азии. Из-за увеличения экспорта полезных ископаемых, необходима систематическая технология отработки пластов угля, которая будет повышать полноту выемки, за счет добычи угля из целиков и других малых участков с неустойчивыми прочностными и различными геометрическими параметрами [119].

В качестве источника энергии уголь начал терять свое значение, уступая первенство газу. Однако конкуренцию выигрывает тот, кто «играет в долгую». Учитывая превосходство количества запасов угля (370 лет) над газом (103 года) и нефтью (59 лет), можно предположить, что разработка угля и забалансовых его запасов будет актуально и в дальнейшем [61, 66]. В таблице 1.1 [106, 110]

представлены как возможные преимущества, так и ограничения, связанные с использованием угля в сравнении с газом и нефтью.

Таблица 1.1 - Сравнение угля, нефти и газа [106, 110]

Параметр	Уголь	Нефть	Газ
Запасы	Более 1 10 <sup>12</sup> т	1,7 трлн м <sup>3</sup>	190 трлн м <sup>3</sup>
Доля в мировой энергетике	27%	31%	24%
Экологические риски	Высокие выбросы CO <sub>2</sub>	Средние выбросы CO <sub>2</sub>	Наиболее экологичный
Себестоимость добычи	20-50 уе/т	30-70/м <sup>3</sup>	10-40/м <sup>3</sup>
Перспективы	Снижение в энергетике, рост в металлургии	Устойчивый спрос, развитие альтернативных источников	Рост за счет перехода на чистые виды топлива

В основном уголь используется в качестве источника для получения энергии, однако уголь необходимо рассматривать, как комплексное сырье [99, 37]. В зависимости от месторождения [74], в нем содержатся редкоземельные и другие особо ценные элементы, металлы [7, 104], потребность в которых на сегодняшний день испытывают во всем мире с развитием космической и других технологически передовых отраслей.

На сегодняшний день соотношение применяемых систем разработки угольных месторождений России, а именно разработка: длинными столбами 85-90%, короткими лавами 7%, камерно-столбовая система разработки 3%, гидродобыча и прочие способы добычи 3% [24]. Например, в Кузбассе и Восточном Донбассе, преобладают практически благоприятные условия: пологие пласты средней мощности с углом залегания до 12°, и несущие стабильную гипсометрию, что благоприятно для использования механизированных комплексов. Большинство шахт, находящихся в таких условиях отработаны.

Все существующие системы разработки [24] - длинными столбами, камерно-столбовые или короткими лавами - предполагают оставление целиков различного функционального назначения: предохранительных, барьерных, охранных, противопожарных и пр. Неполная выемка угля неизбежно увеличивает удельные затраты на добычу [87].

В целиках оставляют полезного ископаемого [ 38] при использовании систем разработок: до 20-35% при отработке длинными столбами, 20-30% при камерно-столбовой отработке и 15-10% при отработке короткими лавами. Для снижения таких эксплуатационных потерь нужно разрабатывать новые технологии и технические средства [100, 17] для обеспечения полноты выемки, в частности выемки целиков.

## **1.2 Целики угольных шахт и актуальность их отработки**

Целики угольных шахт представляют собой массивы угля, оставляемые в недрах для обеспечения устойчивости горных выработок и предотвращения обрушений. По А.А. Борисову целики можно классифицировать по различным признакам: по горно-геологическим условиям, по назначению, по объему угля в целиках и геометрическим размерам, по структуре, по месту и расположению в пределах шахтного поля, технологической готовности к отработке, по условиям вентиляции и транспортирования угля, доставки материалов и безопасности горных работ [17, 7].

Их несущая способность определяется [109] рядом геологических и горнотехнических факторов, таких как физико-механические свойства угля и вмещающих пород, степень трещиноватости массива [91, 69], а также системой разработки шахтного поля. Проектирование целиков требует комплексного подхода [33], включающего численное моделирование [41, 113, 120], полевые измерения и лабораторные исследования [113]. Ширина целиков 15-20 м на верхних горизонтах с увеличением глубины горизонта ширина целиков кратно возрастает. В связи с этим ежегодно перекрепляется значительный объем подготовительных выработок [88], что составляет 10-20% трудозатрат от общего объема, и приходится 15-20% от себестоимости добытого угля, при этом в пределах шахтных полей Российской Федерации в целиках находится около одного миллиарда тонн угля [100].

При разработке пласта длинными столбами (рисунок 1.1 а) [124] добыча угля базируется на создании выемочного столба с длиной лавы до 400 м и длиной столба до 4000 м [124], вдоль стенок которого формируются мощные ленточные

целики. Длина целиков соответствует длине выемочного столба, а ширина определяется необходимостью обеспечения устойчивости выработок, в соответствии с действующими технологическими схемами, правилами безопасности и технической эксплуатацией [90].

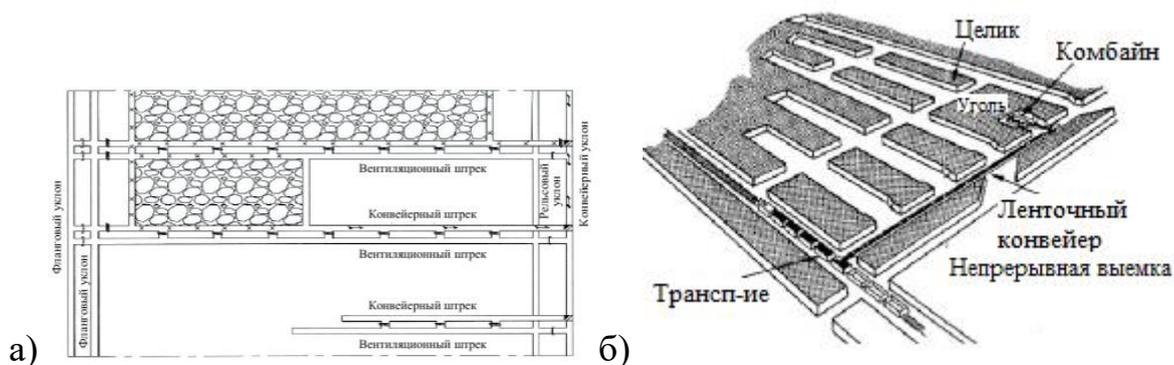


Рисунок 1.1 - Системы разработок [124, 111]

а) система разработок длинными столбами, б) камерно-столбовая система разработок

Основная задача таких целиков поддерживать вентиляционные и транспортные выработки, а также обеспечивать устойчивость выработанного пространства и служить для управления горным давлением. Этот вид целиков обычно не отрабатывается, гасится вместе с отработанным столбом. Однако именно в таких целиках скрыто более 20% полезного ископаемого [124, 31] от общих запасов выемочного столба. В зависимости от принятой технологии разработки добычу ведут с полным или частичным обрушением кровли [123] либо с полной закладкой выработанного пространства.

При средней мощности пласта целик, сформированный между откаточным и вентиляционным штреками сохраняет свою прочность вплоть до выемки угля с вышележащего подэтажа [9]. В таких условиях, проявляется деформация целика, вплоть до его частичного разрушения. При подобного рода условиях, необходимо ориентироваться на паспорт выработки, позволяющий определить характер деформирования целика, его податливость, определить целесообразные безопасные условия крепления выработки.

Сложнее, с точки зрения схем подготовки шахтного поля [77], оказываются системы разработки комбинированные, применяемые на мощных пологих пластах. Формирование целиков и их основные и вспомогательные функции схожи с применяемыми системами разработки на средней мощности пластах. Геометрические параметры целиков различны, это проявляется в неодинаковой ширине, и возможной ступенчатости на разных уровнях (подэтажах) по их мощности и ослаблению выработками [9].

Камерно-столбовая система разработки (рисунок 1.1 б) [111] продолжает оставаться одной из наиболее надёжных при разработке пластов со сложной геометрией, ограниченной протяжённостью и повышенной газообильностью. В её основе лежат короткие камеры, ширина которых на современных шахтах колеблется, как правило, от пяти до тридцати метров при длине 100-250 м, и междукамерные столбы, оставляемые для поддержания кровли; их ширина обычно составляет от трёх до двадцати метров в зависимости от прочностных характеристик пород и действующих горно-геологических условий [84]. Так, на шахте «Южная» в Кузбассе при глубине залегания около 400 м камеры традиционно выполняют шириной порядка семи метров, а устойчивые междукамерные столбы оставляют шириной пять метров, что обеспечивает надёжную поддержку кровли без предварительной закладки. В условиях высокого горного давления, характерного для Нерюнгринского месторождения [84], междукамерные столбы нарезают шириной до шести метров при ширине камер около десяти метров, что позволяет регулировать осадение кровли и снизить риск внезапных выбросов газа. Оставленные столбы служат опорой для основной кровли и всей вышележащей толщи пород, обеспечивая контролируемое оседание до поверхности, а непосредственную подачу и управление нагрузкой на кровлю полностью берёт на себя механизированная крепь. В зависимости от технологической необходимости остаточные столбы могут оставаться на срок от нескольких месяцев до нескольких лет, после чего при использовании дистанционно управляемых выемочных комплексов из них удаётся извлечь до 60-70 % первоначальных запасов угля. Такая интенсивность отработки требует

тщательного планирования, комплексного мониторинга напряжений и применения специальных технических средств, включая гидроударные и скалывающие исполнительные органы, способных обеспечить безопасность работ и максимальную полноту выемки.

Помимо целиков, характерных для систем разработок, формируют целики, размеры и расположение которых определяются горно-геологическими и горнотехническими условиями шахт, а также наличием поверхностных сооружений. Параметры пласта, а именно газообильность, склонность к самовозгоранию, обводненность, устойчивость кровли влияют на параметры целиков и выполняемые ими функции.

Барьерный целик [52] формируют в границах опасных зон: у скважин и разрывных нарушений, у затопленных выработок с достоверным контуром [75]. Они необходимы, для изоляции выработок от водных потоков, газа или заиловочной пульпы, также служат для предотвращения взаимного влияния соседних шахт. Срок их службы варьируется в зависимости от срока службы предприятия. Их толщина составляет до 15 м, с коэффициентом водонепроницаемости не менее 0,95, что характерно для шахт Восточного Донбасса.

Околоствольные целики [82], обеспечивающие устойчивость шахтных стволов и приствольных выработок. Их диаметр составляет 15-25 м, материал может включать уголь и бетонные композиты.

Противопожарные целики формируют на пластах склонных к самовозгоранию, изолируя отдельные части шахтного поля друг от друга. В случае возникновения пожара. Срок их службы варьируется в зависимости от условий обеспечения безопасности работ в выработках.

Охранные целики [34] оставляют для охраны капитальных вскрывающих выработок: стволов штолен, квершлагов и удерживают (временно) кровлю пласта от обрушения в выработанное пространство, представляющие собой узкие прерывистые [65] полосы полезного ископаемого. Имеют ширину до 40 м и могут

быть кольцевой или прямоугольной формы. Срок их службы может достигать нескольких десятков лет.

Опорные целики предназначены для защиты сооружений вертикальных стволов и ответственных объектов на земной поверхности. Дополнительно строятся целики-упоры со стороны падения от охраняемого объекта [65]. Размер опорного целика должен обеспечивать управление основной кровлей. При погашении столба, для управления непосредственной кровлей, оставляют подзавальные целики. Срок их существования соизмерим с периодом отработки отдельных участков и блоков шахтного поля, так например срок службы подзавальных целиков может достигать всего пару часов.

Предохранительные целики [26, 60, 68] формируют в границах опасных зон по пластам, залегающим под и над затопленными выработками, также обеспечивает защиту поверхностных объектов и природных ландшафтов. К ним можно отнести междуэтажные, междукамерные, надштрековые, подштрековые целики. Срок их службы варьируется от нескольких суток или месяцев, при бурошнековой выемке, до несколько десятилетий и часто совпадает с общим сроком эксплуатации горнорудного предприятия.

Временные целики, поддерживающие очистные пространства на период отработки блока. Их ширина составляет 3-15 м, срок службы 1-3 года.

Помимо выполняемых задач и функций, ради которых формируются целики, они так же обладает определенными параметрами, которые влияют на возможность их отработки. Такими параметрами являются: прочность, структура вмещающих пород, трещиноватость, срок службы, безопасность и оценка риска связанная с аварийными ситуациями при отработке целика и др. Современные методы расчета позволяют прогнозировать устойчивость целиков [118] и разрабатывать эффективные системы их поддержки, минимизирую техногенные риски [85] и потери полезных ископаемых.

### **1.2.1 Параметры целиков и их особенности**

Все угольные массивы по своей природе осадочные. Они состоят из чередующихся слоев различной мощности с разным составом и прочностными

характеристиками. Такая особенность сопровождается наличием различных сопротивлений разрушению в разных направлениях и чувствительностью к силовым или энергетическим воздействиям. Часто между угольными слоями встречаются прослои пород от очень крепких до мягких глинистых. Несущая способность угольных целиков определяется рядом геологических и горнотехнических факторов, среди которых ключевыми являются физико-механические свойства массива, неоднородность его строения и трещиноватость.

В инженерной практике различают три основных формы целиков: ленточные, столбчатые и кольцевые. Ленточные целики располагаются вдоль горных выработок и имеют ширину, как правило, от 3 до 80 м, в зависимости от условий. Они используются в качестве временных конструкций в очистных забоях и характеризуются повышенным риском продольного обрушения из-за направленного действия напряжений. Столбчатые целики представляют собой прямоугольные или квадратные участки с размерами 10-30 м и широко применяются в камерно-столбовой системе разработки, особенно в условиях средней и высокой мощности пластов. Их пространственная изоляция способствует перераспределению нагрузки, снижая вероятность каскадного обрушения. Кольцевые целики образуют защитные оболочки вокруг вертикальных стволов и объектов шахтной инфраструктуры, имеют диаметр до 50 м и могут представлять опасность накопления метана в центральной части вследствие слабой вентиляции.

С точки зрения устойчивости [107, 5], целики подразделяются на податливые и критические. Податливые целики обладают способностью к пластическим деформациям без разрушения при ширине менее  $0,5l_p$  (где  $l_p$  - протяжённость зоны опорного давления). Их использование эффективно для тектонических нарушений в массиве и при низкой прочности вмещающих пород. Критические целики разрушаются при напряжениях выше 45 МПа и требуют численного моделирования с использованием программных комплексов [3], таких как ANSYS и Rocscience RS2, для точной оценки предельных состояний. В работе

[84, 52, 75], показано, что при превышении порога 40 МПа риск внезапного разрушения возрастает экспоненциально.

Важное значение имеет также характер деформирования целиков [114] во времени с тем, чтобы происходило плавное оседание подработанной толщи без разрушений целиков вблизи действующих очистных забоев.

Целики являются концентраторами напряжений [78] и, одновременно, потенциальными очагами эндогенных пожаров. Поэтому на пластах, склонных к самовозгоранию [77], должны оставаться барьерные целики с возможным применением твердеющих материалов для изоляции выемочных участков [44].

Исследования показали, что при уменьшении ширины оставляемых целиков резко возрастает интенсивность пучения окружающих пород. Применение породных полос снижает интенсивность пучения, но срок их эффективного действия ограничен 1-3 месяцами. При разработке мощных пологих пластов, залегающих под углами, необходима организация межлавных и охранных целиков.

Согласно «Рекомендациям по безопасности ведения горных работ...» [73], ширина охранных целика определяется по максимальному значению зоны опорного давления, рассчитанному по номограмме, а также методикам. Методика расчёта базируется на принципе равновесия между нагрузкой и несущей способностью целика с учетом коэффициента запаса прочности, на которую влияют горно-геологические и прочностные факторы.

Трещиноватость угольных пластов - один из наиболее характерных факторов, влияющих на их несущую способность. В угленосных породах может насчитываться до 12 и более систем трещин [71], но наибольшее влияние оказывают 3-4 из них. Расстояние между эндогенными трещинами варьируется от 0,2-0,3 см до 15-30 см. По протяженности трещины подразделяются на пересекающие пласт на всю его мощность, пересекающие отдельные пачки угля, разновидности угля внутри пачки, а также локализованные в прослоях. Встречаются перемятые, крайне слабые пачки угля, с характерной повышенной хрупкостью.

Помимо трещиноватости, также значение имеет и контакт залежей полезных ископаемых с боковыми породами, которые могут включать глинистые прослойки или слабые слои, что сказывается на прочности целиков. В ряде случаев при расчете их размеров допускается частичное разрушение целиков [88].

При определении размеров целиков [98] необходимо учитывать допустимый уровень потерь угля и экономическую целесообразность затрат на поддержание выработок. Ширина целиков может варьироваться, а их структура ослабляться наличием выработок.

Прочность угля изменяется в зависимости от его структуры и условий нагружения [109]. Согласно теории Турнера-Шевякова «каждый целик воспринимает давление полного веса налегающих пород». Произведение площади выработанного пространства, приходящегося на целик, и предела прочности породы на одноосное сжатие определяет предельную величину напряженного состояния целика, при этом полученное усилие должно быть меньше суммы веса налегающих пород, приходящихся на один целик, и веса целика. На участках пласта, в которых предел прочности породы на одноосное сжатие меньше максимального сжимающего напряжения, происходит потеря устойчивости целика. При обосновании минимально допустимых размеров целиков необходимо пользоваться ГОСТ 31589-2012 и РД 05-33-94. Также для объективной оценки геомеханических свойств массива целесообразно использовать методы сейсмоакустического мониторинга, фотограмметрии и анализа напряжённого состояния по методике ВНИМИ.

Современные методы мониторинга напряженно-деформированного состояния массива позволяют прогнозировать зоны возможных деформаций и оптимизировать параметры целиков. Исследования показывают [9, 5], что оценка несущей способности целиков при проведении лабораторных испытаний возможна. Таким образом, в лабораторных условиях, возможно, оценить механические свойства целика в напряженном состоянии, посредством моделирования.

### **1.3 Условия, технологии и технические средства отработки целиков**

В современных условиях подземной добычи угля [53] отработка целиков представляет собой сложный многофакторный процесс [23, 27], включающий геомеханические, технологические и экономические аспекты. Важнейшими задачами являются обеспечение устойчивости массива, снижение рисков газодинамических явлений и повышение эффективности применяемых технологий. Современные методы механизации [115] направлены на увеличение коэффициента извлечения угля [46], минимизацию потерь и снижение техногенных рисков. Как показывают сравнительные исследования в области механизации угледобычи, оптимизация производительности шахтного поля достигается не увеличением числа одновременно работающих машин, а за счёт повышения нагрузки на единичный забой путем внедрения более совершенных очистных механизированных комплексов [49] и полного перехода на автоматизированные режимы работы.

С увеличением глубины залегания возрастает осадочное давление [51] и вероятность сопутствующих оседаний кровли, что требует оставления более широких межкамерных или межстолбовых целиков для обеспечения устойчивости выработанного пространства и предотвращения аварийных обрушений.

Экономическая целесообразность отработки целиков [87, 72] связана с оптимизацией затрат на вентиляцию, повышением коэффициента извлечения и снижением издержек на рекультивацию [40, 42]. Применение механизированных технологий снижает потери угля в целиках до 10-20%, что положительно сказывается на рентабельности добычи.

В условиях современного горного предприятия отработка целиков не может рассматриваться как самостоятельная операция: она должна быть органично вписана в общий план горных работ. При этом массивы угля, в том числе целики, расположенные на периферии шахтного поля, целесообразно включать в график отработки совместно с отработкой основного забоя. Такая стратегия позволит

избежать дополнительной перекомпоновки горно-капитального хозяйства и оптимизировать логистику угля, что снизит удельные затраты на добычу.

Закладочные технологии [42], при отработке целиков [79], эффективны в глубоких шахтах, где они обеспечивают стабилизацию массива и предотвращают образование пустот, вызывающих обрушения.

Любая отработка целиков [66] должна базироваться на наработанном опыте эксплуатации апробированных технологиях [18] и применении технических средств, применяемых на ведущих угольных предприятиях Кузбасса, Печорского бассейна и других угольных регионов [10, 84, 27, 86]. Основными исходными данными для выбора технологий и технических средств отработки целиков являются геометрические параметры и прочностные свойства целиков, как объектов отработки, наличие технических средств необходимых для выемки массива и последующего транспортирования добытого сырья, технических средств крепления кровли и управления горным давлением [18]. При этом уже существующая инфраструктура может использоваться повторно, для снижения капитальных затрат. Однако в настоящее время наблюдается дефицит эффективных технологических и технических решений, а также соответствующего оборудования для отработки целиков различных форм и размеров. Для решения этой задачи необходимо выделение типовых групп целиков для выявления принципов, технологий и средств для возможной их отработки в рамках каждой из групп или нескольких однотипных групп [20].

В качестве базового принимаем механический способ отделения угля от массива для отработки целиков как способ, которому в наименьшей степени сопутствуют техногенные риски и негативные последствия в сравнении с гидравлическим, термическим, буровзрывным способами, которые использовались и продолжают, применяться в настоящее время.

Таким образом, для анализа и поиска технологических решений принимаются следующие признаки, которым должны отвечать технические решения для отработки целиков:

- избирательность отработки забоя и селективность выемки;

- возможность адаптации оборудования к изменению геометрических параметров забоя;
- совместимость реализуемых технологий отработки целиков и основных технологий добычи в шахтном поле;
- статическое разрушение с поверхности забоя (скалывание);
- обеспечение защищенности при ведении горных работ;
- приемлемость возникновения стопорных режимов, в процессе отделения угля от массива в процессе функционирования оборудования;
- обеспечение пылеподавления и охлаждения рабочего инструмента.

Рассмотрим стандартное шахтное оборудование [62], которое применяется для отработки угольного забоя. На примере очистного механизированного комплекса (ОМК) [11], являющегося ключевым элементом в современной угледобыче, обеспечивающего высокую производительность и безопасность при разработке угольных пластов. Оно включает в себя основное и вспомогательное оборудование [8, 23], обеспечивающее механизацию всех этапов добычи. К основному оборудованию относят: выемочную машину (очистной механизированный комбайн или струг) предназначенную для разрушения массива и дальнейшей погрузки на транспортирующее средство, в качестве которого выступает забойный скребковый конвейер; секции механизированной крепи (СМК) - технические средства для управления горным давлением и поддержания кровли [103, 96]. К вспомогательному оборудованию относят: кабелеукладчик, системы пылеподавления в забое, гидравлические насосные станции. Отработка целиков очистным механизированным комплексом затруднена в первую очередь из-за того, что очистные комплексы изначально разрабатывались для работы в длинных забоях и не адаптированы для отработки малых участков. Кроме того, ограниченная манёвренность комплекса и практически отсутствие адаптивности к изменению геометрических параметров выемочного участка, сводит на нет все их преимущества при отработке целиков. Также, следует учитывать затрудненное проветривание малых и тупиковых участков, что может привести к накоплению вредных газов.

Одним из технологически обоснованных способов повышения извлечения целиков является поворот очистного комплекса с сохранением длины лавы [105]. Этот способ позволяет повысить коэффициент извлечения до 0,9. Однако он требует дополнительной проходки выработок, что может быть реализовано не на всех шахтах. Для таких участков необходима предварительная скважинная разгрузка массива, регламентируемая «Инструкцией по ведению горных работ на пластах, опасных по горным ударам» [32].

В системах разработки угольных пластов короткими столбами [79, 76, 102] применяется самоходные механизированные крепи Mobile Roof Support (MRS) (Рисунок 1.2 а) [117]. Применение таких мобильных крепей позволяет безопасно вести очистные работы в условиях высоких нагрузок на кровлю, в связи с их активной адаптацией к изменяющимся горно-геологическим условиям. Конструкция MSR представляет собой четырех стоечную секцию механизированной крепи на гусеничном ходу, с общей воспринимаемой нагрузкой 544 т, для защиты внутренних компонентов предусмотрены шторы, в виде крупнокалиберных цепей, опускающиеся с перекрытия до верха гусеницы.

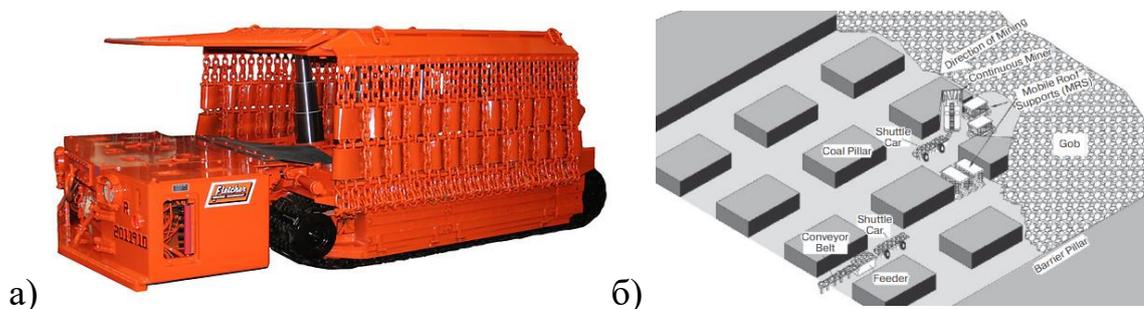


Рисунок 1.2 - Самоходные крепи [93, 117]

а) конструкция самоходной крепи; б) технология отработки целиков

Применяются такие секции при разработке угольных пластов с устойчивыми кровлями. Выемку осуществляет комбайн избирательного действия (рисунок 1.2 б) [93], за которым едут MSR, поддерживая кровлю. Однако их применение в российских шахтах сопровождается рядом технологических и геотехнических ограничений, обусловленных спецификой отечественных горно-геологических условий угольных месторождений. В частности, в шахтах Кузбасса

и Печорского бассейна, где часто встречаются мощные пласты с переменной мощностью и сложной структурой кровли, использование MRS малоэффективно из-за того, что стандартные параметры давления и устойчивости MRS, недостаточны для ведения работ при неустойчивых кровлях и в условиях глубокого залегания пластов свыше 800 м.

Для отработки целиков возможно применять агрегат АФГ, разработанного под руководством, главного конструктора Е. К. Заикина в ПНИУИ [13]. Он предназначен для комплексной механизации фронтальной отработки угольных пластов в условиях пологого залегания и нестабильных вмещающих пород, характерных для Подмосковного бассейна. Основной особенностью конструкции является применение автономных секционных исполнительных органов, установленных на забойном конвейере и приводимых в действие гидроцилиндрами. Были реализованы два вида исполнительных органов: первый неуравновешенный ковшовый, осуществляющий срез от почвы к кровле с погрузкой и зачисткой, его конструкция обеспечивает минимальную локализацию напряжений в призабойной зоне и упрощённую подачу угля на конвейер; второй уравновешенный грейферный, предназначенный для двустороннего резания, осуществляющий резание от почвы и кровли к центру пласта [83], что позволяет обеспечивать равномерный износ режущих кромок и снижать динамические нагрузки на приводную станцию. Характеристики агрегата включали среднюю толщину среза 0,07 м, энергоёмкость 1,0 кВт·ч/т, производительность до 3000 т/сут.

Экспериментальная модификация 1АФГ была испытана на шахте «Новомосковская». Верхняя часть пласта обрушалась скальвателями секции механизированной крепи, нижняя - ковшовым исполнительным органом. Испытания подтвердили стабильность работы агрегата и эффективность разрушения массива, при этом были выявлены недостатки: низкая эффективность загрузки угля на конвейер [83], повышенная энергоёмкость исполнительного органа, а также ограниченность длины лавы до 30 м, что не целесообразно для длинных лав, однако подходит для целиков.

В авторском свидетельстве № 1490271 [2] описана альтернативная конструкция фронтального агрегата с гребёнчатыми исполнительными органами, снабжёнными двусторонними резцами, которые раскрываются с опорой на перекрытие и основание секции крепи. В ПНИУИ под руководством Ю. И. Наместникова также был создан и испытан агрегат АГК8 [13], предназначенный для проведения монтажных камер. Разрушение массива осуществлялось с помощью качающихся гребенчатых исполнительных органов, закреплённых на базовой балке [83]. Верхняя пачка разрушалась скалывателями, совмещёнными с опорными элементами крепи. Испытания агрегата на шахте имени А. Е. Гаевого показали следующие параметры: скорость резания - 0,06 м/с, скорость скалывания - 0,13 м/с, толщина среза - 0,1 м при усилии до 20 кН, толщина скалываемого массива - от 0,2 до 1,0 м при усилии до 200 кН. Средняя энергоёмкость процесса составила 0,42 кВт·ч/т. Компоновка агрегата была модульной: три гребёнки объединялись тягами с двумя гидроцилиндрами. Все технологические операции (выдвижка, срез, обрушение, передвижка) осуществлялись дистанционно с гидропульта на удалении до 40 м от забоя. Отмечена возможность реализации частичной селективности при параллельной работе нескольких модулей, что позволяет повысить производительность комплекса в целом. Одним из главных недостатков данного агрегата являются, неэффективная погрузка разрушенной части массива и последующая транспортировка.

В авторском свидетельстве №1493793 [1] выемочный фронтальный агрегат для очистных работ, осуществляющий разрушение забоя качанием рукояти за счет резания при распоре секции крепи. Из положительных сторон этого технического устройства можно отметить, что при применении его на породах малой прочности, обеспечивается высокая производительность при малых удельных энергозатратах. Однако есть ряд недостатков, которые перекрывают положительные стороны, а именно трудности с зачисткой выработанного пространства, соблюдении норм безопасности по проходу для людей, длительный цикл отработки забоя.

В патенте №2459076, выемочный модуль [54] обеспечивает возможность вести отбойку угля в нишах крупным сколом при работе совместно с комбайновым комплексом, с учетом напластования угольного массива, за счет применения ударника, что снижает требуемые усилия необходимые при резании. Однако погрузку добытого полезного ископаемого осуществляет очистной комбайн, который доходит до отработанной ниши. Применение таких модулей на весь очистной забой затруднено в связи со сложностью погрузки добытого полезного ископаемого на забойный конвейер.

В патенте №2687719, способ селективной разработки сложноструктурных месторождений твердых полезных ископаемых [55] применяется проходческий комбайн, осуществляющий комбинированное воздействие на забой, а именно образование вруба за счет подрезания пласта и скалывания полезного ископаемого за счет исполнительного органа ударного действия. Такой способ добычи имеет ряд недостатков: отсутствие мобильность при перемещении в шахтном поле; необходимость в комбинированном исполнительном органе, то есть наличие двух исполнительных органов, для нормального функционирования; способ для выемки целиков, может применяться только при наличии самоходных секций крепи.

В патенте №184573, секция механизированной крепи [56], конструкция механизма предназначена для отделения угля от массива манипулятором с гидроударником, однако такое устройство предполагает ряд недостатков, которые заключаются в многозвенности конструкции, из-за чего уменьшается ее надежность. Также в связи с тем, что у манипулятора исполнительный орган представлен единичной пикой, увеличивается время на отработку забоя на один шаг передвижки крепи и затрудняется погрузка разрушенного массива на скребковый конвейер.

В патенте №214566, фронтальный очистной агрегат [58], представляющий собой выемочное устройство с режущим исполнительным органом на базовой конструкции в виде секции механизированной крепи. Особенностью этого выемочного модуля [18, 15] является, уравновешенность его рукоятей при

осуществлении выемки угля, что позволяет при отработке угольного массива увеличить производительность в забое. Однако в связи с тем, что осуществляется резание, с сопутствующими ему негативными чертами, а именно переизмельчение угля, пылеобразование, получение серпообразной формы стружки. Патент RU 214566 (Приложение А) был разработан в рамках этого диссертационного исследования.

Кроме того, в мировой практике отмечаются попытки применения альтернативных материалов и технологий, например использование искусственных целикров из композитных материалов [94] для повышения прочности и снижения массо-габаритных характеристик конструкций, но серьёзных внедрений в угольной промышленности пока не отмечено. В Южной Африке [122] успешно действует камерно-столбовая система с закладкой породой, где минимальные потери угля составляют не более 20 %, что демонстрирует практическую эффективность консервационных технологий при удержании высоких коэффициентов извлечения. В Германии применяют бурошнековые агрегаты с производительностью до 400 т/ч (компания DBT), что подчёркивает растущий интерес к комбинированным схемам разрушения и погрузки угля.

Проведённый анализ исследований показывает, что существующие наработки ориентированы главным образом на выемку целикров при камерно-столбовых системах разработки пластов, а при системах разработки длинными столбами, с длиной протяжённостью очистных забоев не применялись. Высокопроизводительные механизированные комплексы, несмотря на интенсивность добычи, оказываются неэффективными при работе с малыми объёмами и необходимостью селективного разрушения массива. Разнообразие геологических, технологических и геомеханических условий при добыче угля в очистных забоях стимулировало появление множества узкоспециализированных решений, часть из которых представлена выше, однако унифицированные и мобильные комплексы, удовлетворяющие требованиям безопасности и

экономической целесообразности, для отработки целиков параллельно с основной выемкой на пологих пластах, требуют своей разработки.

#### 1.4 Способы отделение угля от угольного массива

Анализ технических средств применимых для отработки угольных массивов [95], в частности целиков, выявил их высокую зависимость от применяемых способов отделения угля от массива. Последний [14] выступает одним из определяющих звеньев в технологическом процессе работы очистного комплекса, а именно производительности выемочного устройства, конвейера, качества отделяемого угля, времени цикла и технических параметров комплекса в целом. В горных технологиях используется три метода механического отделения угля от массива: резанием, скалыванием, комбинированием резания и скалывания. Характер приложения нагрузки - статический и динамический: вибрация, импульс, удар, виброударный и пр. Учёт факторов, влияющих на структуру массива, позволяет оптимизировать процесс отделения полезного ископаемого, достигая минимальных удельных энергозатрат и рационального гранулометрического состава добываемого угля [67].

Наиболее часто применяемый механический способ отделения угля от массива - это резание [45, 39], осуществляемое, радиальными или тангенциальными резцами [43], резцами буровой коронки, дисковой шарошкой, комбайнов, стругов, буровых машин, добычных комплексов и агрегатов. Описание нагруженности режущего инструмента [29, 67] при разрушении углей (таблица 1.2) и хрупких пород базируется обычно на том, что процесс резания представляет собой непрерывное чередование контактного скалывания (с образованием ядра уплотнения) с отрывами мелких и крупных кусков угля [112, 45, 43]. Условия образования уплотненного ядра и его размеры зависят от геометрии инструмента и параметров режима резания [43].

При резании с выровненной поверхности резцами разной ширины сечение стружки  $S$  определяется шириной режущей части резца  $b_p$ , толщиной стружки  $h$  и углом бокового развала борозды резания  $\varphi$  по Е. З. Позину [62]:

Таблица 1.2 - Формы рабочего инструмента при отделении угля от массива [62]

Форма резца	Чертеж	Формулы
Овальная прямолинейными наклонными боковыми режущими кромками		$b_p = 2\sqrt{\Delta_{\pi}(2r - \Delta_{\pi})}$ <i>При <math>\Delta_{\pi} &lt; \Delta_{\pi,к}</math></i> $b_p = b_k + 2 \operatorname{tg}\varphi (\Delta_{\pi} - \Delta_{\pi,к})$ <i>при <math>\Delta_{\pi} &gt; \Delta_{\pi,к}</math></i> $b_p = b_k$ <i>При <math>\varphi &lt; 0</math> и <math>\Delta_{\pi} &gt; \Delta_{\pi,к}</math></i> $b_k = 2\sqrt{\Delta_{\pi,к}(2r - \Delta_{\pi,к})}$
Многоугольная прямолинейными боковыми режущими кромками		$b_p = b_{\pi} + 2 \operatorname{tg}\varphi' \Delta_{\pi}$ <i>При <math>\Delta_{\pi} &lt; \Delta_{\pi,к}</math></i> $b_p = b_k + 2 \operatorname{tg}\varphi (\Delta_{\pi} - \Delta_{\pi,к})$ <i>при <math>\Delta_{\pi} &gt; \Delta_{\pi,к}</math></i> $b_p = b_k$ <i>При <math>\varphi &lt; 0</math> и <math>\Delta_{\pi} &gt; \Delta_{\pi,к}</math></i> $b_p = b_{\pi} + 2 \operatorname{tg}\varphi' \Delta_{\pi,к}$
Коническая режущей кромки		$b_k = 2 \frac{\Delta \sin \frac{\beta}{2}}{\sin \delta} \sqrt{\cos \beta + \sin \beta \operatorname{ctg} \alpha}$

При всех достоинствах процесса резания [59], ему свойственны некоторые весьма значительные негативные особенности [20]:

- случайная последовательность и размеры элементарных сколов;
- выход большого объёма мелких классов угля в добываемом продукте, в том числе интенсивное выделение взрывоопасной угольной пыли;
- разрушение отделяемых кусков угля преимущественно, сжатием, которому свойственно наибольшие удельные затраты энергии;
- образование ядра уплотнения;
- неизбежная при резании зачистка следа среза сопровождается расходом энергии на трение, в частности, на нагрев и интенсивное изнашивание резцов;
- необходимость реализации обязательных для исполнения мероприятий по обеспечению требований правил безопасности ведения горных работ, в частности, подавление и связывание пыли, охлаждение резцов и их контактов с массивом в зоне резания.

В реальности, в основном все осадочные породы, в частности угли, хрупкие по своей природе, следовательно, отделение происходит сколами в разных направлениях по-разному. Поэтому рационально переходить к менее энергоемкому процессу отделению угля от массива [20] с соблюдением качества отделяемого куска, именно к сколу структурным блоком. С уменьшением расхода энергии, повышается качество и увеличивается крупность куска, а процесс пылеобразования уменьшается.

При отделении угля сколом необходимо отказаться от стандартизированных резцов, ввиду их конструктивных ограничений, обусловленных фиксированной геометрией режущей кромки и недостаточной способностью формировать локализованное сжатие масс угля. При сколе работа происходит преимущественно на сжатие, и поэтому эффективным становится использование клиновидных или конусных элементов исполнительного органа, способных концентрировать усилия и создавать условия для образования трещин и последующего отрыва кусков. В общем виде прочность отделяемого полезного ископаемого зависит от количества открытых поверхностей при взаимодействии с рабочим инструментом (рисунок 1.3) [92].

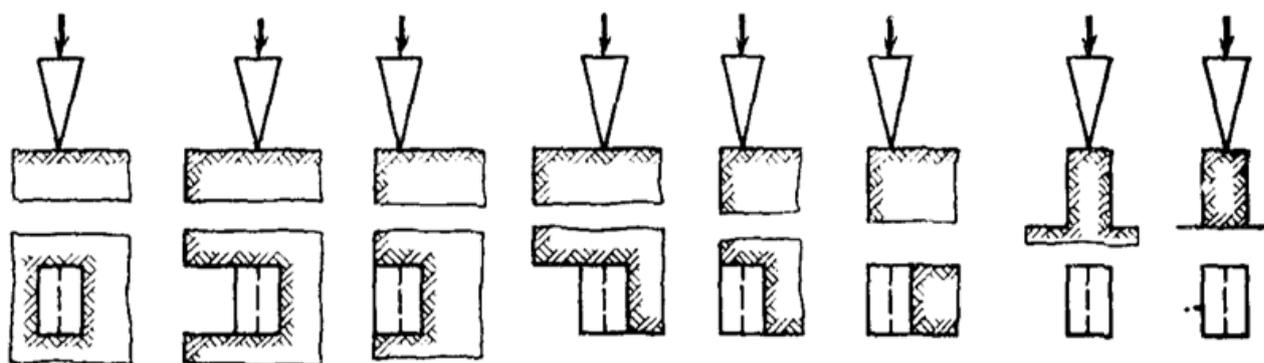


Рисунок 1.3 - Возможные схемы взаимодействия рабочих инструментов с полезным ископаемым [92]

Так наиболее распространенное применение в горной промышленности имеют схемы со свободным и полусвободным взаимодействием рабочего инструмента с массивом [89] в связи с их эффективностью.

При внедрении исполнительного органа в массив, согласно классическим исследованиям А.Н. Зеленина и Л.А. Шрейнера [30, 101], процесс формирования

уплотнённого ядра под вершиной внедряемого клина, будь то классический клиновидный элемент или пика, напрямую зависит от угла заострения  $\beta$  (рисунок 1.4) [92] и характера пластических деформаций, возникающих в угольном массиве.

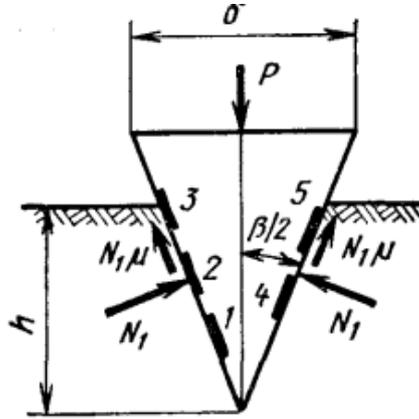


Рисунок 1.4 - Схема усилий действующих на вдавливаемый клин [92]

$\mu$  - коэффициент трения;  $P$  - сила внедрения;  $N_1$  - нормальное усилие на наклонную поверхность

Анализ, представленный в работе Фёдорова Д.И. [92], подтверждает, что при углах заострения порядка  $60-90^\circ$  происходит не только развитие зоны уплотнения, но и формирование характерных траекторий распространения трещин, направленных вдоль оси внедрения и к боковым поверхностям. Усилие вдавливание представлено следующей формулой (1.1):

$$P = 2N_1 \left( \sin \frac{\beta}{2} + \mu \cos \frac{\beta}{2} \right) \quad (1.1)$$

Эти зоны радиального и тангенциального напряжения усиливаются по мере увеличения глубины проникновения, и максимальные контактные напряжения концентрируются под вершиной клина. В результате формируется упругопластическая область (ядро уплотнения), способная перераспределять внешнюю нагрузку и инициировать разрушение массива вдоль наиболее ослабленных направлений, соответствующих плоскостям напластования или естественной трещиноватости.

При углах менее  $60^\circ$  разрушение приобретает больше сдвиговой характер, что снижает направленность процесса разрушения и требует большей глубины проникновения для достижения аналогичного эффекта. Таким образом, правильно

подобранный угол клина обеспечивает не только минимизацию энергозатрат, но и стабильность процесса разрушения при локальном внедрении исполнительного органа в угольный массив. В современных исследованиях по механическому разрушению [112] хрупких горных пород оптимальный угол заострения таких рабочих органов не должен превышать диапазона от  $40^\circ$  до  $60^\circ$ . Зависимости изменения усилия внедрения клина представлен на рисунке 1.5. При этом обеспечивается наиболее благоприятное распределение контактных напряжений под вершиной клина, исключая избыточную зону дробления и способствующее формированию локализованного скола. Применение таких решений имеет ключевое значение при селективной отработке угольных целиков, особенно в условиях трещиноватых и ослабленных угольных пластов, и позволяет значительно повысить коэффициент извлечения при снижении энергоёмкости и минимизации потерь полезного ископаемого.

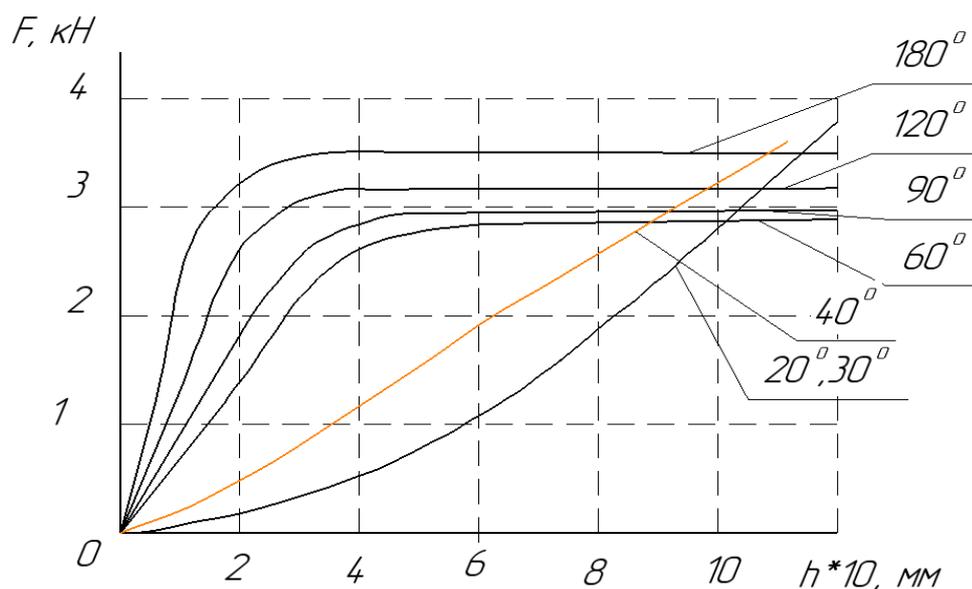


Рисунок 1.5 - Зависимость силы внедрения от глубины погружения  
(составлено автором)

Выбор способа разрушения массива должен базироваться на реальных горно-геологических условиях забоя, структуре пласта, его трещиноватости, степени отжима и форме залегания. Рассмотрим вариант классификации способов

отделения угля от массива предложенный В.В. Габовым [12], подходящих для скалывания [12]:

Разрушение массива забоя отдельными сколами в направлении преобладающей трещиноватости с ослаблением угольного массива подрезной щелью и сколом пачки угля у кровли. Этот способ целесообразно применять при значительной дезинтеграции призабойной части массива трещиноватостью под углом к линии забоя, отжимом и слоистостью [12].

Разрушение массива локального забоя избирательными сколами по плоскостям, разделяющим слои пласта одновременно по всей ширине локального забоя в направлении подвигания фронта лавы [20]. Последовательность сколов по мощности пласта определяется структурными свойствами пласта и требованиями минимальной энергоёмкости разрушения массива за цикл, устойчивости технологического процесса и разрушения массива без выхода негабаритов.

Разрушение массива локального забоя двухсторонними, шахматными, по форме сечения, срезами и сколами пачки угля у кровли и над зарубной щелью у почвы пласта. Способ целесообразно применять при простом строении пласта, хрупких, трещиноватых углях без существенного преобладания одной системы трещиноватости над другими или, когда преобладающая трещиноватость параллельна плоскости забоя [12].

Эти способы направлены на снижение энергетических затрат, повышение селективности и уменьшение потерь угля, при отделении угля скалыванием. Каждый из рассмотренных способов требует детальной оценки применимости в конкретных горно-геологических условиях. Необходимы оценки энергозатрат при внедрении рабочего инструмента в угольный массив, чтобы выбрать рациональный способ отработки целика с учётом безопасности, производительности и селективности выемки.

Таким образом, выбор способа отделения угля от массива должен производиться на основе комплексной оценки геомеханических условий, структуры целика, трещиноватости пласта и требований к качеству угля. Приоритет должны получать методы, позволяющие управлять направлением

разрушения, регулировать усилия резания или скалывания и обеспечивать минимальные потери при максимальной полноте выемки. В условиях отработки целиков на действующих шахтах это становится возможным только при использовании гибких технологических схем и выемочных комплексов, модульных по исполнению.

### **1.5 Возможные риски, влияющие на отработку угольных целиков**

Отработка угольных целиков сопряжена с рядом множеством природных, техногенных и организационных рисков [86, 81], особенно в условиях глубоких шахт и сложных горно-геологических условий.

К основным природным рискам относятся внезапные выбросы угля и газа [119]; самовозгорание угля; горные удары и вывалы по кровле, по боковым сторонам выработки, пучение почвы.

Одним из наиболее опасных явлений являются динамические обрушения, или горные удары, возникающие при превышении предельных напряжений в массиве. Исследования, проведенные на шахтах Воркутского угольного бассейна [35], показали, что при ширине целиков менее половины критического пролета ( $0,5 l_p$ ) существенно возрастает вероятность внезапных разрушений, сопровождающихся высвобождением значительных объемов энергии.

Газодинамические явления, такие как внезапные выбросы метана, также представляют серьезную угрозу при отработке целиков. На шахтах Воркутского месторождения зафиксированы концентрации метана [28] значительно превышающие безопасные пределы. Такие выбросы могут происходить внезапно и с большой скоростью, создавая взрывоопасную атмосферу и повышая риск аварий. Особенно опасны участки с высокой газоносностью и нарушенной структурой пласта, где газ может накапливаться в замкнутых полостях и высвобождаться при нарушении целостности массива.

Термическая нестабильность угольных пластов [4], проявляющаяся в самовозгорании угля, является еще одной серьезной проблемой при отработке целиков. В подзавальных зонах, где вентиляция затруднена, температура может повышаться до  $300^{\circ}\text{C}$ , что приводит к самовозгоранию угля и возникновению

эндогенных пожаров. Такие пожары трудно обнаружить на ранней стадии и сложно локализовать, что требует применения специальных методов контроля температуры и газового состава воздуха в выработках.

Комплексное изучение этих опасностей с использованием современных методов моделирования и мониторинга позволяет разрабатывать эффективные меры по предупреждению аварийных ситуаций. Внедрение систем прогноза горных ударов [116], основанных на анализе напряженно-деформированного состояния массива, а также применение технологий дегазации и контроля температуры, существенно повышают безопасность горных работ при отработке целиков.

К основным техногенным и организационным рискам можно отнести большие энергозатраты при добыче целика; экономические затраты; технологические ограничения при ведении выработок.

Организационные просчёты в планировании и синхронизации процессов, таких как вентиляция, транспортировка, электроснабжение, часто приводят к вынужденным остановкам [25, 40]. Ошибки при проектировании или переоценка устойчивости массива без учета его деформационной истории могут повлечь за собой обрушение кровли или потерю несущей способности целика. На ряде предприятий Кузбасса и Воркуты, например, фиксировались случаи деформации и разрушения междулавных целиков [80], сопровождаемые выбросами угля и газа, что указывает на недостаточный мониторинг напряженно-деформированного состояния массива. Кроме того, в условиях слабой вентиляции резко возрастает риск газодинамических явлений и самовозгорания, особенно в старых выработках и зонах остаточных запасов.

Одной из ключевых проблем является низкий уровень подготовки персонала к отработке целиков - это касается как знаний по работе с нестабильными забоями, так и обращения с новыми техническими средствами, включая дистанционно управляемые выемочные модули и системы мониторинга. Недостаточная регламентация последовательности операций и отсутствие типовой методики разрушения остаточного массива усиливают вероятность

ошибок на операционном уровне. Также необходимо отметить недостаточную обеспеченность шахтного оборудования, пригодного для фронтальной селективной отработки целиков.

Таким образом, совокупность техногенных и организационных рисков требует комплексного инженерного и управленческого подхода, включающего предварительную геомеханическую оценку устойчивости массива, выбор подходящей выемочной технологии, модернизацию технических средств, автоматизацию газо- и пылемониторинга, а также подготовку квалифицированного персонала. Только в этих условиях, возможно, обеспечить безопасную, экономически обоснованную и технологически эффективную отработку угольных целиков, которая будет соответствовать современным требованиям к устойчивому развитию подземной угледобычи.

### **1.6 Выводы по Главе 1**

1. В современных условиях угольной промышленности России и стран Юго-Восточной Азии наблюдается устойчивая потребность в повышении полноты извлечения угольных запасов, включая отработку участков, ранее не вовлечённых в промышленную разработку. Анализ действующих систем разработки показывает, что наиболее распространённой является система разработки длинными столбами, однако при её применении в целиках может оставаться до 35% полезного ископаемого. Такая ситуация обусловлена как геомеханическими ограничениями, так и недостаточной технической оснащённостью забоев для отработки участков в осложнённых условиях.

2. Обеспечение максимальной полноты выемки угля требует внедрения новых технических средств и специализированных технологий, способных эффективно извлекать запасы из целиков различного назначения и размеров без ущерба для безопасности и устойчивости горных выработок.

3. Целики представляют собой неотъемлемый элемент структуры шахтного поля при подземной добыче угля, выполняя как несущие, так и защитные функции. При этом доля угля, скрытого в целиках, особенно в подготовительных и охранных, может превышать миллионы тонн на отдельных месторождениях.

Это делает задачу рациональной отработки целиков всё более актуальной - как с точки зрения повышения коэффициента извлечения, так и с позиции экономической целесообразности дальнейшего освоения месторождений.

4. Отработка угольных целиков в системах разработки длинными столбами сопряжена со значительными технологическими и экономическими ограничениями. Несмотря на доминирование таких систем в России, они неизбежно приводят к потерям 10-20% угля в ленточных целиках. Существующие очистные механизированные комплексы неприменимы для малых участков из-за низкой манёвренности и высоких эксплуатационных затрат.

5. Исследование патентных решений выявило потенциал модульных фронтальных систем с селективным разрушением для отработки целиков, однако их практическое применение сдерживается отсутствием унификации. Однако применение энергоэффективных унифицированных выемочных модулей, основанных на статическом скалывании, а не резании, с совместимостью шахтной инфраструктуры, является критическим условием для снижения эксплуатационных потерь и рационализации использования балансовых запасов угля.

6. Выбор способа отделения угля от массива критически влияет на эффективность отработки полезного ископаемого в целиках. Резание, доминирующее в практике, обеспечивает высокую производительность, но сопровождается значительными недостатками: чрезмерным пылеобразованием, высокими удельными энергозатратами и ускоренным износом инструмента, из-за трения и формирования зон уплотнения. В качестве энергоэффективной альтернативы для трещиноватых массивов выступает скалывание, которое при оптимальных углах заострения рабочего органа обеспечивает снижение энергоёмкости, улучшение гранулометрического состава и минимизацию динамических нагрузок.

7. Для угольных целиков наиболее перспективны селективные методы скалывания, адаптированные к направленности трещин и слоистой структуре пласта. Их практическая реализация требует замены стандартных резцов на

клиновидные элементы, способные концентрировать усилие, а также внедрения модульных выемочных комплексов с управляемым внедрением инструмента.

8. Обработка угольных целиков сопряжена со значительными природными рисками. Критическими угрозами являются: динамические обрушения, внезапные выбросы метана и самовозгорание угля. Эти риски усугубляются техногенно-организационными факторами: высокими энергозатратами, ограниченной маневренностью оборудования и сложностью мониторинга изолированных участков. Управление рисками должно стать неотъемлемой частью проектирования модульных систем обработки целиков, где адаптивность технологий напрямую влияет на безопасность горных работ.

### **Задачи исследования**

1. Обосновать выбор структуры и параметров унифицированных выемочных модулей в составе очистного механизированного комплекса для обработки угольных целиков, возможных к извлечению в границах полей действующих шахт.

2. Оценить потенциальные риски, связанные с функционированием комплекса, и выбрать основные критерии, характеризующие унифицированные выемочные модули в составе очистного механизированного комплекса обработки целиков.

3. Провести оценку энергоемкости процесса внедрения скалывающего инструмента типа «пика» в уголь.

## ГЛАВА 2 ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОТРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ ЦЕЛИКОВ

### 2.1 Группирование целиков

В рамках системной классификации угольных целиков на месторождениях с подземной добычей, целесообразно использовать многокритериальный подход, учитывающий как горно-геологические условия, так и технико-экономические параметры и функциональные особенности каждого типа массива. На основании обобщения действующих нормативных документов, инженерной практики и научных исследований, целики классифицируются по следующим укрупнённым признакам: назначению, геометрическим параметрам, расположению в пределах шахтного поля, возможности отработки (рисунок 2.1) и технологической совместимости с комплексами механизированной добычи. Такая структура позволяет перейти от обобщённых понятий к конкретным инженерным решениям, применимым при проектировании доработки остаточных запасов в пределах действующих шахтных полей.

Классификационный признак по назначению определяет основные функции целиков: охранные, противопожарные, предохранительные, барьерные и опорные, - каждая из которых формируется в соответствии с требованиями безопасности и условий устойчивости массива.

Оценка по геометрическим характеристикам, отражает форму и параметры: от прямоугольных и ленточных до целиков неправильной формы, возникших вследствие несистематизированной отработки.

Пространственное расположение целиков определяет их расположение в шахтном поле, что также является одним из показателей для оценки возможности их отработки и обеспечении надлежащих условий проветривания.

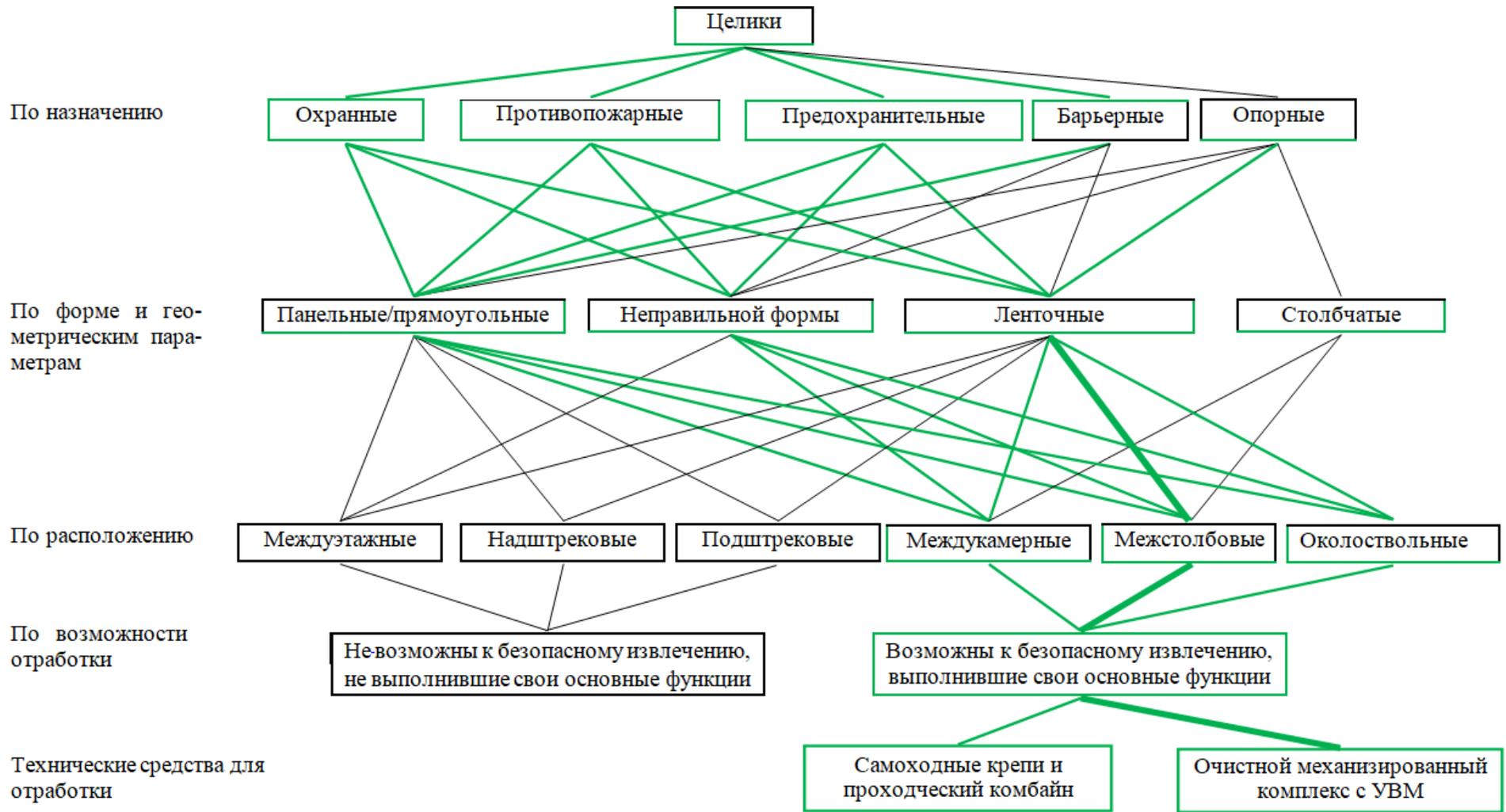


Рисунок 2.1 - Группирование целиков угольных шахт  
(составлено автором)

Основываясь на данных из первой главы, рассматривая в первую очередь целики по средним пластам, так как в мире средние пласты встречаются чаще всего, и соответственно там располагаются наибольшие запасы с углами залегания до десяти градусов, выполнившие свои основные и вспомогательные функции. Системный подход к отработке целиков и выбору значений параметров процесса отделения угля от массива [20] в зависимости от влияющих на этот массив факторов позволяет систематизировать целики и разделить их на две основные группы по возможности безопасного извлечения.

Первая группа, целики, отработка которых не допускается: к ним относятся все целики, в частности охранные, выполнение функций которыми не заканчиваются и продолжаются на длительный и на неопределенный срок, например на шахтах «Галдинская-Западная-1», «Полысаевская».

Вторая группа пригодных к отработке, другими словами, выемка которых допускается без последствий и целесообразна, когда имеют место большие запасы в целиках, и пластах средней мощности, с относительно устойчивыми кровлями, с полным обрушением с выработанного пространства.

Зеленым цветом (рисунок 2.1) показаны классификационные связи целиков, возможных к отработке, при наличии технических средств. В качестве таких средств могут применяться самоходные крепи с проходческими комбайнами или очистные механизированные комплексы с УВМ.

Анализ приведённой систематизации целиков по группам свидетельствует о том, что наибольший промышленный потенциал имеют ленточные межстолбовые целики, выполнившие свои основные и вспомогательные функций. Их геометрия и пространственная организация благоприятны для применения модульных выемочных решений совместно с основной добычей столба, обеспечивающих снижение эксплуатационных потерь угля до 20%, особенно в условиях пологих пластов средней мощности, с углом падения до 10°, с уравновешенной кровлей, не опасных по горным ударам. Такие условия преобладают в Кузбассе, ряде месторождений Тувы и Якутии, Канско-Ачинском и Печорском угольных бассейнах. Доля таких пластов в России составляет до 20%

## 2.2 Ключевые факторы и методологические подходы обработки угольных целиков

Обработка угольных целиков представляет собой сложный технологический процесс, сопряжённый с рисками, обусловленными как природными, так и техногенными факторами. Комплексная оценка рисков необходима для повышения безопасности, увеличения коэффициента извлечения угля и обеспечения устойчивости горного массива. Выбор ключевых факторов обусловлен их непосредственным влиянием на эффективность и безопасность ведения горных работ. Факторы являются основой выбора одноименных критериев для оценки процессов сопутствующих обработке целиков. Основными из них являются [22]:

«Защищенность», охватывающая аспекты устойчивости массива и предотвращения аварийных ситуаций, прочности конструкции, обеспечения требований техники безопасности, защищенности людей и оборудования при обработке целиков;

«Энергетическая эффективность», определяющая отношение затрат энергии для обработки угольного забоя унифицированным выемочным модулем к работе горной машины, затраченной в целях получения аналогичного объема угля в идентичных условиях;

«Экономичность», оценивающая затраты применения технологий и их средств их осуществления с учетом себестоимости добытого угля;

«Долговечность», отражающая способность инфраструктуры шахты сохранять свою работоспособность на протяжении всего цикла эксплуатации при условии обработки целиков;

«Производительность» - это количество добываемого полезного ископаемого в единицу времени.

«Технологичность» - комплексное понятие, связанное с целесообразностью применением технических средств добычи, поддержанием их в готовности с учетом применимости их конструкции в конкретных условиях эксплуатации.

Помимо этих факторов, также играют роль другие факторы такие как экологичность, социальные и регуляторные аспекты. Экологичность включает минимизацию выбросов углекислого газа, предотвращение деградации земель и рациональное использование водных ресурсов, что особенно важно в условиях ужесточающихся природоохранных норм. Социальные аспекты касаются влияния последствий угледобычи и сопутствующих им процессов на местное население, создание рабочих мест и условий труда. Социальная ответственность компаний становится ключевым фактором при получении разрешений на разработку месторождений. Регуляторные аспекты включают соответствие национальным и международным стандартам по охране труда, устойчивому развитию и углеродному регулированию. Также значимыми являются технологическая адаптивность, определяющая возможность применения оборудования в различных горно-геологических условиях, и логистическая доступность, влияющая на экономическую целесообразность транспортировки и переработки добытого угля.

### **2.3 Структура технологического процесса отработки угольных целиков**

Как было показано в первой главе наиболее широко в процессе подземной добычи полезного ископаемого из пластовых месторождений, в частности угля, используются технологии отработки запасов длинными забоями с оставлением целиков. Однако при отработке малых участков традиционные очистные комплексы демонстрируют критическую неэффективность, что количественно подтверждается анализом коэффициента относительной материалоемкости (рисунок 2.2) Данный коэффициент, определяемый как отношение массы технологического оборудования комплекса УВМ к массе штатного оборудования при отработке забоя.

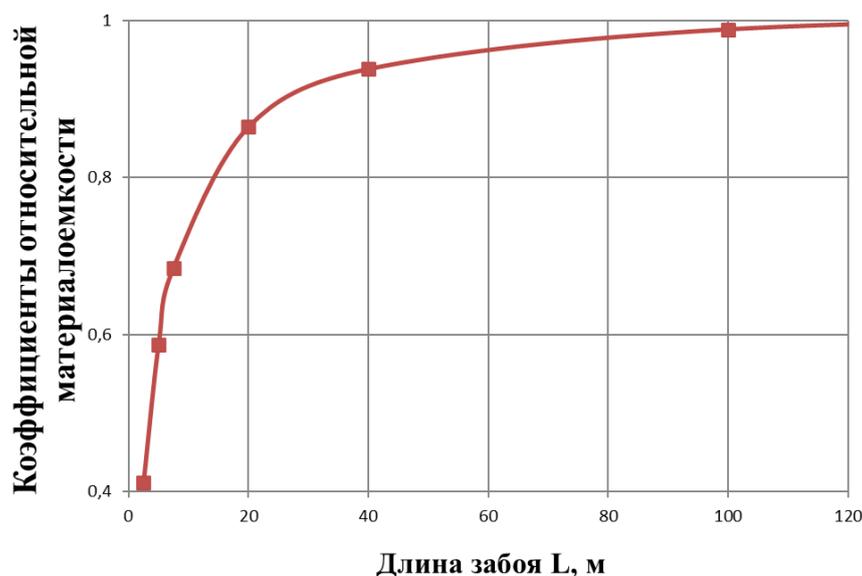


Рисунок 2.2 - Изменение величины коэффициента относительной материалоемкости от длины забоя обрабатываемого УВМ (составлено автором)

Значение коэффициента материалоемкости меньше 1, означает, что при ширине целика до 90 м материалоемкость комплекса меньше, чем материалоемкость штатного оборудования и, следовательно, для обработки целиков УВМ применять целесообразно. Обработка целиков, возможных к извлечению, предусматривает задействование комплекса горного оборудования, работающего по обобщенной технологии, представленной на рисунке 2.3.

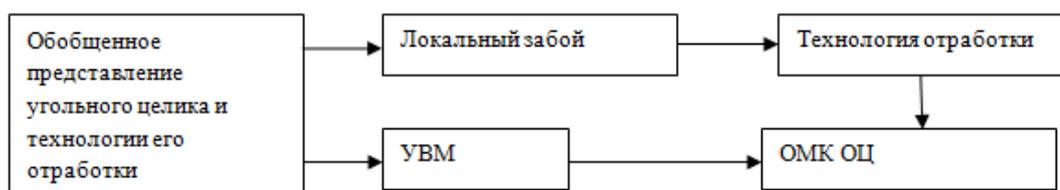


Рисунок 2.3 - Схема реализации технологии обработки запасов в пределах полей действующих шахт (составлено автором)

Учитывая, что размеры забоя и прочностные свойства массивов обрабатываемых целиков [16] могут различаться в разы, а состав операций цикла при обработке целиков включают все операции процесса добычи угля очистными механизированными комплексами, то и предлагаемый вариант комплекса для обработки целиков должен включать комплект технических средств [21, 18]:

- комплект забойных унифицированных выемочных модулей (выполненных на базовой конструкции), который должен обеспечивать избирательный способ отделения угля от массива;

- погрузочно-транспортное средство;

- базовая конструкция для обеспечения поддержания кровли и управления горным давлением.

Технология отработки целиков и других малых участков должна быть:

- согласованной с технологией отработки основных запасов;

- независимой и не осложняющей ведение других горных работ;

- использующей существующие основные и вспомогательные выработки;

- безопасной при ведении горных работ.

Структура, конструктивное исполнение и значение параметров выемочного модуля должны соответствовать структуре и параметрам принятой избирательной технологии обработки забоя и отработки целика в целом и обеспечивать [21, 18, 36]:

- возможность унификации компоновок выемочных модулей на базе несущей конструкции;

- скалывающее воздействие исполнительного органа выемочного модуля на разрушаемый массив в зависимости от его прочности;

- глубина отделяемого слоя скалыванием - до 300 мм

- допустимость стопорных режимов в процессе отделения слоя угля (породы) от массива;

- возможность приложения повторных статико-динамических нагрузок рабочего инструмента к разрушаемому забою;

- возможность непрерывного подавления пыли и охлаждения рабочего инструмента.

Так структура такого комплекса, может быть представлена в виде взаимоувязанных компонентов: унифицированного выемочного модуля, секции механизированной крепи, забойного скребкового конвейера и вспомогательного оборудования.

Длина комплекса (рисунок 2.4) [15] больше ширины обрабатываемого целика на три секции крепи (две секции с учетом шага расстановки). Выемочное устройство (устройство для отделения угля от массива) должно быть связано или крепиться к базовой конструкции. Целесообразно принять за базовую конструкцию СМК и для выемочного модуля.

Секции крепи, является опорной базой унифицированного выемочного модуля (УВМ), выполняет основные для ведения подземных работ функции - поддержание кровли, управление горным давлением, подвигание на забой, зачистка выработанного пространства. Глубина отработки локального забоя меньше шага передвижки секции механизированной крепи и кратна ему. На секциях крепи [21] (за исключением крайних) закреплены манипуляторы с исполнительным органом, а именно унифицированные выемочные модули.

Конструкция секций крепи предусматривает установку ограничителя податливости, который позволяет избежать полного зажатия секции крепи в забое за счет сохранения податливости гидростойки на нижнем пределе, в 50 мм. В случае зажатия секции крепи между кровлей и почвой, ограничитель снимается и секция приобретает податливость достаточную для ее разгрузки и дальнейшей передвижки [96].

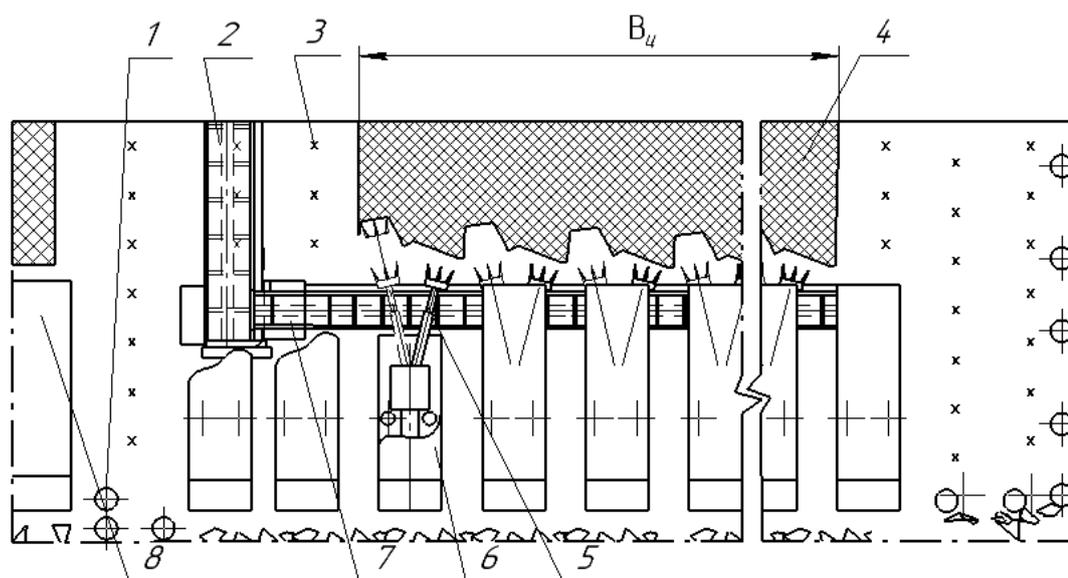


Рисунок 2.4 - Схема расстановки оборудования комплекса отработки целиков [15]  
 1 - стойки крепи выработок; 2 - перегружатель; 3 - положение анкеров; 4 - целик; 5 - исполнительный орган УВМ; 6 - секция механизированной крепи; 7 - забойный скребковый конвейер с режущей цепью; 8 - основной комплекс;  $B_{ц}$  - ширина целика

Скребковый забойный конвейер с зачистным лемехом или с режущей цепью, обеспечивает устранение недостатков при применении агрегатов, рассмотренных в первой главе, а именно погрузку угля, его транспортировку и зачистку почвы. Производительность скребкового конвейера должна согласовываться с производительностью УВМ комплекса, для обеспечения непрерывности работы.

Помимо основных компонентов комплекс оснащается критически важным вспомогательным оборудованием, обеспечивающим защищенность, энергетическую эффективность и непрерывность технологического цикла. Гидравлические насосные станции централизованно питают весь комплекс, исключая рассогласование усилий при скалывании. Система пылеподавления интегрирована в модули, подаёт туманообразную смесь непосредственно в зоны разрушения, снижая запылённость до  $5 \text{ мг/м}^3$  и нейтрализуя риск взрыва метаноугольной пыли. Модуль термометрического и газового мониторинга с датчиками на каждой секции непрерывно анализирует атмосферу забоя, автоматически инициируя аварийное отключение при пороговых значениях ( $>1\% \text{ CH}_4$ ). Кабелеукладчик обеспечивает энергоснабжение и передачу данных без разрывных соединений, сохраняя функциональность при смещениях массива до 200 мм. Центральный контроллер, размещённый вне зоны выемки, синхронизирует работу подсистем через алгоритмы адаптивного управления, корректируя параметры скалывания в реальном времени на основе данных о прочности угля и трещиноватости массива.

### **2.3.1 Гидросистемы унифицированных выемочных модулей**

Гидросистемы унифицированных выемочных модулей требуют обоснованного подбора ключевых компонентов: гидроцилиндров, насосных станций и магистральных трубопроводов. Подбор осуществляется с учётом технических требований, предъявляемых к модулям при их работе в составе очистного комплекса, а также условий конкретного месторождения.

Первоначально осуществляется анализ требуемого суммарного расхода рабочей жидкости, исходя из характеристик всех задействованных цилиндров.

Для этого определяется удельный расход на один модуль, учитывающий работу исполнительных органов в разных режимах (скалывание, подъем/опускание исполнительного органа и стрелы, поворот модуля). Полученные значения расхода затем масштабируются по числу модулей и сопоставляются с производительностью насосной станции, на основе чего рассчитывается требуемое количество станций, обеспечивающих стабильную подачу рабочей среды в систему.

В каждом технологическом контуре производится подбор гидроцилиндров в соответствии с необходимыми усилиями и скоростями движения. Расчёт диаметра цилиндров основывается на достижении требуемого усилия и давления рабочей жидкости, с последующим уточнением длины хода штока. Параметры хода цилиндров и скорость движения определяют характерное время выполнения операций, что, в свою очередь, позволяет оценить пиковые и средние значения величин расхода жидкости в контуре.

При проектировании трубопроводов оценивается длина магистралей с учетом возможных местных сопротивлений и расположения оборудования в очистном забое. На основе допустимой скоростью течения жидкости и заданного расхода определяется внутренний диаметр трубопровода. Также производится проверка режима течения жидкости и оценка потерь давления в трубопроводе, с учетом шероховатости стенок, характера потока и длины линии.

Дополнительно учитывают потери давления на распределительных, регулирующих и запорных элементах, гидрозамках и в сливной магистрали, что позволяет определить общее расчетное давление в системе. На его основе проводится подбор насосного оборудования. Применение насосов во взрывозащищённом исполнении обеспечивает соответствие требованиям безопасности подземных условий эксплуатации.

Таким образом, гидросистема УВМ формируется как сбалансированный комплекс, обеспечивающий надежное функционирование всех исполнительных механизмов. Расчетная база и методология выбора компонентов позволяют адаптировать модуль под конкретные условия добычи, снизить потери энергии и

обеспечить высокую производительность комплекса при отработке угольных целиков. Гидросистемы в составе очистного механизированного комплекса позволяют обеспечить согласованность технологических операций по выемке угля.

### **2.3.2 Технические требования к УВМ**

Структура, конструктивное исполнение и значения параметров выемочного модуля должны соответствовать принятой избирательной технологии отработки забоя при выемке целика [18, 36]. Схема (рисунок 2.5) иллюстрирует логическую структуру унифицированного выемочного модуля комплекса, предназначенного для отработки угольных целиков, и отображает его функционально-техническую компоновку. Центральным элементом конструкции выступает сам комплекс, от которого исходят два ключевых структурных ответвления, определяющих его функциональные возможности. Первое связано с типом исполнительного органа, который выбирается в зависимости от физико-механических свойств массива: к нему относятся органы режущего действия (применяются на мягких углях), ударно-скалывающего действия (на плотных и трещиноватых пластах), а также скалывающего действия, предназначенные для энергоэффективного отделения угля с учётом направленности трещиноватости. Второе направление включает базовую конструкцию, к которой относятся элементы механизированной крепи, совмещённой с механизмом позиционирования и перемещения, что обеспечивает пространственную адаптацию комплекса в забое. Это решение позволяет УМК эффективно функционировать в условиях ограниченного пространства целика. Третье ответвление (на схеме не выделено, но логически вытекает) - система управления и сопряжения с шахтной инфраструктурой, что обеспечивает синхронизацию операций и сопряжение с очистными комплексами. Такая унификация конструкции обеспечивает адаптивность комплекса к различным горно-геологическим условиям при минимальных затратах на переналадку.



Рисунок 2.5 - Структура унифицированного механизированного комплекса для отработки целиков угольных шахт (составлено автором)

Конструкция унифицированного выемочного модуля должна обеспечить:

- свободный проход людей вдоль забоя, при любых положениях выемочного устройства и базовой секции крепи.

- безопасный и свободный доступ к узлам для обеспечения ремонта и технического обслуживания;

- устойчивость УВМ при разгруженной секции крепи в момент его передвижки за счет направляющей и опорной балки при углах залегания пласта  $9^\circ$  и больше;

- единый пульт управления (основной и вспомогательный) может контролировать унифицированный выемочный модуль в штатном режиме. Пульты управления, установленные на обоих сопряжениях, должны иметь блокировку;

- для компенсации падения давления в питающей гидросети, необходимо наличие на УВМ пневмогидроаккумуляторов;

- иметь пылегазозащищенное исполнение;

- возможность унификации компоновок;

- обеспечивать процесс скальвающего воздействия исполнительного органа выемочного модуля на разрушаемый массив, в зависимости от его прочности [18]

с толщиной отделяемого слоя при резании - до 100 мм, толщиной отделяемого слоя при скалывании - до 300 мм [18];

- допускать возникновение стопорных режимов в процессе отделения слоя угля (породы) от массива, как рабочих;

- иметь возможность непрерывного подавления пыли и охлаждение рабочего инструмента.

Секции механизированной крепи, принятые в качестве базовой конструкции при компоновке унифицированного выемочного модуля (УВМ) для отработки целиков, должны соответствовать следующим требованиям [15]:

- наличие индивидуального управления передвижкой секции;
- обеспечивать поддержание кровли и управление горным давлением;
- предотвращать несанкционированные смещения унифицированных выемочных модулей;

- обладать приспособленностью к циклическим перемещениям выемочного комплекса на забой;

- обеспечивать безопасность при ведении горных работ.

Требования к средствам транспорта:

- обладать возможностью работы на криволинейных участках с погрузкой транспортируемой массы в разные виды емкостей и транспортирующих средств;

- быть адаптивными к изменениям геометрических параметров целиков по мере их отработки;

- сохранять устойчивость положения УВМ при максимальных допустимых внешних нагрузках;

- осуществлять зачистку почвы при фронтальном перемещении конвейера комплекса на забой.

### **2.3.3 Обоснование структуры УВМ и параметров**

Избирательные технологии обработки забоя, ориентированные на использование унифицированных модульных комплексов, можно разделить по способу отделения породы от массива на две группы: фронтальную избирательную обработку забоев локальными забоями с отделением породы от

массива резанием (рисунок 2.6 а) [18], и на уступную избирательную обработку локальных забоев с отделением породы от массива скалыванием (рисунок 2.6 б) [18].

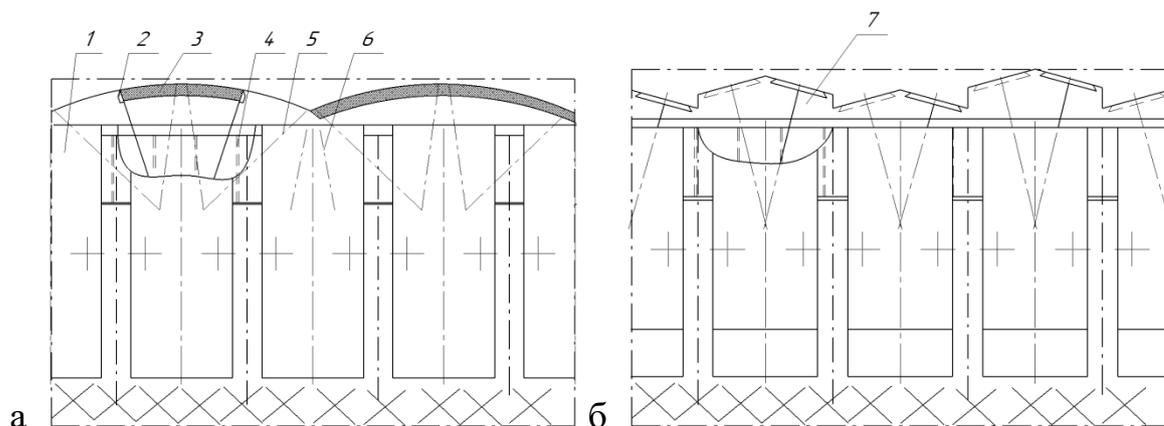


Рисунок 2.6 - Технологии обработки забоя [18]

а) фронтальная, резанием 1 - секция механизированной крепи; 2 - исполнительный орган унифицированных выемочных модулей режущего типа; 3 - угольный массив; 4 - забойный скребковый конвейер с зачистным лемехом; 5 - угол раскрытия рукоятей модуля; 6 - рукояти модуля в режиме ожидания; б) уступная, скалыванием: 7 - исполнительный орган унифицированных выемочных модулей скалывающего типа

К основным особенностям избирательной технологии следует отнести следующие:

- возможность выбора способа разрушения горного массива, типа и параметров исполнительного органа выемочного устройства под конкретные условия локального забоя, обеспечивающих заданную производительность, минимизацию затрат энергии, повышение сортности угольной массы по гранулометрическому составу и снижение интенсивности пылеобразования;

- ослабление прочности забойной части пласта активизацией процесса отжима опережающей выемкой наиболее слабого прослоя по мощности пласта;

- возможность выбора толщины скалываемой козырьком СМК верхней пачки пласта у кровли по условиям её прочности и исключения выхода «негабаритных» кусков;

- профилирование почвы пласта срезанием выступов высотой  $H_{\text{п}}$ , зачистным лемехом или режуще-транспортирующей цепью скребкового забойного конвейера;

- возможность выбора положения в забое первого скола/среза по напластованию или по преобладающей системе трещин, что при одних и тех же параметрах сечения срезов уменьшит удельные затраты энергии;

Уделим внимание уступной технологии, которая позволит применить статические и статико-динамические исполнительные органы за счет избирательной отработки локального забоя.

Понятие «локальный очистной забой» используется для обозначения части общего забоя, параметры и технология работ, на которой, не изменяются или изменяются несущественно (мощность, структура и угол падения пласта), где возможно использование однотипных технических средств, необходимых для реализации принятой избирательной технологии. От значений параметров выемочных средств зависит качество процесса выемки угля: гранулометрический состав угольной массы, минимизация диапазона динамики сил резания и удельных затрат энергии при осуществлении избирательной технологии с использованием унифицированных выемочных модулей в каждом локальном забое [20]. В близких горно-геологических условиях локальные забои могут функционировать согласованно, что позволит объединить их в группы и обеспечивать согласование всех операций процесса выемки по всему очистному забою (по всей ширине целика).

Обычный забой делится на несколько локальных объединенных общим скребковым конвейером. Каждый локальный забой обрабатывается УВМ, совмещенный с секцией крепи, каждый модуль должен выполнять определенные операции, такие как: отделение угля от массива, поддержание кровли и управление горным давлением, перемещение [20], передвижка конвейера максимально близко к забою.

Технология обработки забоя с механическим способом отделения угля от массива включает, в общем случае, следующие операции: образование врубовой

полости; скалывание пачки угля у непосредственной кровли; последующие сколы слоёв угля параллельно почве/кровле пласта; срез слоя у почвы пласта и перемещение забойного оборудования на шаг перемещения СМК в забое [18].

Осуществление отработки угольных целиков совместно с основной добычей возможно только при условии, что отработка забоя целика будет происходить на одной линии с забоем.

Чтобы не было отставания отработки целика от основного забоя необходимо, чтобы длина лавы была не менее 100 метров. Тогда скорость подвигания забоя при отработке целика будет больше или равна скорости подвигания отработки основной лавы штатным комплексом оборудования.

Процесс отработки конкретного целика целесообразно разделить на отработку слагающих его локальных забоев (рисунок 2.7) [20].

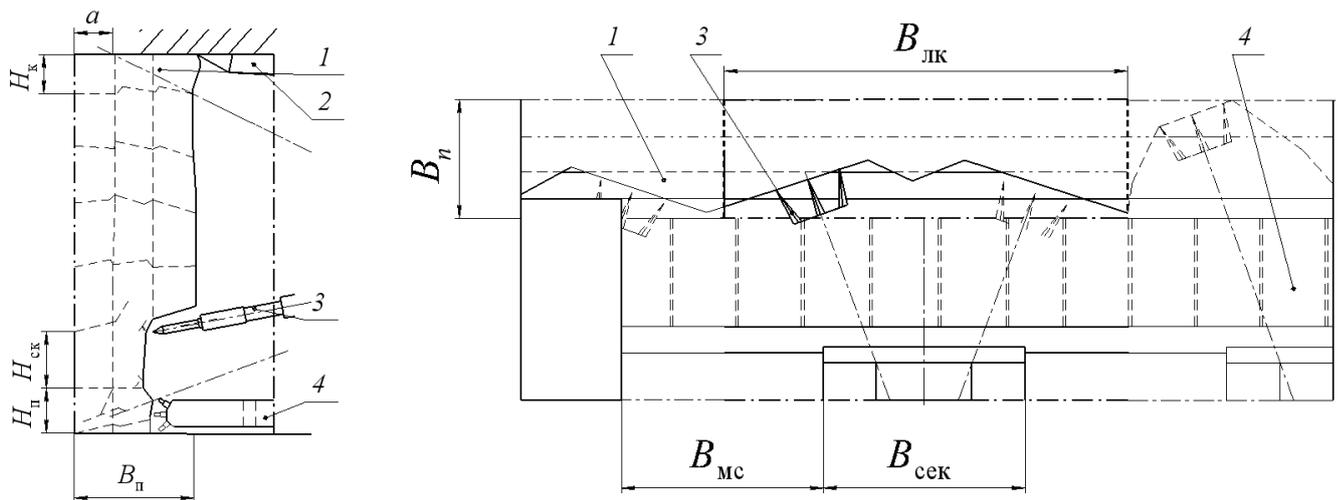


Рисунок 2.7 - Схема локального забоя, уступная технология [20]

1 - угольный массива; 2 - перекрытие СМК; 3 - исполнительный орган УВМ; 4 - зачистной скребковый конвейер с подрезающей цепью;  $B_{лз}$  - ширина локального забоя;  $B_{мс}$  - шаг расстановки секций крепи;  $B_{сек}$  - ширина секции крепи

Необходимо согласовывать процессы в локальных участках забоя с учетом значений параметров технологического процесса и используемых технических средств [20]:

- геометрических параметров локального забоя с параметрами секций механизированной крепи (СМК);

- подвигание локального забоя за цикл добычи согласовано с шагом передвижки соответствующей СМК, установленной в забое, или шагу перемещения части или всего комплекса за цикл по условию крепления кровли в забое.

За исходное принимается положение, при котором СМК и конвейер придвинуты к забою, обеспечивая минимальную ширину призабойного пространства [15].

Отделение угля от массива происходит уступно (рисунок 2.8) крупными сколами, основное усилие по направлению перпендикулярно плоскости забоя или по оси секции крепи. Скол к почве пласта или боковой скол, при этом осевое перемещение секции кратное шагу передвижки секции крепи на часть шага, если 0,9 м, скол 300 мм, будет минимальный удельный расход энергии, минимальное пылеобразование, и, соответственно, заданный гранулометрический состав. Также при отработке на величину шага, или кратную шагу, позволяет козырьку вовремя подхватывать кровлю по мере отработки массива, что позволяет избежать ее вывалов.

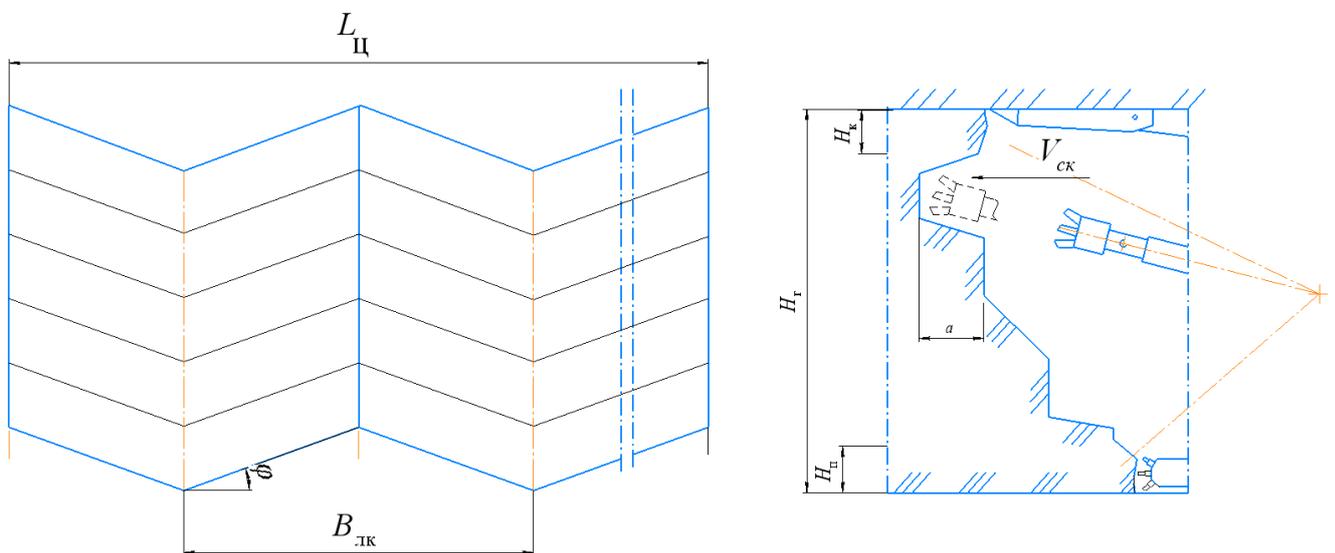


Рисунок 2.8 - Схемы отделения угля от массива (составлено автором)

а) Разделение пласта на слои по мощности пласта; б) Уступная схема отработки забоя

### 2.3.4 Описание технологии перемещения комплекса в локальном забое

Рассмотрим классические схемы перемещения секций крепи:

При осуществлении отработки забоя короткими лавами, плотность установки СМК в забое обусловлена необходимостью жёсткого сопряжения секций с кровлей, что особенно важно при наличии слабосвязанных или слоистых пород. При отработке забоя, шаг расстановки секций механизированной крепи 1 - 1,5 м. Секции объединяются в устойчивые группы по 3-4 единицы, для обеспечения оптимального баланса между управляемостью и устойчивостью кровли. Деление на такие группы связано с возможностями распределения гидравлических нагрузок, синхронизации движения и минимизации деформаций массива. Расстановка секций относительно очистного конвейера выполняется по ступенчатой схеме, обеспечивающей равномерную подачу и отработку угля. Применяются две основные стратегии передвижки: при первой конвейер продвигается фронтально в паузе, с последующей передвижкой секций по группам; при второй - перемещение происходит по волновому принципу, при котором движение начинается последовательно с концевой секции.

Классические схемы передвижки СМК зависят от устойчивости массива и технологической необходимости: слабая кровля диктует более плотную расстановку и дополнительные поддерживающие элементы, тогда как при прочной кровле допускаются более широкие группы и большие шаги передвижки.

Выбор конкретной схемы расстановки и передвижки секций механизированной крепи определяется совокупностью геомеханических факторов, включая вынимаемую мощность угольного пласта, угол его залегания, характер распределения горного давления, а также устойчивость кровли. Наибольшее значение при этом имеют допустимые удельные давления на почву и состояние кровли: при устойчивой кровле возможно применение крупных шагов передвижки до 1,5 м, что позволяет ускорить цикл отработки. Однако при наличии трещиноватой или слабой кровли шаг уменьшается вплоть до 0,65 м и усиливается крепление (например, с помощью анкеров или рамных конструкций). Отработка на пластах средней мощности (1,8-3,0 м) с углами падения до 10° является наиболее распространённой, так как такие геометрические параметры соответствуют наибольшему числу действующих шахт и обеспечивают

стабильность параметров забоя. Автоматизация управления позволяет синхронизировать работу скалывающих модулей с перемещением секций крепи, что особенно важно при отработке целиков, ведущейся параллельно с основной лавой. Выбор схемы также зависит от допустимого объёма скола и скорости выемки (0,25 м/с), что требует учёта кинематики работы исполнительного органа и прочности контактных зон между секциями и кровлей.

С технологической точки зрения важен тип исполнительного органа УВМ. Такое «избирательное» скалывание требует надёжного контроля и выравнивания забоя после каждого прохода, а также мощных секций крепи, способных воспринимать внезапные нагрузки при работе скалывателя. По соображениям безопасности работу дополняют контрольными мероприятиями (фазовый мониторинг давления, установка дополнительных опор).

Технологические аспекты включают необходимость поддержания транспортного конвейера и управления горным давлением секциями крепи: при полностью автоматизированной работе алгоритмы согласуют фронтальную скорость забоя с передвижкой секций. Например, при фронтальной схеме ширина локального забоя и шаг расчёта забоя принимаются равными шагу расстановки УВМ и шагу передвижки СМК.

Передвижка может осуществляться поочерёдно или синхронно с работой исполнительных органов. При автоматизированном управлении применяется упрощённая логическая схема: при достижении заданной глубины скалывания УВМ передаётся сигнал на перемещение крепи.

### **Предлагаемые автоматизированные схемы выемки с разной загрузкой УВМ**

Вариант 1. При полной работе всех имеющихся УВМ на секциях (кроме двух крайних) работают одновременно в каждом цикле. Такое решение обеспечивает максимальную производительность: все исполнительные органы участвуют в скалывании, скорость выемки максимальна. Поддержка кровли осуществляется параллельно работой соседних секций, а передвижка СМК выполняется синхронно - через один, в два этапа. Управление полностью

автоматизировано: секции и УВМ программно согласованы, с контролем давления и остановкой при превышении порогов. Достоинства: наибольшая скорость и полнота извлечения угля при равномерной работе массива.

Вариант 2. При этом варианте активна половина УВМ (каждая вторая), остальные удерживают кровлю. УВМ работают поочередно: после цикла работы одной группы секций другая группа продолжает поддерживать кровлю или перемещается. Таким образом эффективная ширина локального забоя удваивается, но одновременно работают только 50% агрегатов. Управление остаётся автоматическим, но сводится к чередованию групп. Преимущества: баланс производительности и безопасности. Уменьшены одиночные перегрузки на секцию, Целесообразна при умеренной прочности массива - когда кровля менее устойчивая, чем при варианте 1, и требует дополнительной поддержки.

Вариант 3. В этом режиме задействована лишь треть секций, остальные служат исключительно опорой. Локальный забой получается в три шага и охватывает примерно 3 секции по длине. На каждом цикле активная секция скалывает часть угля, а две соседние статично поддерживают кровлю. Такой «щадящий» режим обеспечит максимальную устойчивость забоя: 2/3 массивов удерживаются непрерывно. Достоинства: минимальное нарушение кровли, высокая надёжность системы - служит при критически слабом массиве. Применяется в экстренных случаях - при особо плохом качестве кровли или высоком давлении, когда более активные схемы недопустимы.

До широкого внедрения автоматизации секций они передвигались вручную или по простым полуавтоматическим алгоритмам. Оператор находился у забоя (обычно под неподвижной секцией) и вручную включал гидрораспределитель, выполняя цикл «распор-передвижка-распор» для каждой секции. В полуавтоматическом режиме поддерживались заранее задаваемые позиции, но требовалась постоянная квалифицированная помощь. Такие схемы (с ручным управлением каждого звена) медленны и опасны (оператор рядом с забоем). В современных комплексах их заменили программные системы управления:

предусмотрены автоматический режим работы комплекта и локальное (пооперационное) управление при наладке.

Каждый из вариантов имеет область рационального применения, определяемую балансом между защищенностью и скоростью добычи. Так, при устойчивой кровле и необходимости высокой производительности оправдана схема с применением всех УВМ; при умеренных условиях и желании понизить нагрузки - схема «через один»; при особо неустойчивой кровле - только треть активных модулей.

### **2.3.5 Осуществление вентиляции при отработке целиков**

При отработке пологих пластов системой отработки длинными столбами обычно проводят две параллельные транспортные выработки - вдоль и поперёк падения пласта - которые одновременно служат для проветривания. В таких условиях применяются прямоточные схемы проветривания с отдельной подачей свежего и выводом отработанного воздуха по параллельным выработкам: по одним штрекам (или их участкам) поступает свежая струя воздуха, а по другим - удаляется исходящая струя. При этом иногда допускается наличие «нейтральных» выработок без явного направления потока, поддерживая в них минимальную скорость воздуха по нормам безопасности. Альтернативно используются возвратноточные схемы (рециркуляция), когда часть воздуха, вышедшего из забоев, возвращается в поступающий поток через регулируемые перемычки или воздухопроводы, уменьшая общий расход приточного воздуха. На схеме прямоточного проветривания в целики нередко устанавливают вторую подсвеживающую струю воздуха (так называемое «подсвеживание исходящей струи»), усиливая отвод тепла и метана из забоев.

Особенностью проветривания ленточных целиков (рисунок 2.9) является применение продольных перегородок и местных вентиляторов. Возможно осуществление присечной выработки проходческим комбайном. Продольные перемычки, смонтированные в межцеликовых пространствах или в сдвиговых выработках, направляют свежую и отработанную струю в разные области, формируя чёткий поток воздуха. При этом наблюдается устойчивое сквозное

перемещение воздуха от подачи к отводу. В качестве альтернативы перегородкам устанавливают локальные вентиляторы местного проветривания непосредственно у забоев или в прицельных штреках: они «выкачивают» воздух из тупиковых выработок, усиливая циркуляцию. Многоканальная (параллельная) система подачи позволяет значительно снизить аэродинамическое сопротивление и общий расход воздуха по сравнению со стандартной диагональной схемой.

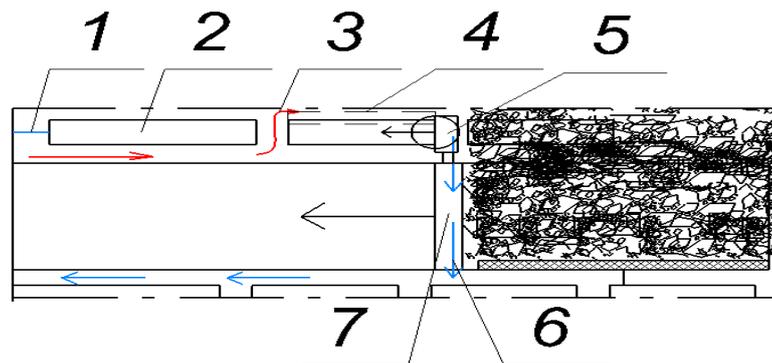


Рисунок 2.9 - Схема проветривания при отработке целиков УВМ комплексом (составлено автором)

1 - перемычка для вентиляции; 2 - целик ленточный, оставляемый между выемочными участками; 3 - свежая струя воздуха; 4 - при необходимости возможно осуществление присечной выработки; 5 - УВМ комплекс; 6 - исходящая струя; 7 - основной комплекс;

При условиях (глубина 400-600 м, мощность 1,8-3,0 м, падение до  $10^\circ$ , низкая метанообильность или склонность к самовозгоранию) предпочтительна прямоточная схема вентиляции с подсвежением (аналог нормативных Технологических схем). Угол падения до  $10^\circ$  обеспечивает практическую горизонтальность работы, что позволяет применять обычную траекторную вентиляцию («сквозной воздух»). При невысокой газообильности и склонности к самовозгоранию важен быстрый отвод тепла и кислорода: прямоточная схема обеспечивает поступление большого количества свежего воздуха напрямую к забою и быстрый вывод отработанного воздуха без рециркуляции. «Подсвежение» отработанного потока (введение дополнительного притока воздуха в возвращаемый поток) устраняет застойные зоны и интенсифицирует разрежение газов. Согласно нормативам, угол до  $10^\circ$  выбран потому, что в этом

диапазоне допускается проведение работ по восстанию и применению прямоточного проветривания.

Ограничения у таких схем связаны главным образом с аэродинамикой и безопасностью. Прямоточная схема требует больших объёмов подаваемого воздуха, поэтому целесообразно разделять панель на блоки: при делении на 2-3 самостоятельных блока суммарное сопротивление падает до 9 раз. Применение рециркуляции (возвратноточной) возможно при высокой метанообильности, когда нужно экономить воздух и отводить метан в изолированном трубопроводе. Но при самовозгорании рециркуляция нежелательна из-за риска задержки тепла. Также нужно учитывать устойчивость кровли: при слабой кровле избегают больших вентиляционных перемычек, поскольку они могут обрушиться и нарушить схему. В целом, выбор схемы проветривания должен соответствовать балансу между обеспечением необходимого микроклимата на забое и сохранением надёжности главной сети.

Для безопасной и эффективной вентиляции целиков необходимо сохранять общую структуру вентиляционной сети ствола и не допускать взаимопроникновения потоков между забоем и главными штреками. Обычно для этого используют регулируемые вентиляционные перегородки и шлюзы в соединительных выработках. С помощью перемычек с регулируемыми окнами можно локально изолировать и направить поток так, чтобы свежий воздух не уходил «туда, где не нужно», а отработанный воздух целенаправленно выводился к отводу. При наличии вспомогательных вентиляционных выработок на границе целика (своеобразных «стеновых» ходов) их предусматривают с постоянным минимальным притоком воздуха не менее нормативного, чтобы избежать образования застойных зон. Важен контроль аэрологической обстановки: датчики устанавливаются в забоях и по периметру целиков, чтобы при любом изменении потоков сразу корректировать положение перегородок или включать резервные вентиляторы. При комплексном подходе - разделении потоков на параллельные каналы и своевременном использовании местных ВМП - обеспечивается плавное функционирование проветривания целиков без нарушения схемы вентиляции

главного пласта. Такая схема предположительно остаётся стабильной даже при отключении отдельных источников, поскольку каждый блок получает свою деленную струю воздуха и не «дожимает» соседние участки.

#### **2.4 Требования к исполнительным органам в уступной технологии**

В связи с широким спектром горно-геологических, геомеханических и технологических условий, сопровождающих работы в очистных забоях (глава 1), обеспечение эффективной добычи полезных ископаемых требует учёта специфики каждого месторождения [21]. При этом универсальный подход к организации очистного процесса остаётся затруднительным. А это значит, что техника для их выемки должна соответствовать следующим требованиям:

1. Предпочтительно обеспечивать избирательную технологию обработки забоев, что обеспечит возможность отработки сложных по структуре угольных целиков с породными прослоями и крепкими включениями;

2. Выемочные средства должны быть модульного исполнения, с возможностью комплектации ими забоев различных по геометрическим и прочностным параметрам;

3. Технические средства должны включать в себя передвижную механизированную крепь, обеспечивающую условия безопасности работы;

4. Должны быть мобильны, удобны в монтаже и демонтаже (быстрый демонтаж и монтаж, перемещение в другой забой).

5. УВМ должен оснащаться: исполнительным органом, базовой конструкции с механизмом перемещения и позиционирования.

Отличительными особенностями процесса отделения полезного ископаемого от массива исполнительным органом УВМ являются [14]:

- разрушение массива осуществляется с открытой поверхности последовательными во времени единичными сколами толщиной  $H_{ск} = 0,1 - 0,3$  м из предварительно фиксированной позиции исполнительного органа;

- поступательное движение исполнительного органа с малой средней скоростью скалыванием  $0,1 - 0,5$  м/с и возможность стопорных режимов, которые не являются аварийным для УВМ состоянием;

- избирательность отделения крупным сколом полезного ископаемого от массива по месту и направлению скалывания с учетом анизотропии прочностных свойств разрушаемого массива.

Процесс отделения угля в зависимости от прочности массива [109] имеет свои особенности:

- форму элементарного скола (прямолинейная);
- направление сколов один к другому и к слоистости пласта (по направлению слоистости, под углом к слоистости);
- форму поверхности забоя в начале цикла выемки (плоская, ломаная из плоских поверхностей, ломаная из сферических поверхностей).

Применительно к уступной технологии рационально использовать исполнительный орган статического или статико-динамического действия, который позволит работать в стопорных режимах, осуществлять отработку крупными сколами, что энергетически эффективнее простого резания. Такой способ отделения угля от массива рационально применять при наличии твердых включений или неравномерности прослоя угольной пачки (то есть наличие замещений угля породой) [15].

Принимаем во внимание, что при крепких породах скалывание пород происходит не постоянной силой, а передачей энергии удара. Целесообразно рассмотреть возможность установки ударника. Его конструкция должна быть динамически уравновешенна с установкой на основании, перекрытии секции крепи, или на промежуточной раме.

Исполнительные органы выемочных машин прошли длительный путь развития от разработки до испытаний и промышленного использования. Для них составлены методики расчета и выбора параметров. При выборе исполнительного органа УВМ необходимо провести обоснование его типа и параметров с учетом опыта в разработке исполнительного органа для очистного механизированного комплекса отработки целиков (ОМК ОЦ) [15]. Применение механического способа отделения угля от массива связано с его экономичностью и простой технической реализацией. Однако для того, чтобы его разработать необходимо,

проанализировать предполагаемые технологии их работы в забое и варианты возможных конструктивно-технических их решений.

Основные положения и значения основных параметров технологий и конструктивных исполнений сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 - Исполнительные органы и условия их применения

Тип исполнительного органа	Прочность разрушаемого массива (Удельная энергоёмкость разрушения) $H_w \cdot 10^{-3}$ , Дж/кг
Ударно-скалывающий Рабочий инструмент: скалыватель	Крепкие угли и атрациты (2000-9600) с сопротивляемостью резанию 240 - 360 кН/м
Режущий, одноосевой, корончатый Рабочий инструмент: резец	Крепкие вязких угли, антрациты, (2000-7200) с сопротивляемостью резанию 180 - 240 кН/м
Режущий, корончатый сферический Рабочий инструмент: резец	Уголь не выше средней крепости (1095-2300) с сопротивляемостью резанию до 180 кН/м
Скалывающий Рабочий инструмент: скалыватель	1000-12000 с сопротивляемостью резанию 240 - 360 кН/м

Для УВМ исполнительный орган с механическим способом разрушения массива режуще - скалывающим Исполнительный орган статико-динамического действия с параметрами: глубина скалывания меньше или равно ширине скола. Принимается технология обработки забоя параллельными полосами с шириной локального забоя, равной шагу расстановки секции крепи, подачей забоя за цикл равной шагу передвижки секции крепи [18]. Допускается скол верхней пачки пласта скалывателем секции механизированной крепи  $H_k$  и допускается формирование врубовой щели  $H_n$ , например, режущей цепью конвейера. Ширина скола равна -  $b$ , Глубина скалываемого куска равна -  $a$ .

Применения исполнительного органа модульного исполнения, дает возможность осуществить быструю его замену при изменении прочностных

свойств массива локального забоя. Предполагается использование исполнительного органа статического скалывающего действия.

Выемочное устройство может крепиться на основание, на перекрытие или на дополнительном устройстве. Располагать выемочное устройство на перекрытии (рисунок 2.10 б), рационально при толщине пласта больше средней в независимости от устойчивости кровли. В таком случае обработка происходит с опережением верхней части забоя нижней и в соответствии с этим создаются условия, при которых, происходит минимизация вывалов, а отработанный сверху участок сразу же подхватывает выдвижной козырек секции крепи. Забой более устойчивый, происходит активный отжим пласта, однако нагрузка на секцию крепи не семерична и происходит отставание конвейера.

Располагать выемочное устройство на основании (рисунок 2.10 а), рационально при малых толщинах пласта, вязких или пластах с прослоями породы и устойчивой кровли. При обработке забой у почвы пласта будет опережать его у кровли, в такой ситуации может возникнуть опасность вывалов негабаритов, что приведет к неустойчивости работ.

При расположении конвейера на основании, лучше было бы, чтобы основание секции крепи подходило под конвейер, а конвейер одной частью лежал на основании секции крепи, а регулируя этот наклон можно следить за почвой пласта.

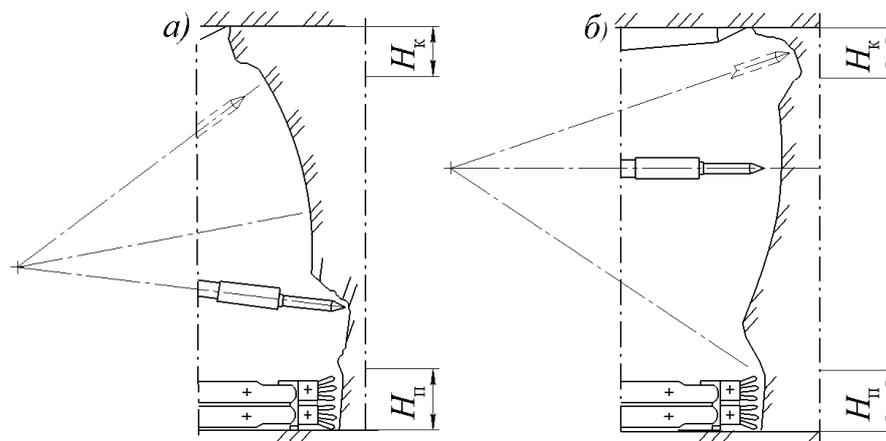


Рисунок 2.10 - Схема обработки локального забоя исполнительными органами выемочного модуля (составлено автором) а) закреплен на основании; б) закреплен на перекрытии

Для средних пластов, с наибольшими запасами, расположение выемочного устройства, рационально крепить на перекрытии СМК.

За цикл принимается продолжительность последовательных операций, необходимых для обработки забоя по мощности пласта ( $H_r$ ) и на шаг передвижки крепи ( $B_n$ ). Рекомендуемый фронтальный способ отделения угля от массива с одновременной отработкой столба параллельными заходками ( $i_n$ ) реализуется следующим образом: режуще-транспортирующая цепь скребкового конвейера подрезает массив на высоту  $H_n$ , при выдвигении козырек секции механизированной крепи скалывает слой массива высотой  $H_{кр}$  у кровли. Оставшаяся часть массива по мощности пласта отрабатывается параллельными сколами исполнительными органами УВМ, которые разрушают массив локальными забоями одновременно по всей ширине целика в направлении подвигания фронта лавы [12].

Время цикла отработки локального забоя определяется выражением (2.1) [18]:

$$T_c = t_{п.н} + t_{п.б} + t_{ох} + t_{ски}, \quad (2.1)$$

где  $t_{п.н}$  - время позиционирования исполнительного органа УВМ в исходном положении по мощности пласта;

$t_{п.б}$  - время позиционирования исполнительных органов по ширине скола;

$t_{ох}$  - время обратного хода исполнительного органа;

$t_{ски}$  - время  $i$ -го скола.

#### **2.4.1 Анализ процесса разрушения угля приложением статических и динамических нагрузок**

Одним из факторов оказывающим отрицательное влияние на работу является процесс изнашивания исполнительного органа УВМ, а именно рабочего инструмента «пики». В первой главе рассматривается вопрос о внедрении клина в полупространство. По аналогии, рассмотрим задачу о внедрении пики (рисунок 2.11).

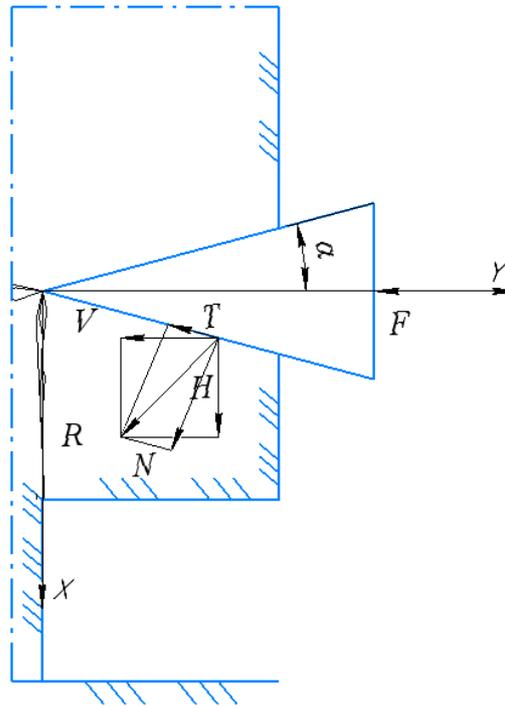


Рисунок 2.11 - Расчетная схема внедрения симметричного клина в уголь  
(составлено автором)

«При внедрении пики в массив вокруг пики образуется напряженная зона. В непосредственной близости от пики породы уплотняются, измельчаясь в тончайшие фракции. Затем появляются трещины, замыкающиеся зонами одинаковых напряжений. При больших углах образования трещин (по отношению к линии напластования) происходит сдвиг слоев или блоков породы в выработанное пространство» [19]

Поместим начало координат в вершину пики. Направим ось  $Y$  по главной оси силы нагружения  $F$ . Угол заострения пики равен  $\alpha$  к линии действия силы нагружения  $F$ .

Рассмотрим общий случай воздействия одиночной с симметричным углом заострения [19] пики при разрушении ей угольного блока, как плоскую задачу.

Силы, действующие на уголь со стороны пики: силы трения на гранях  $T$  и равнодействующая реакции угля  $N$  со стороны пики, также действуют активные силы сдвига  $V$ , которая стремится разрушить уголь за счет сдвига, и сила отрыва  $H$ , которая стремится оторвать кусок от массива. Элементарные силы трения по

всей поверхности пики при ее внедрении в уголь формируют равнодействующее усилие  $T$

На поверхности скола со стороны массива действуют растягивающие и нормальные силы со следующим соотношением (2.2):

$$T = f_{\text{СК}} N = N \cos \alpha \quad (2.2)$$

где  $f_{\text{СК}}$  - коэффициент трения на поверхности скола, обычно равен коэффициенту угла трения материала инструмента о материал забоя  $\varphi$  ( $f = \text{tg}(\varphi)$ ) для данной породы.

Реакция угля со стороны пики  $N$  находится как сопротивление на площадь внедрение пики  $S_{\text{п}}$  (в нашем случае площадь конуса ( $\pi r l$ ), твердости угля  $\rho$  и силы на преодоление внутреннего трения в угле (2.3).

$$N = S_{\text{п}} \rho (1 + \text{tg} \varphi), \quad (2.3)$$

Сила отрыва куска  $H$  (2.4):

$$H = \frac{F}{2} \text{ctg}(\alpha + \varphi), \quad (2.4)$$

Силы сдвига  $V$  (2.5):

$$V = \frac{F}{2}, \quad (2.5)$$

Внедрение пики происходит, если выполняется равенство при силе внедрения больше растягивающей составляющей систему уравнений (2.6):

$$\begin{aligned} \sum x &= fN (\sin \alpha) - fN (\sin \alpha) - N \cos(\alpha) + N \cos(\alpha) \\ \sum y &= -F + N (\sin \alpha) + fN \cos(\alpha) + N (\sin \alpha) + fN_2 \cos(\alpha) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Через решение системы уравнений, находится силы реакций (2.7):

$$N = \frac{F(\cos \alpha - f \sin \alpha)}{2f \cos 2\alpha - (f^2 - 1) \sin 2\alpha}, \quad (2.7)$$

Тогда исходя из формулы (2.2.), расклинивающие усилие  $T$  растягивающие уголь при внедрении пики (2.8):

$$T = N \cos \alpha = \frac{F(\cos \alpha - f \sin \alpha) \cos \alpha}{2f \cos 2\alpha - (f^2 - 1) \sin 2\alpha} \quad (2.8)$$

В таком случае, скос произойдет, когда результирующая сила внедрения пики превзойдет сопротивление угля на разрыв.

Одним из факторов оказывающим отрицательное влияние на работу является процесс изнашивания исполнительного органа УВМ, а именно. В связи с этим был проведен эксперимент по оценке энергоемкости процесса внедрения пики от исходного состояния с углом заострения  $30^\circ$  до предельного с углом заострения  $90^\circ$ .

## 2. 5 Ранжирование критериев отработки целиков

Для того чтобы в полной мере определить проблему, связанную с отработкой целиков, выделим возможные причины неудачного опыта отработки целиков механическим способом, и сгруппируем их по укрупненным группам факторов (критериев), сведя к наглядному виду диаграммы Исикавы (рисунок 2.12).



Рисунок 2.12 - Диаграмма Исикавы, связанная с проблемой отработки целиков (составлено автором)

Такой подход позволяет визуализировать решаемую задачу. Все причины, по которым отработка угольных целиков может быть затруднена, сводятся к шести основным критическим факторам (критериям), понятия которых были

представлены выше: защищенность, энергетическая эффективность, экономичность, производительность, ремонтпригодности и технологичность.

Унифицированный выемочный модуль в составе выемочного комплекса, как и все горнодобывающее оборудование, обладает рядом характеризующих его критериев. Для установления основных из них необходимо проведение морфологического анализа (по методу Делфи). Для чего берем ряд критериев, определенных выше, задаем весовых коэффициенты значимости  $K_i$ , для них основываясь на опыте ведения горных работ, и опираясь на то, что коэффициенты не могут быть равны нулю (таблица 2.2).

Таблица 2.2 - Весовые коэффициенты значимости каждого из критериев (составлено автором)

Критерии УВМ	Нормализация
Защищенность	0,181
Энергетическая эффективность	0,191
Производительность	0,171
Экономичность	0,143
Технологичность	0,152
Долговечность	0,162

Помимо критериев выбираются признаки, по которым будет происходить оценка уровнем важности выбранных признаков (таблица 2.3). Обозначим оценку  $a_i$  и придадим ей численную значимость от 1 до 10, таким образом, шаг между оценкой критерия равен 2.

Таблица 2.3 - Экспертная оценка признаков (составлено автором)

Оценка по частным критериям	Численное значение показателей, $a_i$
Очень важно	10,0-8,0
Важно	8,0-6,0
Нормально	6,0-4,0
Удовлетворительно	4,0-2,0
Посредственно	2,0-0

На основе анонимной оценки пятнадцати экспертов, определим количественную оценку критериев описывающих УВМ и представим полученные усредненные значения показателей в таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Группировка и оценка критериев, возможности отработки целиков  
(составлено автором)

Признаки	Критерии унифицированного выемочного модуля комплекса отработки целиков					
	Технологичность	Защищенность	Энергетическая эффективность	Производительность	Экономичность	Долговечность
Человеческий фактор	7	7,3	3,7	4	3	6
Модульность в исполнении	8	7,3	8,3	4,3	7	4
Своевременное ТО	9,7	8,7	8,7	8	6,3	8,7
Взаимозаменяемость рабочих элементов	8,3	6	8,3	6	8	4
Монтаж и демонтаж	7,7	8,7	6,7	0	7,5	7,7
Адаптивность	3	4,7	8	7,7	3,3	5
Управление горным давлением	0	9,7	8	3,7	6	7
Аварийный план	3,7	7,3	0	0	4,7	0
Капитальные затраты на поддержание выработок	0	5,7	1	0	7,3	0
Необходимость в использовании спец. оборудовании	7,3	8,3	6,7	0	6,3	0
Различные геометрические параметры целиков	0	8,3	4,3	7,3	0	0
Напряженное состояние массива	2,7	8	6,7	5,7	0	7
Неустойчивые кровля, почва боковые стенки	6,3	9,7	7,7	7,3	5	8,7
Сложные горно-геологические условия	6,7	9	6,3	6	6	7
Способ разрушения угля	7	1	5	9,3	8,3	7
Устойчивые режимы работ	1	8	9	9	8,7	9
Качество продукции получаемой	0	0	0	7,5	7,3	0
Технология отработки	7,9	7,3	7,9	7,3	8	6

Продолжение таблицы 2.4

Признаки	Критерии унифицированного выемочного модуля комплекса обработки целиков					
	Технологичность	Защищенность	Энергетическая эффективность	Производительность	Экономичность	Долговечность
Автоматизация	9	9,3	9,3	8,7	8,3	9,3
Рекуперация энергии	7	1	7	6	8,3	5
Переизмельчение п.и.	6	0	2	4	7,3	2,7
Итого $q =$ :	16,5	24,49	23,86	19,12	18,1	16,86

Результирующие показатели критериев оцениваются по следующей формуле (2.8):

$$q = \sum_{i=1}^n a_i K_i \quad (2.8)$$

Проверка на согласованность мнений экспертов, оценивается коэффициентом конкордации по следующей формуле (2.9):

$$W = \frac{12s}{m^2(n^3 - n)} \quad (2.9)$$

где  $m$  - количество экспертов;  $n$  - количество объектов оценки;  $s$  - сумма квадратов отклонений от средней суммы.

Диапазон значение коэффициента конкордации варьируется от 0 до 1, где  $W=0$  - полное несогласие экспертов, а  $W=1$  соответственно полное согласие. В этой работе значение коэффициента конкордации  $W= 0,773$ , что говорит о высокой степени согласованности мнений экспертов по вопросу исследования.

На основе полученных данных строим диаграмму значимости выявленных критериев (рисунок 2.13).

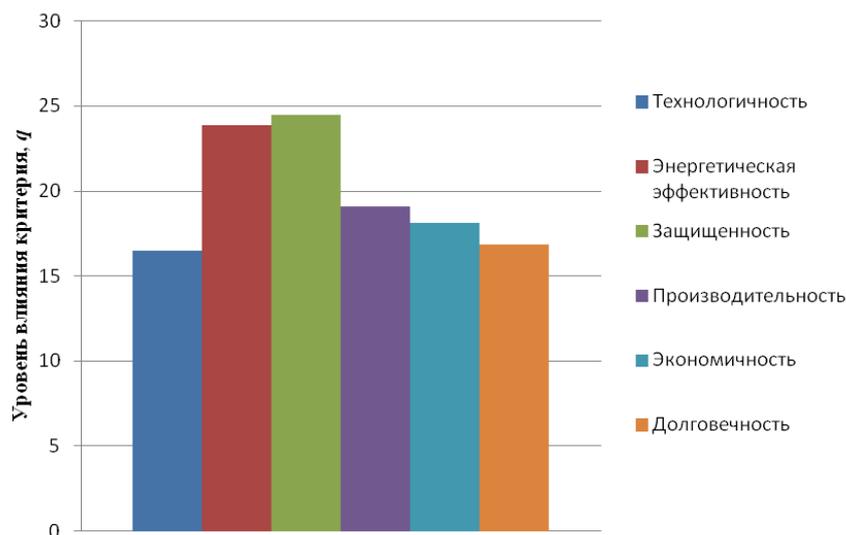


Рисунок 2.13 - Уровень значимости выявленных критериев (составлено автором)

На основе проведенного многофакторного анализа, из нескольких критериев и показателей, характеризующих отработку угольных целиков, критерии защищенность и энергетическая эффективность являются определяющими в планировании технологии добычи угольных целиков возможных к извлечению унифицированными выемочными модулями.

Критерий энергетическая эффективность определяется отношением затрат энергии для отработки угольного забоя унифицированным выемочным модулем к работе горной машины, затраченной в целях получения идентичного объема угля в аналогичных условиях, будет выражаться соотношением (2.10):

$$K_{эф} = \frac{A_{увм}}{A_б}, \quad (2.10)$$

где  $A_{увм}$  - работа одного унифицированного выемочного модуля, совершаемая для получения объема угля, добываемого в пределах шага передвижки;

$A_б$  - работа штатной горной машины, совершаемая для добычи аналогичного объема угля.

На основе сравнения работы, затраченной унифицированным выемочным модулем на отработку площади локального забоя и глубину, равную шагу передвижки ( $A_{увм} = 25,92$  МДж), с соответствующей работой, совершаемой штатным очистным комбайном для пластов средней мощности, например СЛ500, для выемки аналогичного объема угля ( $A_б = 28,2$  МДж), получаем коэффициент

энергетической эффективности, равный  $K_{эф} = 0,92$ . При этом  $K_{эф}$  остается меньше единицы вплоть до ширины целика равным 90 м.

Критерий защищенности формируется техническими требованиями модуля, и определяется совокупностью безразмерных коэффициентов меньшей единицы: Коэффициента деформации кровли (2.11)

$$K_1 = \frac{U_{ф}}{U_{кр}} \quad (2.11)$$

где  $U_{ф}$  фактическое смещение кровли в рассматриваемом забое/локальном забое под действием горного давления;

$U_{кр}$  - критическое смещение, при достижении которого начинает происходить потеря устойчивости крепи или развивается опасное деформирование, недопустимое с точки зрения техники безопасности (для УВМ податливость секции не менее 900 мм);

При  $K_1 < 1$  крепь выполняет свои функции.

При  $K_1 \geq 1$  превышении проектных или нормативных ограничений и требует незамедлительных мер: усиления крепления или снижения горного давления.

В горной практике заранее рассчитывают допустимые величины сближений «конвергенций» кровли, при которых ещё сохраняется эффективность крепления. Утверждение «для УВМ податливость секции не менее 800 мм» означает, что секции крепи должны обеспечивать возможность сближения кровли до 800 мм без потери несущей способности (значение можно установить из паспортных данных СМК, где приводятся диапазоны нормативных прогибов до активации стопорных устройств или до потери несущей способности)

Коэффициент прочности крепи (2.12):

$$K_2 = \frac{\sigma_d}{R_d}, \quad (2.12)$$

где  $\sigma_d$  - действующее напряжение в элементах крепи (например, в гидроцилиндрах, стойках, балках), вызванное горным давлением и силой внедрения модуля;

$R_d$  - допустимый предел прочности материала крепи, гарантирующий отсутствие пластических деформаций при заданном цикле работы (предел прочности материала крепи 690 МПа).

Элементы крепи (гидроцилиндры, колонны, направляющие балки) должны работать при напряжениях, не превышающих допусковых значений, чтобы избежать пластических деформаций или разрушения.

Действующее напряжение  $\sigma_d$  рассчитывается по схеме нагружения: исходя из сил от горного давления, сил внедрения модуля  $F_{ск}$ , реакций от конвейера  $F_{в.кон}$  и секции крепи  $F_{в.к}$ , через гидравлические или механические связи передаётся нагрузка на элементы крепи.

При  $K_2 < 1$  крепь имеет запас прочности и исправно функционирует.

При  $K_2 \geq 1$  существует риск разрушения или пластической деформации элементов крепи.

Коэффициент относительной деформации сечения выработки (2.13)

$$K_3 = \frac{S_d}{S_\phi}, \quad (2.13)$$

где  $S_d$  - допустимое минимальное сечение выработки по нормативным документам (сечения выемочных выработок должны соответствовать условиям транспорта и проветривания  $S_{\min} = 4,5 \text{ м}^2$ );

$S_\phi$  - фактическое сечение выработки.

Для обеспечения надёжного проветривания, транспортировки угля и безопасного прохода людей/техники сечение выработки не должно опускаться ниже нормативного  $S_d$ , так как при  $S_\phi < S_d$  возникает повышенное аэродинамическое сопротивление (затруднено проветривание), заторы транспорта и ухудшение условий эвакуации при аварии.

При  $K_3 < 1$  соблюдены условия транспорта и вентиляции.

При  $K_3 \geq 1$  необходимо расширять выработку или заменить компоновку оборудования.

Коэффициент гарантированного отсутствия смещения модуля (2.14)

$$K_4 = \frac{F_{в.к} + F_{ск} + F_{в.кон}}{F_{ст} + N_p f_{тр.п} + N_p f_{тр.к}}, \quad (2.14)$$

где  $F_{в.к}$  - сила скалывания козырьком крепи, при осуществлении передвижки;  
 $F_{ск}$  - сила внедрения исполнительного органа УВМ при разрушении угля;  
 $F_{в.кон}$  - сила внедрения стороны забойного конвейера;  
 $F_{ст}$  - силы сопротивления, создаваемые стопорным устройством (предотвращающие незапланированные смещения секции крепи);  
 $N_p f_{тр.п}$  и  $N_p f_{тр.к}$  - силы сопротивления секции крепи по почве и кровле (возникают при взаимодействии опорных поверхностей секции крепи с породой).

При  $K_4 < 1$  суммарное противодействие (стопора и силы трения о почву и кровлю) превосходит действующие силы внедрения, в результате чего риск незапланированного смещения близок к нулю.

При  $K_4 \geq 1$  есть риск незапланированного смещения УВМ, что может привести к зажатию оборудования, разрыву гидросистем или даже к обрушению кровли.

$$\left\{ \begin{array}{l} K_1 = \frac{U_\phi}{U_{кр}} < 1 \\ K_2 = \frac{\sigma_d}{R_d} < 1 \\ K_3 = \frac{S_d}{S_\phi} < 1 \\ K_4 = \frac{F_{в.к} + F_{ск} + F_{в.кон}}{F_{ст} + N_p f_{тр.п} + N_p f_{тр.к}} < 1 \end{array} \right. \quad (2.15)$$

Каждый из этих коэффициентов должен быть меньше единицы, в этом случае защищенность гарантирована (2.15).

## 2.6 Выводы по Главе 2

1. Снижение эксплуатационных потерь угля требует вовлечения в разработку тех целиков, извлечение которых возможно без ущерба для устойчивости выработок и безопасности производства. Для этого необходимо рационально подойти к выбору объектов отработки, что достигается путём систематизации и группирования целиков по признакам назначения, геометрии, расположения и возможности извлечения. Проведённая классификация позволяет выделить группу целиков, утрачивающих свои функции и подлежащих отработке, тем самым формируя основу для повышения полноты выемки угля и эффективности работы шахтного поля.

2. В результате проведённого анализа была осуществлена комплексная оценка потенциальных рисков, связанных с функционированием унифицированных выемочных модулей в составе комплекса для отработки угольных целиков. Обосновано, что ключевыми критериями, определяющими эффективность и безопасность применения таких модулей, являются энергетическая эффективность и защищенность. При этом критерию защищенности отводится особая роль, так как он позволяет количественно оценить надёжность отработки целиков посредством совокупности безразмерных коэффициентов, каждый из которых должен быть строго меньше единицы. Соблюдение этих условий является обязательным требованием для гарантированного обеспечения устойчивости горных выработок, предотвращения аварийных ситуаций и безопасного ведения горных работ при внедрении модульных технологий.

3. Унифицированный выемочный модуль демонстрирует энергетическую эффективность при отработке целиков шириной до 90 м. Контроль гарантии и защищенности обеспечивается при соблюдении всех безразмерных коэффициентов защищённости  $K_1, K_2, K_3, K_4$  меньше единицы. Только сбалансированное выполнение обоих условий - защищенности и энергетической эффективности позволяет рекомендовать применение УВМ комплекса для отработки целиков на средних пологих пластах без ущерба для оборудования и персонала.

4. В результате исследования обоснована схема размещения комплекса в забое и приведены ключевые технические характеристики, соответствующие условиям уступной выемки целиков. Технология отработки реализуется последовательным формированием локальных забоев, равных по ширине шагу установки модулей, с образованием уступной структуры обрабатываемого целика. Это позволяет адаптировать комплекс к различным геометрическим параметрам ленточных целиков и обеспечивает полноту извлечения запасов при соблюдении требований безопасности и производственной целесообразности.

5. Рассмотренные варианты загрузки унифицированных выемочных модулей позволяют гибко адаптировать технологию отработки целиков в зависимости от горно-геологических условий, устойчивости кровли и требований к безопасности. Выбор конкретной схемы зависит от компромисса между допустимыми нагрузками на крепь и необходимой производительностью выемки. При этом автоматизированные алгоритмы управления обеспечивают согласованность работы модулей и секций крепи, повышая надёжность функционирования комплекса в различных эксплуатационных режимах. Описанные решения служат технологическим фундаментом для построения структуры процессов, связанных с рациональной отработкой угольных целиков.

6. Организация вентиляции при отработке угольных целиков в системах разработки длинными столбами требует обоснованного выбора схемы проветривания с учётом геологических и газодинамических условий. На основании анализа установлено, что при глубинах до 600 м, средней мощности пластов, неопасных по внезапным выбросам, наиболее надёжной является прямоточная схема с возможностью подсвеживания исходящей струи. Такая схема обеспечивает надёжное проветривание целиков, разрабатываемых параллельно с основным фронтом лавы, поддерживает нормативную скорость воздуха и предотвращает накопление тепла и газа. Разделение вентиляционной сети на участковые и вспомогательные выработки, использование регулируемых переключателей, а также внедрение вентиляторов местного проветривания позволяют гибко управлять воздушными потоками и повышать безопасность. Стабильность и непрерывность схемы обеспечиваются за счёт создания параллельных воздушных контуров и контролируемой изоляции зон отработки.

## **ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ УГОЛЬНОГО МАССИВА СКОЛОМ ПРИ ПРИЛОЖЕНИИ СТАТИЧЕСКОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

### **3.1 План экспериментальных исследований**

Целью экспериментальных исследований, результаты которых приведены в данной главе, является выявление закономерности при внедрении пики в уголь, в зависимости от ее угла заострения.

В соответствии с данной целью сформулированы основные задачи экспериментальных исследований:

1. Разработать и изготовить элементы стенов установки для изучения процесса разрушения напряженного массива внедрением пики.

2. Провести предварительные серии экспериментов, необходимых для определения достаточного количества опытов, и получения достоверных результатов;

3. Провести серии экспериментальных исследований процесса формирования скола, при разрушении угля образованной магистральной трещиной, верифицировать ранее приведенные исследования влияния геометрических параметров скола, определения силовых показателей процесса скола экспериментальным исследованием для оценки их достоверности.

4. Проанализировать полученные экспериментальные данные.

#### **3.1.1 Экспериментальное оборудование и средства контроля для исследования процесса внедрения пик**

Материалы и техническое оборудование для проведения экспериментальных исследований в лабораторных условиях (таблица 3.1).

Таблица 3.1 - Оборудование для экспериментальных исследований (составлено автором)

№ п/п	Используемое оборудование/ материалы/ вспомогательные устройства (сопутствующая информация)
1.	Универсальная машина двухколонная настольного исполнения Zwick/Roell Z100, (Заводской номер/ буквенно-цифровое обозначение 200683/2011, поверка 04.10.2023)

## Продолжение таблицы 3.1

№ п/п	Используемое оборудование/ материалы/ вспомогательные устройства (сопутствующая информация)
2.	Пи́ка с углом заострения 30° (вес 751 г., инструментальная сталь поверки не требует)
3.	Пи́ка с углом заострения 90° (вес 851 г., инструментальная сталь, поверки не требует)
4.	Винтовая струбцина (50x230мм, кол-во 2 шт., поверки не требует)
5.	Весы (цена деления - 0.1 г., погрешность - 0.05 г, приобретены 05.11.2024, поверки не требует)
6.	Пластиковая труба (50x1000мм., приобретена 10.11.2024 поверки не требует)
7.	Груз (вес 855г., поверки не требует)
8.	Жесткая плита (поверки не требует)

## 3.1.2 Планирование эксперимента

Проверка на нормальность полученных результатов измерений, необходима, для применения параметрических методов, осуществлялась для всех полученных в результате экспериментов данных [70].

По тесту Шапиро-Уилка были проверены полученные результаты на нормальность. Этот тест выбран, так как он наиболее точен при малых выборках.

Устанавливается нулевая гипотеза  $H_0$ : данные распределены нормально, затем альтернативная гипотеза  $H_1$ : данные распределены не нормально. Для точности полученных результатов тест проводится с помощью языка программирования python. В программе данные размещаются по возрастанию значений. Запускается программа командой «stats.shapiro(x)», считая значения статистики  $W$  теста, по формуле (3.1):

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^k a_i(j_{n-i+1} - \bar{j}))^2}{\sum_{i=1}^n (j_i - \bar{j})^2} \quad (3.1)$$

где  $a_i$  - коэффициент из таблиц теста Шапиро-Уилка;

$j$  - упорядоченные данные;

$\bar{j}$  - среднее значение данных.

В результате получили следующие данные, представленные в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Результаты теста Шапиро-Уилка (составлено автором)

Параметры	Значения статистики W	Значение p- value	Стандартное отклонение	Нормальность распределения
Усилие пики 30	0,941	0,464	658,06	+
Усилие пики 90	0,922	0,267	542,42	+
Усилие пики 30 в напряженном образце	0,866	0,304	398,37	+
Усилие пики 90 в напряженном образце	0,967	0,980	2124,06	+

Рассчитанные значения  $p\text{-value} > 0,05$ , что подтверждает нормальность распределения данных, опровергающих альтернативную гипотезу, и могут применяться для обоснования выбора угла заострения пики.

Определение необходимого минимального количества повторных экспериментов [70] для обеспечения надежности и точности результатов по ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002 находят, используя формулу (3.1).

Количество экспериментов оценивается, на основе первых 3х пробных замеров по формуле (3.1):

$$n_{\min} \geq \left( \frac{\sigma t}{\bar{a} k_T} \right)^2, \quad (3.1)$$

где  $\sigma$  - среднее квадратическое отклонение измерений;

$\bar{a}$  - среднее значение результатов измерений;

$k_T$  - требуемая точность измерений в относительных единицах;

$t$  - критерий Стьюдента (известная величина, табличный критерий [6]).

Среднеквадратичное отклонение измерений, расчетная величина, зависит от полученных результатов, находится по формуле (3.2):

$$\sigma = \sqrt{\frac{(j_1 - \bar{j})^2 + \dots + (j_n - \bar{j})^2}{n}}, \quad (3.2)$$

где  $j_n$  - величина данных, полученная в ходе испытаний.

При заданной допустимой погрешности в 5% и величине доверительной вероятности  $k_T=0,95$ , при условии, что серии первичных экспериментов состоят из 3х повторений, результаты которых собраны с остальными в таблицы 3.6 и 3.7, критерий Стьюдента будет равен  $t=4.3026527$  (таблица 3.3)

Таблица 3.3 - Критерий Стьюдента [6]

Число степеней свободы $f = n - 1$	$n$	Доверительная вероятность $P_d = 0,95$
1	2	12.7062047
2	3	4.3026527
3	4	3.1824463

Тогда, минимальное и достаточное количество экспериментов, для получения достоверных результатов исходя из формулы 3.1, и имеет следующий вид

$$3 \geq \left( \frac{259,6 \cdot 4.3026527}{2299.506 \cdot 0,15} \right)^2 \rightarrow 3 \leq 3,239.$$

Значения минимального количества необходимых повторений при трех первичных замерах для каждой серии экспериментов представлены в таблице 3.4. В связи, с тем, что расчетное минимальное значение для каждой серии различно, примем количество равнозначных измерений для получения достоверных результатов измерений с образцами под напряжением - 5, а для образцов в виде кусков угля - 13.

Таблица 3.4 - Рациональное количество экспериментов (составлено автором)

Характеристика	Первичное количество повторений	Расчетное минимальное значение повторений	Принятое количество повторения
Усилие пики 30	3	10,117	13
Усилие пики 30		11,861	13
Усилие пики 30 в напряженном образце		3,239	5
Усилие пики 90 в напряженном образце		4,56	5

### 3.2 Экспериментальные образцы для проведения экспериментов

Разрушение угольного массива режущим скальвающим инструментом в исследовательской работе потребовало решения ряда задач. Одной из них было создание условий разрушения угля приближенных к реальным. Как известно, добытый уголь и находящийся в напряженном угольном массиве, а именно целике, имеют различия в механических и технологических свойствах.

В данной работе угольный массив моделировался разрушаемой моделью, схожей по характеристикам и характеру разрушения с угольцементным блоком [18]. Для моделирования массива применялся трехосносжатый блок, который в лабораторных условиях весьма близок к настоящему массиву, находящемуся в напряжении. Блок, далее «образец под нагрузением» (рисунок 3.1), представляет собой кусок угля (марки Д, с месторождения Югра) залитый алебастром (ГОСТ 125-79), так чтобы выровнялся уровень алебаstra и угля, ограниченный коробкой из четырех одинаковых фанерных сторон соединенных между собой. Размер блока 100x100x70 мм. В качестве части блока выбран, алебастр (подвид гипса с формулой  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ), из-за его прочностных свойств аналогичных углю, а именно прочности на сжатие  $\sigma_{\text{сж}} = 4 \text{ МПа}$ .



Рисунок 3.1 - Блок - образец (фото автора)

Напряжение создавалось винтовыми струбцинами во взаимно перпендикулярных направлениях (таблицы 3.1).

Помимо образцов под нагрузением, серия экспериментов так же проводилась на отдельных кусках угля той же марки, далее «образец». Были запланированы лабораторные испытания при динамическом испытании на образец.

В качестве модели исполнительного органа УВМ были приняты одиночные пики с разными углами заострения. В экспериментальных исследованиях энергетическая эффективность связана с усилием внедрения пики в напряженный угольный массив. Это внедрение сопровождается образованием магистральной трещины с образованием крупного скола. В зависимости от угла заострения пики меняется совершаемая ей работа [19] на разрушение. Таким образом, используя соответствие этих величин, возможно, оценить эффективность применения пики с

разным углом заострения. Для проведения эксперимента были изготовлены две пики (рисунок 3.2) с углами заострения  $30^\circ$  и  $90^\circ$ . Пики (2,3 таблицы 3.1) изготавливались из прутка стали Ст. 3, диаметром 20 мм. Выбор пик был основан на том, что пика с углом заострения  $30^\circ$  является начальным углом заострения на рабочем инструменте исполнительного органа унифицированного выемочного модуля, а угол  $90^\circ$  приравнивается к углу, который условно образуется в результате изнашивания рабочего инструмента.



Рисунок 3.2 - Пики с разными углами заострения (фото автора)

Статическое усилие воздействия оценивали на универсальной машине (рисунок 3.3) двухколонного настольного исполнения Zwick/Roell Z100 (1, таблицы 3.4) - предназначенной для растяжения и сжатия образцов.

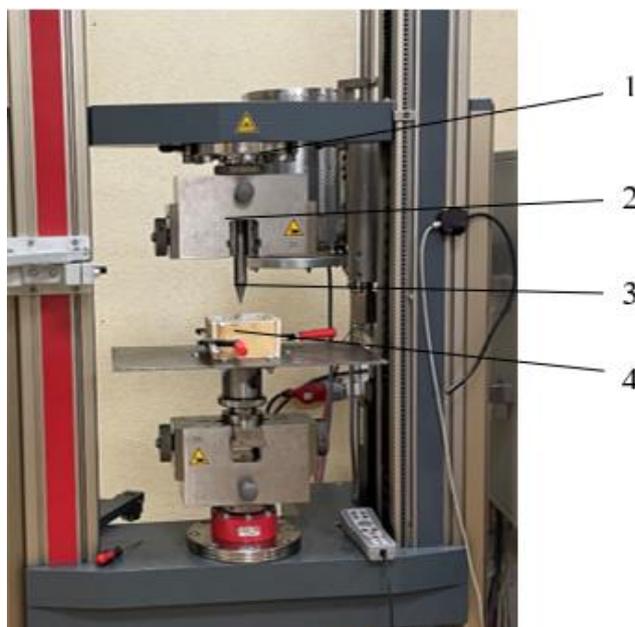


Рисунок 3.3 - Установка для приложения статической нагрузки Zwick/Roell Z100 (фото автора) 1 - захват; 2 - пика (индентор конический); 3 - образец для разрушения (уголь); 4 - стол прессы

Процесс настройки оборудования, через программу testControl для осуществления связи установки с компьютером представлен на рисунке 3.4. Сигналы от датчиков, полученных в результате нагружения, программно обрабатываются штатным компьютером с выводом на печать графиков изменения деформации образца под действием усилия, приложенного к пику.

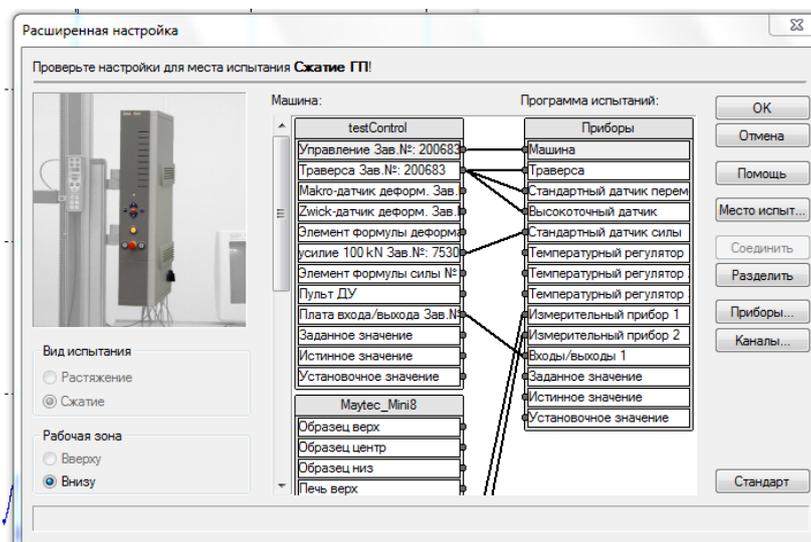


Рисунок 3.4 - Расширенная настройка оборудования, проверка связи машины и компьютерной программы (фото автора)

Серии экспериментов по статическому внедрению проводился следующим образом: установку включали, в захват устанавливали и фиксировали пику с углом заострения  $30^\circ/90^\circ$ , на стол для пресса устанавливали «образец»/ «образец под нагружением», пику подводили к образцу, после чего начиналось внедрение пики в образец с фиксацией изменения усилия внедрения и деформирования образца. По результатам измерений оценивалась работа разрушения.

### 3.3 Экспериментальные исследования приложения при статическом воздействии пики на образец

Первыми были проведены эксперименты на напряженных образцах.

Магистральная трещина распространялась через весь блок. На рисунке 3.5 наглядно видно, что после снятия напряжения, образец распадался на большие куски вдоль полученной магистральной трещины. Отрыв части угольного блока вместе с прилегающим к нему алебастром свидетельствует о возникновении

локализованного напряжённого состояния, которое привело к сколу по направлению внедрения инструмента.

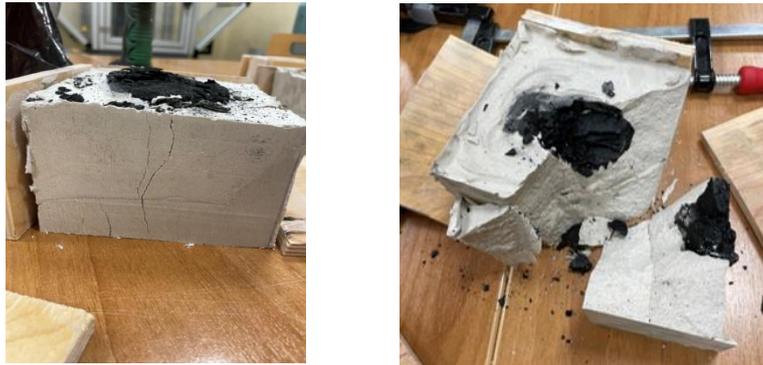


Рисунок 3.5 - Фотографии образцов в напряженном состоянии после разрушения  $30^\circ$  (фото автора)

Помимо пики с углом заострения  $30^\circ$ , также проводились исследования внедрения пики с углом заострения  $90^\circ$  в напряженный образец. Можно увидеть, что из-за увеличенного угла пики, уголь в месте контакта с пикой крошится. После снятия нагружения с блока, образец также развалился, но уже на чуть большее количество частей рисунок 3.6.



Рисунок 3.6 - фотографии образцов в напряженном состоянии после разрушения пикой  $90^\circ$  (фото автора)

Эксперимент останавливался с появлением ярко-выраженной трещины, проходящей через весь образец. Магистральная трещина, инициированная в результате статического внедрения в угольный пласт, прогрессирует через угольную матрицу с последующим распространением в прилегающую алебастровую формацию.

В результате проведения экспериментов были получены зависимости, представленные на рисунке 3.7 [19].

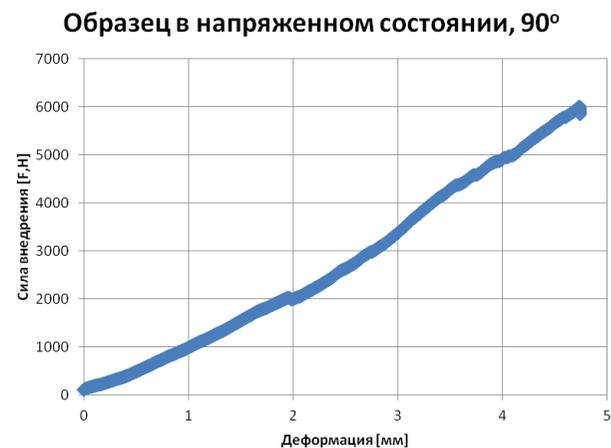
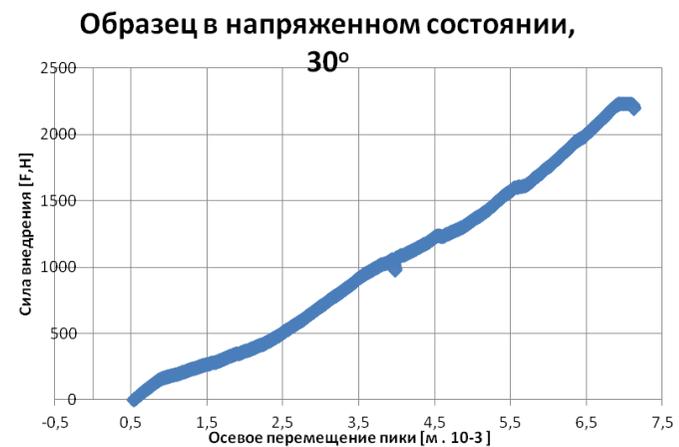
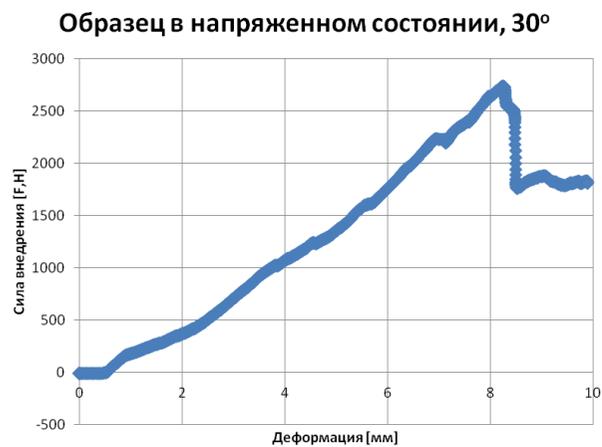


Рисунок 3.7 - Зависимости изменения силы внедрения и деформирования образцов в напряженном состоянии (составлено автором)

Помимо полученных графиков при обработке результатов экспериментов была оценена работа на разрушение интеграцией графиков нагружения вплоть до разрушения. Результаты этих экспериментов представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 - Серия экспериментов с образцами в напряженном состоянии (составлено автором)

Угол заострения пики	Максимальное усилие	Работа	Вес образца
30	2738,74	70699,42	653
30	1925,39	77163,16	642
30	1890,50	15925,03	651
30	2207,82	18821,84	639
30	2661,19	106651,5	650
90	6005,8	136848,42	648
90	9452,72	248867,69	654
90	4198,83	52414,15	654
90	4933,38	112412,21	643
90	7258,71	164397,28	652

Помимо экспериментов с образцами в напряженном состоянии были проведены серии экспериментов на ненапряженных образцах угля в виде отдельно взятого куска (рисунки 3.8 а, б).

При внедрении пики разрушение образцов сопровождалось характерным звуком и появлением магистральной трещины, разрушающей образец на два крупных куска, что указывает на хрупкий характер разрушения.

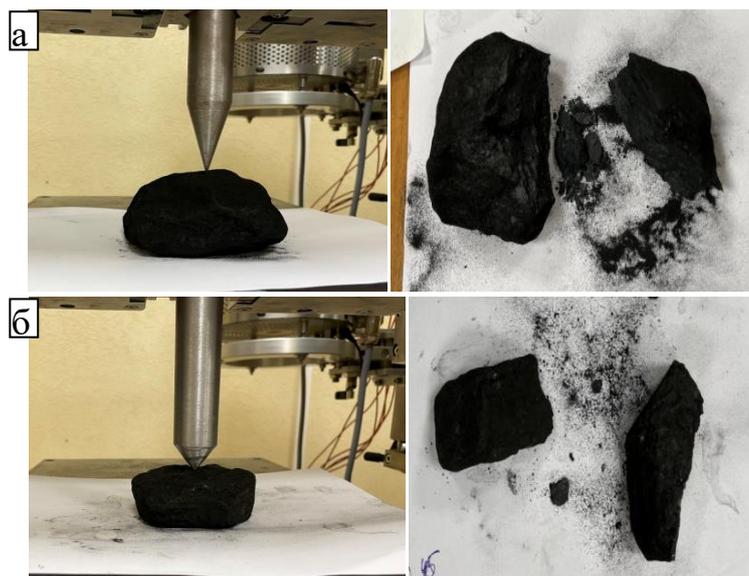


Рисунок 3.8 - Фотографии образцов до разрушения и после (фото автора)

Так же, как и впервой серии экспериментов были получены зависимости силы внедрения при разрушении образцов, находящихся в напряженном состоянии (рисунок 3.9).

Работа разрушения образцов оценивалась интегрированием площадей под графиками. Результаты серий экспериментов сведены в таблицу 3.6.

Таблица 3.6 - Результаты серии экспериментов на отдельных кусках (составлено автором)

Угол заострения пики	Максимальное усилие	Образование трещины магистральной	Работа	Вес образца (с коробкой)
30	2539,57	+	36133,93	357
30	675,18	+	969,50	184
30	1865,1	+	19860	311
30	810,01	+	1525	194
30	736,12	+	9560	197
30	1501,12	+	10500	288
30	1111,17	+	12000	256
30	1309,03	+	15241	266
30	1588,08	+	18007	263
30	1865,21	+	19860	301
30	1717,87	+	22310	287
30	2612,06	+	26512	357
30	2194,5	+	28503	334
90	2920,68	+	8126,3	113
90	1297,98	+	2179,5	97
90	1676,42	+	4446,1	174
90	1521,78	+	2925,45	101
90	1571,92	+	3404,21	104
90	1672,056	+	4027,84	98
90	2294,95	+	5075,05	167
90	1704,4	+	5704,01	181
90	2674,04	+	5200	182
90	2000,01	+	5100	125
90	2224,08	+	5898,66	173
90	2559,22	+	6722,27	161
90	2784,71	+	7565,88	186

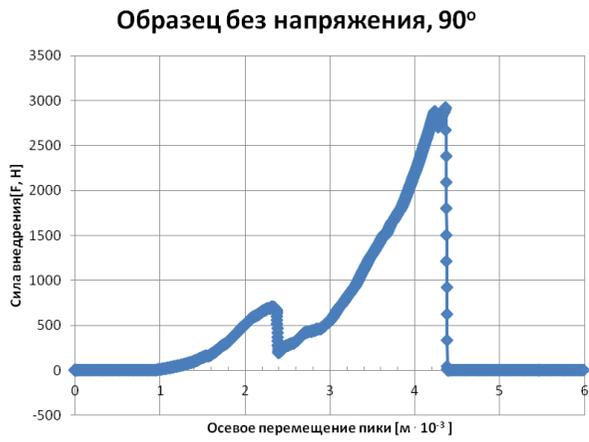
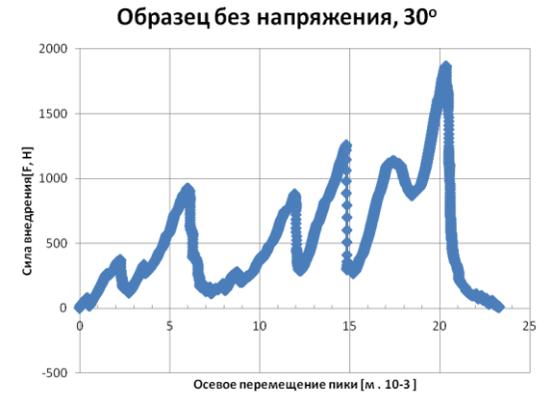


Рисунок 3.9 - Изменение силы внедрения при разрушении образцов (составлено автором)

Сравнивая результаты серий экспериментов, проведенных на «образцах» и на «образцах под напряжением», можно заметить схожесть процесса разрушения по характеру и диапазону затрачиваемых усилий. Так можно сделать вывод о соответствии полученных результатов и возможности проведения дальнейших исследований на отдельных кусках угля [19].

Сводя полученные данные, о работе разрушения, приведенные в таблицах 3.5 и 3.6 и аппроксимируя их линейными функциями, получим зависимости, увязывающие между собой усилие внедрения и работу разрушения пиками с углом заострения  $30^\circ$  и  $90^\circ$  (рисунок 3.10).

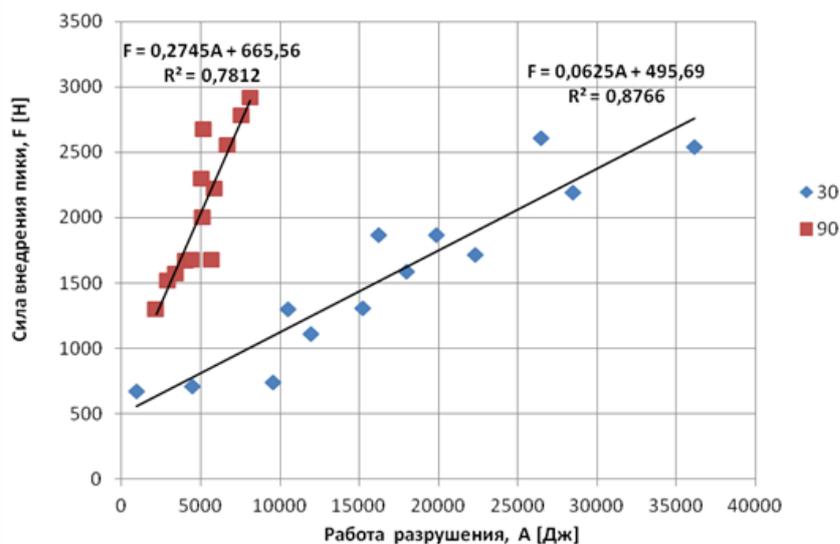


Рисунок 3.10 - Отношение силы к работе (составлено автором)

Линии тренда для пик с разными углами для  $90^\circ$   $F = 0.2745A + 665,56$  и для  $30^\circ$   $F = 0.0625A + 495,69$  имеют высокий коэффициент детерминации,  $R^2$ , что говорит о наличии реальной взаимосвязи между усилием внедрения и совершаемой работой.

Сравнивая усилия внедрения пика с равной для их осуществления работой, получим график, представленный на рисунке 3.11. Анализ результатов экспериментов процесса показал, что внедрение пика с углом заострения  $30^\circ$  в 5 раз эффективнее, чем внедрение пика с углом заострения  $90^\circ$  при одной и той же затраченной работе [19]. Иными словами, стала заметна разница в приложении определенного количества силы для осуществления одного и того же объема работы.

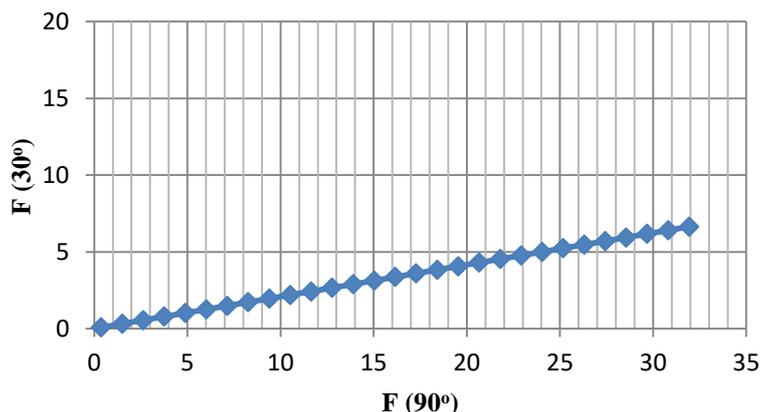


Рисунок 3.11 - Соотношение приложения сил при одинаковой работе двух пик (составлено автором)

Сравнивая данные результатов экспериментов с материалами профессора Федорова Д.И., представленными в первой главе настоящей работы, можно сделать вывод, что допускать величину предельного износа пики вплоть до угла заострения  $90^\circ$  не целесообразно. Предельно допустимым углом заострения пики следует считать угол в  $40^\circ$ - $45^\circ$ , когда зависимость изменения усилия внедрения от глубины имеет линейный характер.

Помимо экспериментальных исследований внедрения пики под действием статического усилия, была проведена качественная оценка разрушения угольных образцов динамическим воздействием пики на стенде (рисунок 3.12), включающем 1 - трубу высотой два метра, 2 - непосредственно образец угля, 3 - жесткую металлическую подставку для направления кинетической энергии падения только на разрушения, предотвращающая потерю энергии на работу упругих сил.

При проведении эксперимента устанавливались допущения:

- взаимодействие пики и падающего груза, рассматривались как абсолютно неупругое;
- вся энергия груза полностью передается разрушаемому образцу.

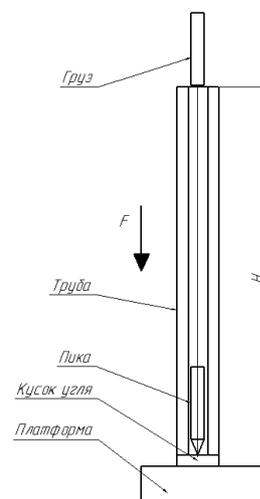


Рисунок 3.12 - Собранный стенд для испытания динамического воздействия  
(составлено автором)

Величина динамического воздействия пики на уголь оценивалась по формуле (3.3):

$$F = \frac{m\sqrt{2gh}}{t} \quad (3.3)$$

где  $t$  время падения груза находится по формуле  $t = \sqrt{\frac{2g}{h}}$

$m$  - масса груза;

$h$  - высота свободного падения груза;

Так как высота падения всегда одна, то сила воздействия будет зависеть от угла заострения и массы. Результаты эксперимента представлены в таблице 3.7

Это подтверждается, тем, что уже при первом ударе груза о пикку 30° происходит образование скола, а при 90° с первого удара, нет.

Таблица 3.7 - сводная таблица при динамическом воздействии пики на угольный образец (составлено автором)

Угол заострения пики	Кол-во ударов до разрушения	Сила удара	Вес образца
30	2	5,93	653
30	2		642
30	1		651
30	3		639
30	2		650
90	12		648

*Продолжение таблицы 3.7*

Угол заострения пики	Кол-во ударов до разрушения	Сила удара	Вес образца
90	13		654
90	12		654
90	11		643
90	12		652

Было установлено, что при проведении эксперимента, недостаточно времени для образования трещины для разрушения угля на крупные куски, однако при нанесении удара по куску угля, происходит откол маленьких угольных частиц, кусок угля раскалывается, но не перпендикулярно наслоению в результате его происхождения, а вдоль осадочных слоев (то есть трещина начинает свое распространение перпендикулярно напластованию, а потом разворачивается вдоль него), и приводит к переизмельчению угля.

Проведенная серия экспериментов по динамическому воздействию пики на кусок угля показала, что при приложении одного и того же усилия при динамическом воздействии на образец осуществляемая работа меньше, чем при приложении статической нагрузки. Так для пики с углом заострения  $30^\circ$  эта величина составляет 12.7 раза, а для пики с углом заострения  $90^\circ$  только в 2.6 раза. Однако приложение только динамической нагрузки приводит к переизмельчению угля, поэтому рационально совместить два способа приложения нагрузки статический и динамический [19].

### **3.4 Выводы по Главе 3**

1. Применение пик с углами заострения  $30^\circ$  и  $90^\circ$  позволило оценить влияние изменившейся формы инструмента на энергетические параметры процесса разрушения, что формирует основу для выбора оптимальной формы рабочего органа в составе унифицированных выемочных модулей. Полученные результаты позволяют обоснованно проводить дальнейшие исследования, включая оценку эффективности динамического и комбинированного режимов внедрения в зависимости от условий массива.

2. Результаты экспериментальных исследований показали, что статическое внедрение пики с углом заострения в  $30^\circ$  в 5 раз требует меньших усилий, чем с

углом заострения в  $90^\circ$  при совершении одной и той же работы. А высокий коэффициент детерминации, показывает плотность связи при проведении экспериментальных исследований.

3. При внедрении пики в уголь с созданием одного и того же осевого усилия динамическое воздействие эффективнее для пики  $30^\circ$  в 12,7 раз, а для пики в  $90^\circ$  только в 2,6 раз. Динамическое приложение нагрузки без статической составляющей приводит к переизмельчению угля, поэтому рационально совмещать приложение, как статической, так и динамической нагрузок при разрушении забоя.

## **ГЛАВА 4 ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО СПОСОБА ОТРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ ЦЕЛИКОВ ПРИГОДНЫХ К ИЗВЛЕЧЕНИЮ**

Изложенные в данной главе материалы являются результатом теоретических и экспериментальных исследований по обоснованию структуры и параметров унифицированного выемочного модуля комплекса для отработки целиков, в частности установление технических и технологических параметров УВМ. Результаты исследований опубликованы в работах [15, 19, 20, 18, 21, 22, 36, 57, 58] и могут быть применены при отработке целиков угольных шахт с разными горно-геологическими условиями.

### **4.1 Конструкция унифицированного выемочного модуля**

В составе очистного механизированного комплекса унифицированный выемочный модуль (УВМ) функционирует, как специализированное выемочное устройство для фронтальной отработки угля в забоях различной протяжённости. Модули комплектуются исполнительными органами, реализующими разрушение массива статическим, динамическим либо комбинированным способом, в зависимости от горно-геологических условий. Конструктивно они размещаются на базовой конструкции. В очистном забое в качестве нее выступает секция механизированной крепи. УВМ может размещаться как на каждой секции, так и через одну, также возможно размещение на индивидуальной платформе. При разрушении высокопрочной породы система выдерживает значительные нагрузки за счёт опирания на несущие элементы крепи и применения гидропривода. При этом при возникновении стопорных режимов функционирование УВМ не сопровождается остановкой оборудования.

Очистной механизированный комплекс с унифицированными выемочными модулями для отработки ленточных целиков, возможных к выемке представлен в техническом решении [57] по повышению устойчивости технологии отработки угля и безопасности работ, предотвращающем незапланированные смещения базовых конструкций УВМ путем модернизации секций крепи стопором. В исходном положении секции полностью придвинуты козырьком к забою, а основанием к зачистному скребковому конвейеру с подрезающей цепью. При

осуществлении выемки угля сколом, секция крепи распирается в почву и кровлю для обеспечения достаточного сопротивления перемещению при внедрении рабочего инструмента исполнительного органа УВМ угольный массив. Как описывалось во второй главе, выемка осуществляется параллельными полосами шириной равной локальному забою на полную мощность целика вплоть до отработки на шаг передвижки. После выемки угля на ширину шага передвижки секции крепи осуществляют фронтальную передвижку на забой скребкового конвейера.

Передвижка секции крепи осуществляется в следующей последовательности: снятие распора гидростоек секции крепи с передачей усилия на основание. После снятия распора с основания и перекрытия подвигание на забой осуществляется за счет гидродомкрат по основанию. Он подвигает секцию крепи на забой, при этом поворотный стопор, установленный на направляющей основания секции, вдавливается в почву пирамидальным концом с помощью домкрата механизма прижатия. Такой механизм предохраняет основание секции и забойного конвейера от незапланированных смещений [57].

Производительность комплекса складывается из производительностей выемочных модулей с учетом времени и последовательности выполнения основных и вспомогательных операций за цикл работы модулей и комплекса [15].

В общем случае конструкция модуля (рисунок 4.1) включает в себя совокупность технологических компонентов, каждый из которых обеспечивает реализацию определённых операций в процессе скалывания угля. В состав модуля входят: опорная база, выполненная на основе секции механизированной крепи поддерживающе-оградительного типа; поворотная турель, являющаяся несущей частью конструкции; манипулятор с механизмами поворота и подъёма; скребковый конвейер с подрезающей цепью для формирования врубовой щели; быстро сменяемый исполнительный орган статического либо статико-динамического действия (в зависимости от прочностных характеристик массива); а также элементы вспомогательной оснастки, включая козырёк со скалывателем и стопорное устройство.

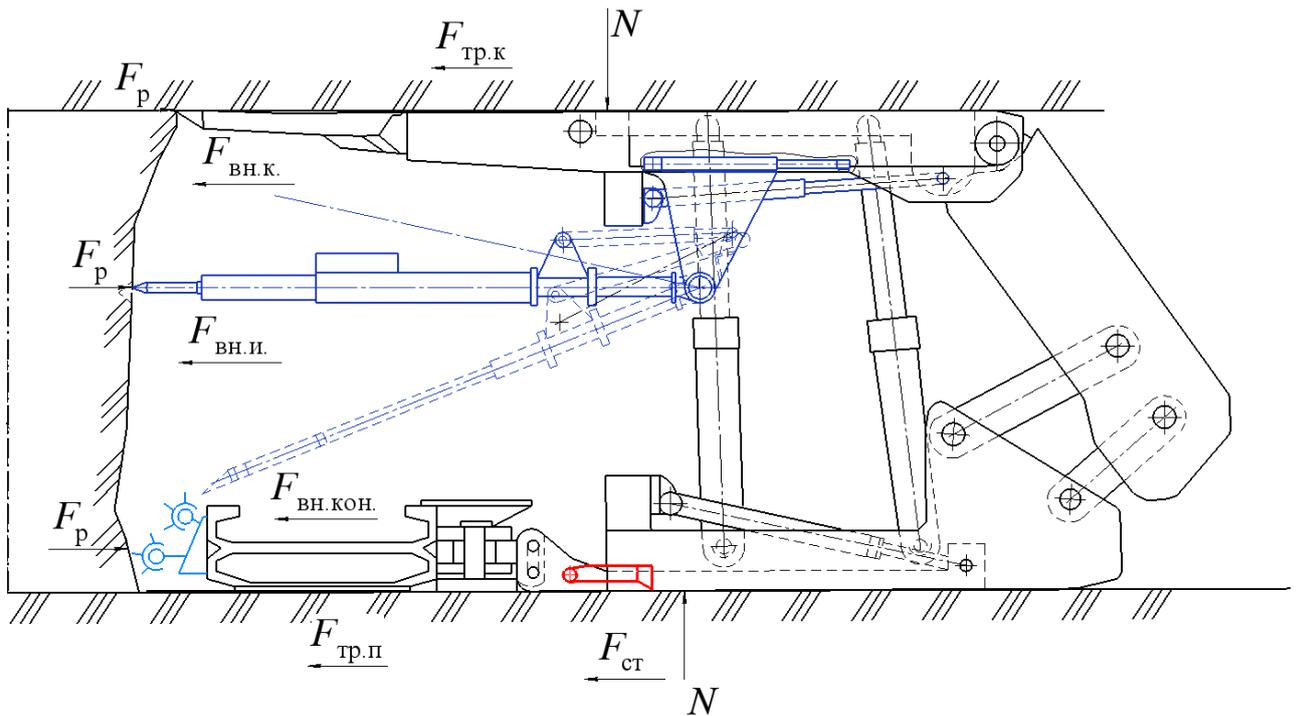


Рисунок 4.1 - Унифицированный выемочный модуль комплекса (составлено автором)

$F_{ск}$  - сил внедрения модуля;  $F_{в.кон}$  - сил внедрения конвейера;  $F_{в.к}$  сил внедрения козырька крепи;  $N_p f_{тр.п}$ ,  $N_p f_{тр.к}$  - силы сопротивления секции крепи о почву и кровлю;  $F_{ст}$  - сила сопротивления стопорного устройства

Крепление УВМ осуществляется через систему направляющих и опор на перекрытии секции механизированной крепи. Основной агрегат - турельный узел - жестко соединён с перекрытием секции и обеспечивает поворот исполнительного органа как в горизонтальной плоскости, так и в вертикальной. На торце турели размещён кронштейн, в котором посредством пальцевого соединения фиксируется исполнительный орган. Такая компоновка обеспечивает модульное исполнение исполнительного органа УВМ при переходе к отработке участков с другими горно-геологическими условиями.

Выбор типа исполнительного органа - статического или статико-динамического - определяется прочностными и структурными параметрами целика. При разработке малотрещиноватых, плотных углей предпочтение отдаётся исполнительному органу динамического типа. В условиях трещиноватости и слоистости массива целесообразно использовать

исполнительный органа статического действия.

Также при осуществлении выемки, стопорные устройства [57] предотвращают незапланированные смещения, благодаря этому повышается устойчивость секций при движении, а так же обеспечивается защищенность в забое. Стопорное устройство устанавливается на основании секции крепи (рисунок 4.2).

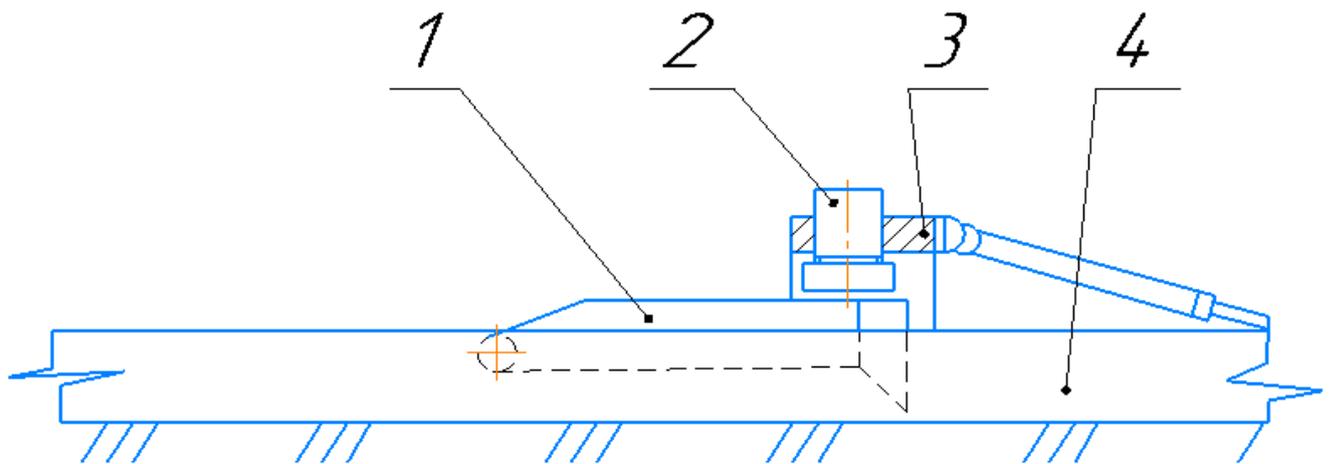


Рисунок 4.2 - Стопорное устройство [57]:

1. Стопор;
2. Прижимное устройство;
3. Портал;
4. Направляющая СМК крепи;

#### 4.2 Основные технико-технические параметры УВМ

Отработка угольного целика осуществляется, за счет отработки локальных забоев, которые его составляют. Выемка целика происходит по последовательной или шахматной схеме, при которой унифицированный выемочный модуль (УВМ) производит разрушение массива локального забоя путём поэтапного скалывания угля. Процесс ведётся от врубовой щели, сформированной в почве с помощью забойного скребкового конвейера, вверх по напластованию в сторону кровли (рисунок 4.3).



Глубина локального забоя при этом принимается равной шагу передвижки секции крепи ( $B_{\text{п}}$ ), что позволит, опираясь на кинематике базовой конфигурации УВМ, обеспечить согласованность работы секции крепи с продвижением фронта очистных работ.

Количество УВМ для отработки целика, зависит и изменяется с учетом геометрических параметров целика (4.2):

$$n_{\text{УВМ}} = \frac{B_{\text{ц}}}{B_{\text{лз}}} \quad (4.2)$$

Для УВМ установлены рациональные диапазоны технологических параметров режима скалывания, обеспечивающие устойчивость работы исполнительного органа и эффективность разрушения массива:

Мощность и глубина скола -  $H_{\text{ск}} = 0,1 - 0,3$  м

Глубина скола -  $a = 0,1 - 0,3$  м

Скорость скалывания исполнительным органом УВМ  $V_{\text{ск}} = 0,1 - 0,5$  м/с

Конкретные параметры выбираются в зависимости от свойств разрушаемого массива и размеров реального забоя.

Сумма высоты сколов по мощности пласта на мощность  $H_{\text{ски}}$  за цикл должна быть равна мощности пласта (4.3):

$$H_{\text{г}} = H_{\text{к}} + H_{\text{п}} + H_{\text{ски}}, \quad (4.3)$$

где  $H_{\text{к}}$  - мощность слоя, скалываемого козырьком СМК у кровли, м;

$H_{\text{п}}$  - мощность слоя угля, зачищаемая конвейером с почвы пласта, м (рисунок 4.4);

$H_{\text{ски}}$  - мощность  $i$  - скол, м.

По выбранным параметрам разрушения забоя, геометрически выбирается количество сколов по мощности пласта, на допустимую величину внедрения (4.4):

$$n_{\text{ск}} = \frac{H_{\text{г}} - H_{\text{к}} - H_{\text{п}}}{H_{\text{ск}}}, \quad (4.4)$$

Шаг передвижения СМК должен быть кратным глубине скола  $H_{\text{ски}}$  и может быть выражен через глубину скола (4.5) [20]:

$$B_{\text{п}} = H_{\text{ски}} n_{\text{ски},h}, \quad (4.5)$$

где:  $n_{\text{ски},h}$  - количество сколов по глубине забоя за цикл.

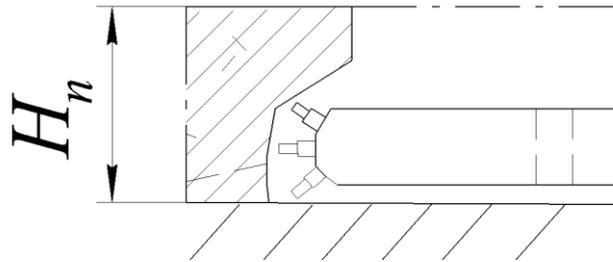


Рисунок 4.4 - Щель, подрезаемая цепью конвейера (составлено автором)

При разрушении хрупких углей с сопротивляемостью меньше 200 кН/м, количество сколов (на пластах средней мощности  $H_r = 1,8 - 3,3$  м) целесообразно принимать  $n_{ск} = 4 - 6$ .

Зависимость длины обрабатываемого целика  $L_{ц}$ , минимальной высоте скола  $H_{ск.min}$  шириной локального забоя  $B_{лз}$ , длиной скальваемого ряда исполнительным органом и максимального значения количества рядов сколов  $n_{ск}^{max}$  можно определить необходимое количество циклов работы гидроцилиндра исполнительного органа (4.6)

$$n_{ц.ск} = K_3 \frac{L_{ц}}{B_{п}} n_{ск}^{max}, \quad (4.6)$$

где  $K_3=1,3$  - коэффициент запаса ресурса;

Гидроцилиндр исполнительного органа УВМ предполагает возможность бесперебойной работы на всю длину столба, которая может быть больше 3 км, поэтому рационально закладывать ресурс, превышающий расчетный хотя бы в 3-4 раза.

Длительность снятия одного скола ( $T_c$ ) находится по формуле (4.7) [15]:

$$T_c = t_{п.н} + t_{п.б} + t_{ох} + t_{ски}, \quad (4.7)$$

где  $t_{п.н}$  - время позиционирования исполнительного органа УВМ в исходном положении по мощности пласта, с;

$t_{п.б}$  - время позиционирование исполнительных органов по ширине скола, с;

$t_{ох}$  - время обратного хода исполнительного органа, с;

$t_{ски}$  - время  $i$  - го скола, с.

Количество сколов в ряду локального забоя зависит от ширины исполнительного органа (4.8) [15]:

$$K_{\text{СК}} = \frac{B_{\text{ЛЗ}}}{b}, \quad (4.8),$$

где  $b$  - ширина скола, зависящая от ширины исполнительного органа УВМ.

Время цикла отработки локального забоя модулем (4.9):

$$T_{\text{ц.ЛЗ}} = \frac{H_{\Gamma} - H_{\text{К}} - H_{\text{П}}}{H_{\text{СК}}} \frac{B_{\text{ЛЗ}}}{b} T_{\text{С}} + t_{\text{В}} \left( \frac{H_{\Gamma} - H_{\text{К}} - H_{\text{П}}}{H_{\text{СК}}} \right) = \frac{H_{\Gamma} - H_{\text{К}} - H_{\text{П}}}{H_{\text{СК}}} \left( \frac{B_{\text{ЛЗ}}}{b} T_{\text{С}} + t_{\text{В}} \right), \quad (4.9)$$

где  $H_{\Gamma}$  - мощность целика, м;

$t_{\text{В}}$  - время вспомогательных операций, с.

Время цикла комплекса (4.10) [20]:

$$T_{\text{ц.компл}} = T_{\text{ц.ЛЗ}} \frac{B_{\text{П}}}{H_{\text{СК}}} + 2 t_{\text{П}}, \quad (4.10)$$

где  $B_{\text{П}}$  - шаг передвижки секции крепи, м;

$t_{\text{П}}$  - время передвижки комплекса, с.

Выбирая структуру и параметры ОМК ОЦ необходимо учитывать возможность изменения геометрических параметров целиков по мере их отработки [18]:.

Количество разрушенного угля в забое за цикл операций составит (4.11) [15]:

$$M_{\text{ц}} = B_{\text{ЛЗ}} H_{\Gamma} B_{\text{П}} \gamma, \quad (4.11)$$

где  $\gamma$  - плотность угля в массиве, кг/м<sup>3</sup>.

С учетом перерывов в работе за цикл операций производительность теоретическая комплекса будет равна (4.12) [15]:

$$Q_{\text{тер.УВМ}} = \frac{B_{\text{ЛЗ}} H_{\Gamma} B_{\text{П}} \gamma}{T_{\text{ц.компл}}}, \quad (4.12)$$

А производительность очистного выемочного комплекса для отработки целиков равна (4.13) [15]:

$$Q_{\text{тер.ком}} = \frac{B_{\text{ЛЗ}} H_{\Gamma} B_{\text{П}} \gamma}{T_{\text{ц.компл}}} (n_{\text{УВМ}} - 2) K_{\text{М}} = Q_{\text{тер.УВМ}} (n_{\text{УВМ}} - 2) K_{\text{М}}, \quad (4.13)$$

где  $K_{\text{М}}$  - коэффициент использования комплекса во времени.

### 4.3 Технические характеристики УВМ

Мощность необходимая для разрушения забоя одним УВМ с 1 корончатым выемочным органом, кВт (4.14):

$$P = \frac{F_{\text{СК.иО}} \bar{V}_{\text{СК}}}{\eta_{\text{М}}} n_{\text{иО}}, \quad (4.14)$$

где  $F_{\text{ск.ио}}$  - усилие внедрения рабочего инструмента «пика» на исполнительном органе, кН;

$\bar{V}_{\text{ск}}$  - средняя скорость скола, м/с;

$n_{\text{ио}}$  - количество скальвателей (пик) на исполнительном органе;

$\eta_{\text{м}}$  - КПД машины.

Мощность, необходимая на разрушение забоя всеми одновременно УВМ комплекса, кВт (4.15):

$$P_{\text{ск.к}} = P \frac{B_{\text{ц}}}{B_{\text{лз}}} K_{\text{сх}}, \quad (4.15)$$

где  $K_{\text{сх}} = 0,9$  - коэффициент одновременности работы УВМ.

Необходимая мощность насосной станции для обеспечения процесса скальвания, (4.16):

$$P_{\text{ск.нс.}} = \frac{K_3 P_{\text{ск.к}}}{\eta_{\text{гс}}}, \quad (4.16)$$

где  $K_3 = 1,2$  - коэффициент запаса мощности;

$\eta_{\text{гс}}$  - КПД насоса.

Во время процесса скальвания происходят скачки давления, однако давление должно поддерживаться постоянным, устанавливается еще одна насосная станция, которая будет отвечать за управление позиционированием.

Техническая производительность модуля, т/ч (4.17):

$$q_{\text{тех.м}} = 3600 \bar{b} H_{\text{ск.м}} \gamma K_{\text{тех.м}} V_{\text{ск.ск}}, \quad (4.17)$$

где  $\bar{b}$  - средняя ширина скола угля от массива, м;

$H_{\text{ск.м}}$  - максимальная толщина скола, м;

$\gamma$  - плотность угля в массиве, т/м<sup>3</sup>;

$K_{\text{тех.м}} = 0,3$  - коэффициент технического использования УВМ, учитывающий затраты времени на вспомогательные операции [20] (переход на новую позицию по мощности пласта или глубине скола).

Эксплуатационная производительность модуля, исходя из количества смен  $n_{\text{см}}$  и их продолжительности  $T_{\text{см}}$ , т/сут (4.18):

$$q_{\text{э.к.}} = q_{\text{тех.м}} n_{\text{м}} T_{\text{см}} n_{\text{см}} K_{\text{сх}} K_{\text{э}}, \quad (4.18)$$

где  $K_3 = 0,6$  - коэффициент, учитывающий только те вспомогательные операции, которые связаны с передвижкой штрекового оборудования (перегрузатель передвижка)

Скорость подвигания забоя (фронта) целика мощностью  $H_T$  при его обработке УВМ, м/сут (4.19):

$$V_{cp} = \frac{Q_3}{H_T L_{ц} \gamma}, \quad (4.19)$$

#### 4.3.1 Гидропривод выемочного модуля

Функционирование гидроцилиндров в составе унифицированного выемочного модуля (УВМ) осуществляется на основе разработанной еще профессором Габовым В.В. гидравлической схемы, представленной на рисунке 4.5. Управляющее воздействие на цилиндры распределено следующим образом: цилиндр Ц $i$ .1 активируется через распределитель Р1 и предназначен для приведения в действие исполнительного органа скалывания породы; цилиндры Ц $i$ .3 и Ц $i$ .4 обеспечивают поворот стрел всех модулей при подаче жидкости с распределителя Р3; управление вертикальным положением стрел осуществляется посредством цилиндра Ц $i$ .2, подключённого к распределителю Р2. Регулировка амплитуды перемещения цилиндров Ц $i$ .2 реализуется посредством дозирующих клапанов КД $i$ .1. При необходимости возможна установка дистанционного управления, с помощью которого можно отрегулировать шаг перемещения, изменив настройку встроенных дросселей в контуре клапанов. По сигналу от системы автоматизированного управления возможно мгновенное прекращение хода цилиндров, при этом система использует данные с датчиков положения Дп $i$ .2 для реализации обратной связи.

Управление скоростью перемещения цилиндров Ц $i$ .3 и Ц $i$ .4 производится с помощью дросселей ДР $i$ .4 и ДР $i$ .5, настройка которых также осуществляется автоматически. Углы поворота стрелы регулируются в непрерывном режиме, поворот выполняется на необходимый угол, посредством вспомогательного устройства. Контур подачи исполнительного гидроцилиндра скалывания соединён с пневмогидроаккумулятором, что обеспечивает стабилизацию давления

в системе и компенсацию пиковых нагрузок.

В целях повышения надёжности работы УВМ гидросистема дублируется: каждый из распределителей P1, P2, P3 имеет резервный канал; применяются общие и индивидуальные фильтры, а также датчики диагностики (не отображённые на принципиальной схеме).

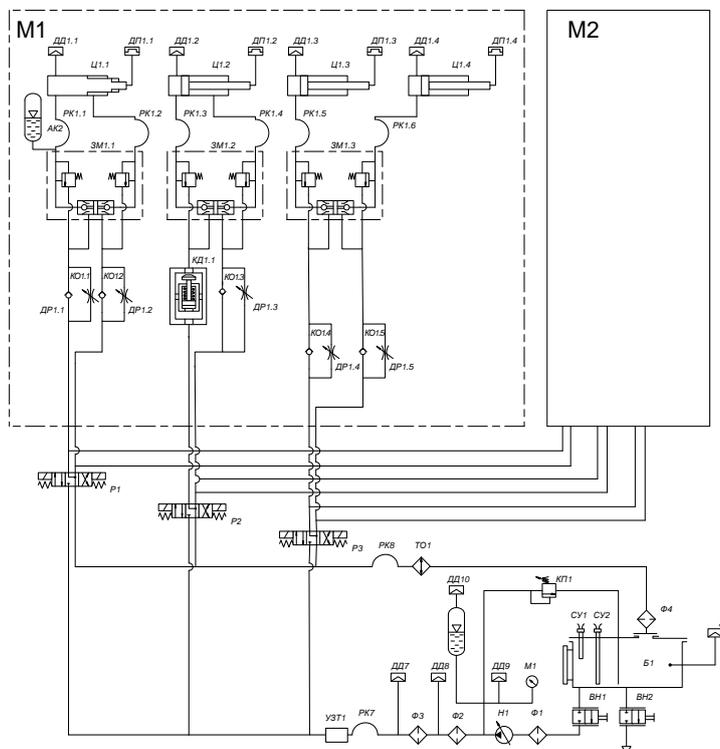


Рисунок 4.5 - Гидросистема УВМ [29]

Выбор основных компонентов системы - гидроцилиндров исполнительного органа УВМ представлен в Приложении В.

Работу выемочных модулей, исходя из расхода рабочей жидкости в данной исследовательской работе, предлагается производить из общей гидросистемы механизированного комплекса от насосной станции.

В качестве примера исполнения УВМ для условий слабонаклонных угольных пластов средней мощности, с устойчивой кровлей, необходимых технические характеристики унифицированного выемочного модуля следующие (таблица 4.1)

Таблица 4.1 - Основные параметры выемочного модуля (составлено автором)

Параметры	Единицы измерения	Значения, характеристики
Мощность обрабатываемого забоя, минимальная - максимальная	м	1,5...3,3
Шаг передвижки секции крепи	м	0,6-1,0
Шаг расстановки секций крепи	м	1-1,5
Максимальный уклон в направлении движения забоя	о	±10
Усилие передвижки секции с УВМ	кН	232
Ширина обрабатываемого забоя - минимальная	м	1,5
- максимальная	м	3,0
Способ разрушения	-	Скалыванием от почвы
Схема резания	-	Последовательная
Тип исполнительного органа	-	Односторонняя резцовая коронка без вращения вокруг оси ее установки
Исполнение	-	Унифицированное, взрывобезопасное
Количество рабочих инструментов, участвующих одновременно в скалывании	шт	3 - 6
Глубина скола: - номинальная	мм	100 - 300
- пределы регулирования	мм	100-300 (через 10 мм)
Переход на новую позицию для производства скалывания	-	Осуществляется при положении коронки без контакта с разрушаемым массивом.
Максимальное рабочее давление в гидроцилиндрах УВМ	МПа	32
Скорость скалывания максимальная	м/с	0,5
Пределы регулирования скорости скалывания	м/с	0,1 - 0,5
Усилия скола на коронке	кН	6
Количество и диаметр гидроцилиндров: - поступательного перемещения стрелы	шт, мм	1; 100
- углового перемещения в вертикальной плоскости	шт, мм	1; 80
-углового перемещения в горизонтальной плоскости	шт, мм	2; 80
Производительность одного модуля:	т/ч	45
Масса модуля (без массы базовой крепи)	кг	600

#### 4.4 Выводы по Главе 4

1. Предложен вариант компоновки очистного механизированного комплекса для отработки целиков параллельно с выемкой основного столба, включающий унифицированные выемочные модули с базовой конструкцией на основе секции

механизированной крепи поддерживающе-оградительного типа со стопорными устройствами, позволяющий при применении сократить потери целиках, за счет их отработки.

2. Результаты работы рекомендуются к внедрению при проектировании механизированных комплексов для отработки угольных целиков в пределах полей действующих шахт. Разработанные принципы структуризации и параметризации обеспечивают адаптивность к целикам с разнообразной геометрией, включая нестандартные формы с вариативной прочностью.

3. Научная новизна работы защищена патентом № 211803 от 23.06.2022 «Секция механизированной крепи» (Приложение Б), в котором реализованы стопорные устройства, повышающие устойчивость комплекса при отработке забоя целика.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержатся новые научно обоснованные технические решения унифицированных выемочных модулей в составе очистного механизированного комплекса для отработки целиков пологих угольных пластов при системах разработки длинными столбами с обоснованием критериев и технологических требований к их применению, имеющие существенное значение для развития угольной отрасли страны.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. На основе анализа и обобщения существующих экспериментальных и теоретических исследований свойств, видов и характеристик целиков выделены группы целиков по возможности их отработки. В частности, отработка ленточных межстолбовых целиков параллельно с отработкой основного забоя позволяет сократить потери угля до 20 процентов от запасов в выемочном столбе.

2. Предложен вариант компоновки очистного механизированного комплекса, включающий унифицированные выемочные модули с базовой конструкцией на основе секции механизированной крепи поддерживающе-оградительного типа со стопорными устройствами.

3. Обосновано расположение комплекса для отработки в забое, указаны технические характеристики комплекса для отработки угольных целиков на одной линии с основным забоем.

4. Отработка целиков осуществляется параллельными полосами по ширине целика с шириной локального забоя, равной шагу расстановки унифицированных выемочных модулей, с формированием уступной формы обрабатываемого забоя и количеством уступов 3 или более, что позволяет обеспечить отработку ленточных целиков в зависимости от применяемой технологии.

5. Проведена оценка потенциальных рисков, характеризующих функционирование унифицированных выемочных модулей комплекса, обоснованы наиболее значимые критерии «энергетическая эффективность» и «защищенность».

6. Результаты экспериментальных исследований показали, что при затуплении пики до угла  $90^\circ$  эффективность её внедрения в уголь падает в 5 раз.

7. Контроль гарантии защиты и надежности отработки целиков модулем оценивается критерием защищенности, определяемым совокупностью четырех безразмерных коэффициентов, каждый из которых должен быть меньше единицы: деформации кровли и прочности крепи, относительной деформации сечения выработки и гарантированного отсутствия смещения модуля в период цикла отработки забоя.

8. Предложены новые научно обоснованные технические решения, защищенные патентами «Секция механизированной крепи» (Патент № 211803) и «Фронтальный очистной агрегат» (Патент № 214566).

9. Результаты исследования планируются к использованию ООО «СПб-Гипрошахт» в проекте «Отработка запасов шахты Воргашорская с прирезкой блока 43-ю»; будут использованы в виде технических предложений и рекомендаций к проекту «Усольский калийный комбинат», при отработке запасов сильвинита на Палашерском, Балахонцевском и Белопашнинском участках Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей при механизации трудоемких работ; в деятельности предприятия ООО «Городской институт проектирования металлургических заводов» в качестве вспомогательного оборудования и средств механизации трудоемких работ.

10. Дальнейшим развитием исследований по теме диссертации является совершенствование структуры и выбор параметров механизированных комплексов избирательного действия для отработки целиков различных форм и размеров в пределах действующих полей шахт и рудников.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Авторское свидетельство № 1493793 СССР, МПК E21D 23/00, E21C 27/00. Выемочный фронтальный агрегат : Заявка № 4204442 : заявл. 02.03.1987 : опубл. 15.07.1989 / В. В. Габов, Э. А. Загривный, Г. И. Коршунов, С. П. Гонтарь. –
2. Авторское свидетельство №1490271 СССР, МПК E21c. Фронтальный агрегат : Заявка № 4226367/23-03 : заявл. 08.04.1987 : опубл. 30.06.1989 / Картавых Г. И. – 3 с. Бюл. №24
3. Акижанова, Ж. Т. К методике расчета горного давления у короткого забоя / Ж. Т. Акижанова, Г. С. Жетесова, К. М. Бейсембаев [и др.] // Уголь. – 2023. – № 7(1169). – С. 50-55. – DOI 10.18796/0041-5790-2023-7-50-55.
4. Аксельрод, С. М. Добыча метана из угольных пластов (по материалам иностранной литературы) / С. М. Аксельрод // Каротажник. – 2013. – № 6(228). – С. 101-133.
5. Бакин, В. А. Обоснование рациональных способов повышения устойчивости подготовительных горных выработок в условиях высокопроизводительных угольных шахт : специальность 25.00.22 "Геотехнология (подземная, открытая и строительная)" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бакин Владимир Александрович, 2021. – 143 с.
6. Бойко, А. Ф. Точный метод расчета необходимого количества повторных опытов / А. Ф. Бойко, Е. Ю. Кудеников // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 8. – С. 128-132.
7. Борисов, А. А. Механика горных пород и массивов. Недра. Москва. - 1980. - 360 с.
8. Бреннер, В. А. Режимы работы комбайнов для добычи калийных руд / В. А. Бреннер, И. О. Зильберт, В. А. Зыков. и [др.]. Недра. Москва. - 1978. - 216 с.
9. Бублик, Ф. П. Методические указания по определению несущей способности целиков / М-во угольной пром-сти СССР. Всесоюз. НИИ горной геомеханики и маркшейдер. дела. ВНИМИ. Ленинград. - 1972. - 91 с.

10. Бузило, В.И. Разработка сближенных угольных пластов механизированными комплексами в условиях шахт львовско-волинского бассейна. монография / В.И. Бузило, А.Г. Кошка.// Национальн. Днепропетровск: НГУ, - 2012. - 132 с. ISBN: 978-966-350-331-8

11. Вельтищев, В. И. Механизированные комплексы МК / В. И. Вельтищев, С. Н. Глумов, С. Н. Драгунов; Недра. Москва. - 1976. - 135 с.

12. Габов, В. В. Классификация способов отделения угля от массива выемочными модулями / В. В. Габов, В. Ф. Тужиков, Д. А. Задков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – № 6. – С. 147-149.

13. Габов, В. В. Избирательность отделения угля от массива и селективность выемки при подземной добыче/ В.В. Габов, Д.А. Задков // 10-я Международная Конференция по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» - Тула: Тульский государственный университет, 2014. Т1. - С. 377–384.

14. Габов, В. В. Классификация способов отделения угля от массива выемочными модулями / В. В. Габов, В. Ф. Тужиков, Д. А. Задков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – № 6. – С. 147-149.

15. Габов, В. В. Обоснование структуры механизированного комплекса для отработки целиков угольных шахт / В. В. Габов, **Ж. М. Гаращенко** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 11-1. – С. 38-50. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2023\_111\_0\_38.

16. Габов, В. В. Особенности технологии отработки целиков угольных шахт / В. В. Габов, Ж. М. Гаращенко // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XXII международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 04–05 апреля 2024 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2024. – С. 40-42.

17. Габов, В. В. Повышение эффективности работы очистных механизированных комплексов / В. В. Габов, А. А. Яичников // Горный

информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 3. – С. 230-233.

18. Габов, В. В. Технология отработки целиков секционными унифицированными выемочными модулями / В. В. Габов, **Ж. М. Гаращенко** // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2024. – № 2(162). – С. 100-107. – DOI 10.26730/1999-4125-2024-2-100-107.

19. **Гаращенко, Ж. М.** Осуществление скола от целика пиковыми исполнительными органами / **Ж. М. Гаращенко**, С. Л. Иванов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : Сборник трудов XXIII международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 03–04 апреля 2025 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2025. – С. 55-57.

20. **Гаращенко, Ж. М.** Отработка угольных целиков унифицированными выемочными модулями локальными забоями / **Ж. М. Гаращенко**, В. А. Теремецкая, В. В. Габов // Горная промышленность. – 2024. – № S5. – С. 151-157. – DOI 10.30686/1609-9192-2024-5S-151-157.

21. **Гаращенко, Ж. М.** Технология, способы и технические средства отработки угольных целиков / **Ж. М. Гаращенко**, В. В. Габов, А. Ф. Прялухин // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 15. – С. 151-156. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-15-151-156.

22. **Гаращенко, Ж. М.** Критерии отработки целиков унифицированными выемочными модулями. / **Ж.М. Гаращенко**, С.Л. Иванов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 83-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2025. - Т.1. - С.16.

23. Гребёнкин, С. С. Основы создания и эффективной эксплуатации систем оборудования для угольных шахт жизнеобеспечения очистного оборудования для угольных шахт: [монография] / С.С. Гребёнкин, В.В. Косарев, С.Е. Топчий, Н.И. Стадник, В.И. Зензеров, В.В. Стеблин, Б.А. Перепелица, В.Н. Поповский; под

общей редакцией Гребенкина С.С. и Косарева В.В. – Донецк: «ВИК», 2009. – 372 с.

24. Демин, В. Ф. Оценка технологических схем развития горных работ в практике отработки угольных пластов / В. Ф. Демин, М. М. Баймульдин, Т. В. Демина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 2. – С. 5-15.

25. Докукин А. В. Основные проблемы горной науки. Недра. Москва, - 1979. - 383 с.

26. Ермакова, И. А. Анализ геомеханического состояния предохранительных целиков на шахте им. А.Д. Рубана / И. А. Ермакова, Н. Н. Пириева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 7. – С. 193-199.

27. Жараспаев, М. Геомеханическое обоснование способов извлечения целиков на месторождении Жаман-айбат : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Жараспаев Мадияр. – Санкт-Петербург. 2019. – 145 с.

28. Забурдяев, В. С. Метан угольных шахт : монография / В. С. Забурдяев. — Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. — 276 с. — ISBN 978-5-9729-0904-9.

29. Задков, Д. А. Обоснование рациональных динамических параметров гидропривода механизма резания выемочного модуля : специальность 05.05.06 "Горные машины" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Задков Денис Александрович. – Санкт-Петербург, 2005. – 123 с.

30. Зеленин, А. Н. Физические основы теории резания грунтов. - М.: Изд-во АН СССР, 1959. - 371 с.

31. Зубов, В. П. Разработка ресурсосберегающей технологии выемки пологих угольных пластов с труднообрушающимися породами кровли (на примере шахт Куангниньского угольного бассейна) / В. П. Зубов, Л. К. Фук //

Записки Горного института. – 2022. – Т. 257. – С. 795-806. – DOI 10.31897/PMI.2022.72.

32. Инструкция по безопасному ведению горных работ на шахтах, разрабатывающих угольные пласты, склонные к горным ударам : [УТВЕРЖДЕНА постановлением Госгортехнадзора России от 29.11.99 года N 87. ВВЕДЕНА В ДЕЙСТВИЕ постановлением Госгортехнадзора России от 22.06.00 N 36] – С. 99.

33. Исследование влияния очистных работ на состояние штреков, поддерживаемых в целиках в условиях шахты "ИМ. В.Д. Ялевского" / К. А. Филимонов, А. А. Ренев, А. В. Кучеренко, П. В. Гречишкин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 5. – С. 133-148. – DOI 10.25018/0236-1493-2019-05-0-133-148.

34. К вопросу о размерах охранных целиков у горных выработок на подработанных пластах (состояние вопроса) / С. В. Бакуменко, С. В. Кузьмин, Д. Н. Демехин, Д. С. Власенко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 7. – С. 11-16.

35. Казанин, О. И. Снижение потерь угля при отработке сближенных пластов донной части Воркутского месторождения / О. И. Казанин, В. В. Ярошенко // Записки Горного института. – 2020. – Т. 244. – С. 395-401. – DOI 10.31897/PMI.2020.4.1.

36. Карпов, Ф. Д. Технология и технические средства избирательной отработки угольных целиков в пределах полей действующих шахт / Ф. Д. Карпов, В. В. Габов, **Ж. М. Гаращенко** // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – № 25. – С. 163-168. – DOI 10.26160/2658-3305-2024-25-163-168.

37. Кизильштейн, Л. Угольные примеси - ценные и коварные / Л. Кизильштейн // Наука и жизнь. - 2014. - № 5. - С. 70-75.

38. Кизияров, О. Л. Оценка уровня потерь угля в охранных целиках при технологической схеме выемки с разворотом комплексно-механизированного очистного забоя / О. Л. Кизияров, А. П. Болотов, И. А. Смагина // Инновационные

научные исследования. – 2020. – № 12-1(2). – С. 80-91. – DOI: 10.5281/zenodo.4444609.

39. Ключник, И. Д. Установка для исследования процесса резания угля в режимах с постоянной скоростью резания и с постоянным силовым воздействием / И. Д. Ключник, В. А. Ярмоленко // Качество и жизнь. – 2018. – № 3(19). – С. 25-27.

40. Кобылкин, С. С. Особенности проектирования вентиляции угольных шахт, применяющих камерно-столбовую систему разработки / С. С. Кобылкин, А. Р. Харисов // Записки Горного института. – 2020. – Т. 245. – С. 531-538. – DOI 10.31897/PMI.2020.5.4.

41. Кокоев, С. Г. Геомеханическое обоснование оптимальных параметров целиков при многоштрековой схеме подготовки угольных пластов / С. Г. Кокоев // Записки Горного института. – 2011. – Т. 189. – С. 226-228.

42. Корнеева, Е. В. Промышленные отходы для закладки выработанных пространств угольных и рудных шахт Кузбасса / Е. В. Корнеева // Вестник ВСГУТУ. – 2024. – № 1(92). – С. 97-106. – DOI 10.53980/24131997\_2024\_1\_97.

43. Крестовоздвиженский, П. Д. Повышение прочности тангенциальных поворотных резцов горных очистных комбайнов : специальность 05.05.06 "Горные машины" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Крестовоздвиженский Павел Дмитриевич. – Новокузнецк, 2011. – 190 с.

44. Лизункин, М. В. Геомеханические расчёты систем разработки : учебное пособие / М. В. Лизункин, В. М. Лизункин, А. А. Морозов. — Чита : ЗабГУ, 2022. — 163 с. — ISBN 978-5-9293-3042-1.

45. Литвинский, Г. Г. Основы теории резания и разрушения горных пород / Г. Г. Литвинский // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2017. – № 8(51). – С. 5-15.

46. Лысенко, М. В. Способы повышения полноты извлечения запасов угля / М. В. Лысенко, Е. В. Аушев, А. А. Дудин // Уголь. – 2022. – № 11(1160). – С. 48-54. – DOI 10.18796/0041-5790-2022-11-48-54.

47. Лялюк, В. П. Сравнение технологий доменной плавки при загрузке кускового антрацита и вдувании пылеугольного топлива / В. П. Лялюк, А. К. Тараканов, Д. А. Кассим, П. И. Оторвин, Д. В. Пинчук // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - 2017. - № 5. - С. 9-12.

48. Матерова, Е. С. Оценка инвестиционной привлекательности угольной отрасли России / Е. С. Матерова, Ж. А. Аксенова, Н. В. Столбовская [и др.] // *Уголь*. – 2025. – № 3(1191). – С. 114-120. – DOI 10.18796/0041-5790-2025-3-114-120.

49. Мешков, А. А. Реализация производственного потенциала высокопроизводительного оборудования - ключевое направление совершенствования подземной добычи энергетических углей / А. А. Мешков, О. И. Казанин, А. А. Сидоренко // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2020. – № 12. – С. 156-165. – DOI 10.25018/0236-1493-2020-12-0-156-165.

50. Москворецкий, П. С. Мировой рынок угля: состояние и долгосрочные тенденции / П. С. Москворецкий // *Современная Европа*. – 2024. – № 4(125). – С. 116-125. – DOI 10.31857/S0201708324040090.

51. Обоснование путей повышения безопасности горных работ при отработке угольных целиков на глубоких горизонтах / И. А. Ефремов, Б. В. Бокий, В. И. Пилюгин, В. К. Костенко // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2001. – № 10. – С. 124-127.

52. Оглоблин, Д. Н., Маркшейдерское дело. Учебник для вузов. / Д.Н. Оглоблин, Г.И. Герасименко, А.Г. Акимов // *Недра*. - Москва, 1972. - 590 с.

53. Опыт отработки крутых угольных пластов / В. В. Мельник, В. И. Ефимов, Т. В. Корчагина [и др.] // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2018. – № 11. – С. 18-38. – DOI 10.25018/0236-1493-2018-11-0-18-38.

54. Патент № 2459076 Российская Федерация, МПК E21C 27/28, E21D 23/04. выемочный модуль : № 2010148944/03 : заявл. 30.11.2010 : опубл. 20.08.2012 / В. И. Болотов, В. В. Габов, М. П. Талеров, К. П. Талеров ; заявитель

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В. Плеханова (технический университет)"

55. Патент № 2687719 С1 Российская Федерация, МПК E21C 41/26, E21C 47/02, B65B 1/30. Способ селективной разработки сложноструктурных месторождений твердых полезных ископаемых : № 2018134434 : заявл. 28.09.2018 : опубл. 15.05.2019 / А. Ю. Чебан ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук.

56. Патент на полезную модель № 184573 Российская Федерация, МПК E21D 23/04. Секция механизированной крепи : № 2018124768 : заявл. 05.07.2018 : опубл. 30.10.2018 / В. П. Тациенко, К. А. Бубнов, С. Е. Беликов [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Управление горного сервиса".

57. Патент на полезную модель № 211803 Российская Федерация, МПК E21D 23/00. секция механизированной крепи : № 2022101970 : заявл. 28.01.2022 : опубл. 23.06.2022 / В. В. Габов, **Ж. М. Гаращенко**, А. В. Виленская ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет". 9 с.

58. Патент на полезную модель № 214566 Российская Федерация, МПК E21D 23/00. фронтальный очистной агрегат : № 2022125481 : заявл. 29.09.2022 : опубл. 03.11.2022 / В. В. Габов, **Ж. М. Гаращенко**, А. В. Виленская ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет".

59. Пестрецов, С.И. Компьютерное моделирование и оптимизация процессов резания : учеб. пособие. // С.И. Пестрецов/ Изд-во Там. Тамбов, - 2009. - 104 с.

60. Пириева, Н. Н. Оценка прочностного состояния предохранительных целиков на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» / Н. Н. Пириева., И.А. Ермакова // Вестник КузГТУ. - 2017. - №5 (123) - С.30-37

61. Плакиткина, Л. С. Анализ и прогнозы развития добычи и потребления угля в ведущих угледобывающих странах мира в период 2000-2035 гг. / Л. С. Плакиткина, Ю. А. Плакиткина, К. И. Дьяченко. // Горный журнал. - 2018. - № 3. - С. 4-9. – DOI 10.17580/gzh.2018.03.01

62. Позин, Е.З. Разрушение углей выемочными машинами / Е.З. Позин, В. Меламед, В.В. Тон // Недра. Москва, - 1984. - 288 с.

63. Почему в Англии отказались от шахтного способа добычи угля? - Добывающая промышленность [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dprom.online/chindustry/pochemu-v-anglii-otkazalis-ot-shahtnogo-sposoba-dobychi-uglya/> (accessed: 03.12.2024).

64. Почему в Западной Европе закрывают все угольные шахты? | Экономика | Деньги | Аргументы и Факты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://aif.ru/money/economy/pochemu\\_v\\_zapadnoy\\_evrope\\_zakryvayut\\_vse\\_ugolnye\\_shahty](https://aif.ru/money/economy/pochemu_v_zapadnoy_evrope_zakryvayut_vse_ugolnye_shahty) (дата обращения: 02.12.2024).

65. Приказ Ростехнадзора от 08.12.2020 № 505 Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности "правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых". [утвержден постановлением Правительства Российской Федерации от 30 июля 2004 г № 401 : Собрание законодательства Российской Федерации, 2004, № 32, ст. 3348; 2020, N 27, ст. 4248]

66. Прокопенко, С. А. Новые возможности освоения угольных месторождений / С. А. Прокопенко // Горная промышленность. – 2013. – № 2(108). – С. 24.

67. Прокопенко, С. А. Перспективные конструкции резцов для повышения сортности добываемого шахтами угля / С. А. Прокопенко // Уголь. – 2017. – № 4(1093). – С. 29-31. – DOI 10.18796/0041-5790-2017-4-29-31.

68. Проскурин, В. В. Влияние предохранительных целиков на устойчивость подъемных стволов и на выбор места заложения их при вскрытии месторождений с мощными крутопадающими пластами на больших глубинах/ В. В. Проскурин //

Известия Томского ордена трудового красного знамени политехнического института имени С.М. Кирова. - 1956. - Т. 84. - С. 55–63.

69. Протодряконов, М. М. Трещиноватость и прочность горных пород в массиве / М.М. Протодряконов, С.Е. Чирков; Акад. наук СССР. Гос. ком. по топливной пром-сти при Госплане СССР. Ин-т горного дела им. А. А. Скочинского. - Москва : Наука, 1964. - 67 с

70. Радоуцкий, В.Ю. Основы научных исследований: учеб. пособие / В.Ю. Радоуцкий, В.Н. Шульженко, Е.А. Носатова; под ред. В.Ю. Радоуцкого. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. – 133 с.

71. Рац, М. В. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород / М. В. Рац, С. Н. Чернышев. – Москва : Издательство "Недра", 1970. – 164 с.

72. Ресурсосберегающие технологии отработки запасов локальных участков пологих пластов / В. А. Потапенко, Б. Г. Никишичев, В. К. Сидорчук, Б. В. Цыплаков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 1997. – № 4. – С. 130-133.

73. Руководство по безопасности “Рекомендация по безопасному ведению горных работ склонных к динамическим явлениям угольных пластов.” [Приказ Ростехнадзора от 21.08.2017 № 327 "Об утверждении Руководства по безопасности "Рекомендации по безопасному ведению горных работ на склонных к динамическим явлениям угольных пластах"] - Москва

74. Рыжков, Ю. А. Сравнительная оценка горно-геологических условий разработки, техники и технологии при подземном способе добычи угля в России и за рубежом / Ю. А. Рыжков, Е. В. Игнатов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2006. – № 1(52). – С. 67-74.

75. Семенов, А.П. Закрытие угольных шахт и обеспечение безопасной работы для смежных действующих шахт. / А.П. Семенов, О.А. Улицкий, В.Н. Ермаков, Е.И. Питаленко [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dspace.nbuu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/189688/04-SEmenov.pdf?sequence=1> (дата обращения: 11.03.2025).

76. Семенцов, В. В. Исследование технологии отработки целиков угля при камерно-столбовой системе в российских шахтах. Обзор / В. В. Семенцов, М. С. Добровольский, Е. В. Нифанов [и др.] // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2018. – № 4. – С. 5-23. – DOI 10.25558/VOSTNIИ.2018.8.82.001.

77. Сидоренко, А. А. Обоснование параметров технологических схем интенсивной отработки склонных к самовозгоранию мощных угольных пластов / А. А. Сидоренко, С. А. Мешков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 6-1. – С. 83-99. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2022\_61\_0\_83.

78. Сидоренко, А. А. Совершенствование методики расчета параметров анкерной крепи выработок угольных шахт в зонах влияния сближенных угольных пластов / А. А. Сидоренко, А. Г. Апарин, П. Н. Дмитриев // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2022. – № 3. – С. 82-94. – DOI 10.21440/0536-1028-2022-3-82-94.

79. Системы разработки ограниченных запасов на основе коротких лав и анкерного крепления выработанных пространств / В. И. Сарычев, С. И. Шестаков, С. С. Жуков, А. Е. Харламов // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. – 2012. – № 1-2. – С. 168-175.

80. Скрицкий, В. А. Причины взрывов метана в высокопроизводительных угольных шахтах Кузбасса / В. А. Скрицкий // Инноватика и экспертиза: научные труды. – 2017. – № 2(20). – С. 171-180.

81. Смирнов, А. В. Факторы, влияющие на безопасную и высокопроизводительную работу очистных забоев / А. В. Смирнов, А. В. Ремезов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2005. – № 4-1(48). – С. 36-40.

82. Страданченко, С. Г. Технологии отработки околоствольных целиков / С. Г. Страданченко, В. И. Сарычев, И. И. Савин ; С. Г. Страданченко, В. И. Сарычев, И. И. Савин. – Ростов н/Д : Известия высших учеб. заведений. Сев.-Кавк. регион", 2004. – 126 с.

83. Талеров, К. П. Обоснование параметров выемочного модуля для проведения ниш в комплексно-механизированном очистном забое : специальность 05.05.06 "Горные машины" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Талеров Константин Павлович. – Санкт-Петербург, 2012. – 173 с.

84. Темерко, Е. А. Проектирование типовых норм при добыче угля в условиях филиала ОАО ХК "Якутуголь" разрез "Нерюнгринский" / Е. А. Темерко, Р. А. Салимов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № S11. – С. 289-313.

85. Тимофеева, С. С. Техногенные риски угледобывающих предприятий / С. С. Тимофеева, М. А. Мурзин // Перспективы развития горно-металлургической отрасли (игошинские чтения -2018) : материалы Международной научно-практической конференции, Иркутск, 29 ноября – 01 2018 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2018. – С. 356-362.

86. Титов, Р. С. Обоснование вариантов освоения Ак-Тальского месторождения каменного угля / Р. С. Титов, В. Д. Кантемиров, А. М. Яковлев // Проблемы недропользования. – 2023. – № 1(36). – С. 16-31. – DOI 10.25635/2313-1586.2023.01.016.

87. Тихонов, А. В. Обоснование проектных решений по отработке запасов угольных целиков различного функционального назначения : специальность 25.00.21 "Теоретические основы проектирования горно-технических систем": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Тихонов Антон Викторович. – Москва, 2011. – 222 с.

88. Толкачев, В. Е. Оценка состояния крепи подготовительных выработок с учетом надежности ее эксплуатации / В. Е. Толкачев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 2. – С. 61-63.

89. Толстунов, С. А. Выбор эффективного исполнительного органа горного комбайна для разрушения многолетнемерзлых горных пород крупным сколом / С.

А. Толстунов, С. П. Мозер // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 1. – С. 81-87.

90. Указания по управлению горным давлением в очистных забоях под (над) целиками и краевыми частями при разработке свиты угольных пластов мощностью до 3,5 м с углом падения до 35°. [УТВЕРЖДЕНЫ Первым заместителем Министра В.Д.Никитиным 16 мая 1984 г.]. - Ленинград, 1984. - 62 с.

91. Ушаков, И. Н. Трещиноватость горного массива в центральном районе Донбасса и точечный способ ее характеристики/ И.Н. Ушаков // Записки Горного института. 1958. - Т. 36. - № 1. - С. 11.

92. Федоров, Д. И. Рабочие органы землеройных машин. М.: Машиностроение, 1977. - 288 с.

93. Филатов, Ю. М. Повышение эффективности и безопасности отработки целиков при камерно-столбовой системе разработки угольных пластов / Ю. М. Филатов, В. В. Семенцов, С. А. Прокопенко [и др.] // Уголь. – 2018. – № 12(1113). – С. 16-20. – DOI 10.18796/0041-5790-2018-12-16-20.

94. Хакимов, Ш. И. Подэтажная система с искусственными целиками из твердеющей закладки для разработки жил в сложных геомеханических условиях / Ш. И. Хакимов, Ш. Р. Уринов // Горные науки и технологии. – 2021. – Т. 6, № 4. – С. 252-258. – DOI 10.17073/2500-0632-2021-4-252-258.

95. Хорешок, А. А. Опыт эксплуатации рабочего инструмента исполнительных органов горных машин на шахтах Кузбасса / А. А. Хорешок, А. М. Цехин, В. В. Кузнецов [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – № 4. – С. 8-11.

96. Хорин, В. Н. Вопросы расчета и надежности шахтных гидравлических крепей. / В.Н. Хорин, С.В. Мамонтов, И. Л. Гейхман // Академия наук СССР. Министерство угольной промышленности СССР. Институт горного дела им. А.А. Скочинского. Наука, 1970. – 165 с.

97. Цедрик, А. В. Экономико-географическая характеристика стран мира по обеспеченности стратегическими видами минерально-сырьевых ресурсов: нефть,

природный газ, уголь, уран/ А. В. Цедрик// Природные ресурсы. – 2024. – Т. 1. – С. 13–21.

98. Черданцев, Н. В. К расчету угольных целиков между пластовыми выработками / Н. В. Черданцев // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 1. – С. 26-30. – DOI 10.24000/0409-2961-2020-1-26-30.

99. Черкасова, Т. Г. Угольные отходы как сырье для получения редких и рассеянных элементов / Т. Г. Черкасова, Е. В. Черкасова, А. В. Тихомирова [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016. – № 6(118). – С. 185-190.

100. Чернышов, А. В. Проходка выемочного штрека с опережающей короткой лавой / А. В. Чернышов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 7. – С. 33-37.

101. Шрейнер, Л. А. Физические основы механики горных пород. – М.-Л.: Гостоптехиздат, 1950. – 212 с.

102. Шуклин, В. А. Обоснование параметров камерно-столбовой системы разработки при отработке пологопадающих угольных пластов / В. А. Шуклин // Записки Горного института. – 2009. – Т. 181. – С. 55-57.

103. Энергоэффективная секция механизированной крепи очистного комплекса, адаптивная к условиям эксплуатации / Д. А. Задков, В. В. Габов, Н. В. Бабырь [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 6. – С. 46-61. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2022\_6\_0\_46.

104. Яковлев, И. Примеси: ценные и опасные / Единый промышленный портал Сибири // Промышленные страницы Сибири. - 2015. - Т. №96. - № 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.epps.ru/journal/detail.php?id=1370> (дата обращения 11.04.2025)

105. Ярошенко, В. В. Направления повышения коэффициента извлечения угля при доработке запасов Воркутского месторождения / В. В. Ярошенко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № S7. – С. 370-380. – DOI 10.25018/0236-1493-2019-4-7-370-380.

106. British Petroleum. Energy Outlook 2023 // Statistical Review of World Energy. 2023. № July. 1–53 P.126

107. Das, A. J. Investigation of Failure Mechanism of Inclined Coal Pillars: Numerical Modelling and Tensorial Statistical Analysis with Field Validations / A. J. Das, P. K. Mandal, R. Kumar [et al.] // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2021. – DOI 10.1007/s00603-021-02456-5.

108. Di Gianfrancesco, A. Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants/ A. Di Gianfrancesco /Elsevier Inc., 2016. - 875 p.

109. Frith, R. Coal pillar design when considered a reinforcement problem rather than a suspension problem/ R. Frith, G. Reed // International journal of mining science and technology. – 2018. - Vol. 28. - № 1. - P. 11–19.

110. IEA., Energy Technology Perspectives 2023, IEA, Paris. Paris: International Energy Agency (IEA), 2023. P. 463. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023> (дата обращения 11.01.2024).

111. Iordanov, I. Determining stability conditions for haulage drifts protected by coal pillars / I. Iordanov, Y. Novikova, Y. Simonova [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 6, No. 1-108. – P. 72-81. – DOI 10.15587/1729-4061.2020.216530.

112. Kim, H.-E. Experimental Investigation on Joint Effects in Rock Cutting with a Conical Pick Under Unrelieved Cutting Conditions/ H.-E. Kim, [et al.] // Appl. Sci. - 2025. - Vol. 15, - № 10. - P. 5578.

113. Kumar, A. Performance of a coal pillar at deeper cover: Field and simulation studies/ A. Kumar, P. Waclawik, R. Singh, S. Ram, J. Korbel // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. - 2019. Vol. 113. - P. 322–332. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.10.006

114. Lis, S.N. Findings of Studies on Wave Character of Pillar Support Pressure and Edge Parts of Coal Seams/ S.N. Lis // Min. Sci. Technol. 2020. Vol. 5, № 1. P. 39–48.

115. Lv, H. Study on the mechanism of a new fully mechanical mining method for extremely thick coal seam / H. Lv, Zh. Cheng, F. Liu // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2021. – Vol. 142. – P. 104788. – DOI 10.1016/j.ijrmms.2021.104788.

116. Mark, C. Analysis of coal pillar stability (ACPS): A new generation of pillar design software / C. Mark, Z. Agioutantis // International Conference on Ground Control in Mining, - 2019. - Vol. 29, - № 1. - P. 87–91.

117. MRS MID-SEAM [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.jhfletcher.com/mrsmid> (дата обращения: 15.03.2025)

118. Navarro Torres, V. F. Comparative stability analyses of traditional and selective room-and-pillar mining techniques for sub-horizontal tungsten veins / V. F. Navarro Torres, C. Dinis Da Gama, M. Costa E Silva [et al.] // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. – 2011. – Vol. 18, No. 1. – P. 1-8. – DOI 10.1007/s12613-011-0392-2.

119. Shangguan, Y. Mineralogical and geochemical variations from coal to deposited dust and toxicity of size-segregated respirable dust in a blasting mining underground coal mine in Hunan Province, South China / Y. Shangguan, X. Zhuang, X. Querol [et al.] // International Journal of Coal Geology. – 2021. – Vol. 248. – P. 103863. – DOI 10.1016/j.coal.2021.103863.

120. Shen, W.-L. Experiment on Mine Ground Pressure of Stiff Coal-Pillar Entry Retaining under the Activation Condition of Hard Roof/ W.-L Shen, W-B. Guo [et al.] // Advances in Civil Engineering / - 2018. – Vol. 20. – P. 1-11. DOI: 10.1155/2018/2629871

121. Singh, A. K. Field and Simulation Studies for Mechanised Depillaring below Incompetent Geological Formations of an Indian Coal Mine / A. K. Singh, A. Kumar, D. Kumar [et al.] // Journal of the Geological Society of India. – 2021. – Vol. 97, No. 4. – P. 405-415. – DOI 10.1007/s12594-021-1698-y.

122. Song, G., Yang S. Probability and reliability analysis of pillar stability in South Africa/ G. Song, S. Yang // International Journal of Mining Science and Technology, - 2018. - Vol. 28, - № 4. - P. 715–719.

123. Wang, Sh. Research on short wall continuous mining technology with full roof falling and roof control measures / Sh. Wang, G. Zhu, K. Zhang, Yu. Wang // Geotechnical and Geological Engineering. – 2021. – Vol. 39, No. 7. – P. 4877-4886. – DOI 10.1007/s10706-021-01800-4.

124. Zubov, V. P. Status and directions of improvement of development systems of coal seams on perspective Kuzbass coal mines / V. P. Zubov // Journal of Mining Institute. – 2017. – Vol. 225. – P. 292-297. – DOI 10.18454/PMI.2017.3.292.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А****Акты внедрения****Утверждаю**

Директор по проектированию  
промышленных предприятий –  
Технический директор, к.т.н.  
ООО «СПб-Гипрошахт»



Подосенов А.А.  
28.11.2024 г.

**АКТ**

о внедрении результатов кандидатской диссертации

Гаращенко Жанны Максимовны

По научной специальности 2.8.8 «Геотехнология, горные машины»

Результаты диссертационной работы Гаращенко Ж.М., посвященной обоснованию применения унифицированных выемочных модулей в составе механизированных комплексов для отработки (угольных) целиков, представленной на соискание ученой степени кандидата наук планируется к использованию в проекте «Отработка запасов шахты Воргашорская с прирезкой блока 43-ю» ООО «Воркутауголь» при разработке технологии ведения подземных горных работ в виде технических предложений рекомендаций по оснащению секций механизированной крепи стопорным устройством в рамках модернизации очистного механизированного комплекса.

Применение указанных результатов позволит обеспечить устойчивость отработки участков в границах полей действующих шахт, как по падению, так и по восстанию, что в свою очередь повысит полноту выемки, позволит снизить трудозатраты на выполнение работ, повысить уровень безопасности работ.

Главный инженер проектов  
ООО «СПб-Гипрошахт»

Груздев И.Н.



Утверждено

Заместитель директора  
филиала «Санкт-Петербург»  
(Должность)

ООО «ПроТех Инжиниринг»  
(Наименование организации)

А.С. Мальцев  
(Ф.И.О.)

(Подпись)

" 12 " 2024 г.

**АКТ**

о внедрении (использовании) результатов кандидатской диссертационной работы  
Гаращенко Жанны Максимовны на тему «Критерии и технологические требования к  
унифицированному выемочному модулю комплекса с учетом особенностей условий  
отработки целиков угольных шахт» по научной специальности 2.8.8 «Геотехнология,  
горные машины»

Комиссия (НТС, рабочая, специальная) в составе:

Председатель – Д.Н. Хвостанцев (Главный инженер проекта);

Члены комиссии – Ю.Г. Штейников (Начальник управления), П.В. Варушкин (Начальник  
горно-механического сектора), А.В. Сенькин (Главный инженер проекта)

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Критерии и  
технологические требования к унифицированному выемочному модулю комплекса с учетом  
особенностей условий отработки целиков угольных шахт», представленной на соискание  
ученой степени кандидата наук, планируются к использованию в деятельности предприятия  
ООО «ЕвроХим-Усольский калийный комбинат» при разработке/реализации технологии  
ведения подземных горных работ.

Материалы и результаты работы использованы в виде технических предложений и  
рекомендаций к проекту «Усольский калийный комбинат. Отработка запасов сильвинита на  
Палашерском, Балахонцевском и Белопашнинском участках Верхнекамского месторождения  
калийно-магниевых солей» при механизации трудоемких работ.

Использование указанных результатов позволит обеспечить устойчивость отработки  
участков в границах полей действующих шахт, при ведении очистных работ как по падению,  
так и по восстанию, что в свою очередь повысит полноту выемки, позволит снизить  
трудозатраты на проведение работ, повысить уровень безопасности работ.

**Председатель комиссии:**

Главный инженер проекта  
должность

**Члены комиссии:**

Начальник управления  
должность

Начальник сектора  
должность

Главный инженер проекта  
должность

*(Подпись)* 16.12.2024  
Подпись дата

Хвостанцев Д.Н.  
ФИО

*(Подпись)* 16.12.2024  
Подпись дата

Штейников Ю.Г.  
ФИО

*(Подпись)* 16.12.2024  
Подпись дата

Варушкин П.В.  
ФИО

*(Подпись)* 16.12.2024  
Подпись дата

Сенькин А.В.  
ФИО



**Общество с ограниченной ответственностью  
«Городской институт проектирования  
металлургических заводов»**

Тел.: +7 (495) 225 83 55, E-mail: sekretar@gipromez.metalloinvest.com  
ОКПО 78371476, ОГРН 1057748009681, ИНН 7710597105, КПП 773101001  
121609, г. Москва, вн.тер.г. Муниципальный округ Крылатское, Рублёвское шоссе, д. 28

Утверждаю  
Руководитель Регионального  
проектного центра  
С.В. Алиферов  
«26» января 2015 г.



**АКТ**

**о внедрении (использовании) результатов кандидатской диссертационной работы  
Гаращенко Жанны Максимовны на тему «Критерии и технологические требования к  
унифицированному выемочному модулю комплекса с учетом особенностей условий  
отработки целиков угольных шахт»  
по научной специальности 2.8.8 «Геотехнология, горные машины»**

Комиссия (НТС, рабочая, специальная) в составе:  
Председатель – Сергеев Е.Г. (Главный инженер)  
Члены комиссии – В.В. Бувич (Главный инженер проектов, к.т.н.), Чистяков С.Ю. (главный специалист технологического отдела)

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Критерии и технологические требования к унифицированному выемочному модулю комплекса с учетом особенностей условий отработки целиков угольных шахт», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, планируются к использованию в деятельности предприятия ООО «Городской институт проектирования металлургических заводов» при разработке технологии монтажа и демонтажа футеровок печей в качестве вспомогательного оборудования и средств механизации трудоемких работ при их демонтаже.

Материалы и результаты работы будут приняты во внимание при реализации проектов на сталеплавильном производстве по оснащению вспомогательным оборудованием в рамках ремонтно-восстановительных работ основного оборудования.

Использование указанных результатов позволит:

- повысить уровень механизации трудоемких работ;
- повысить уровень безопасности работ при их проведении;
- снизить число дней простоев при включении в годовой план работ.

**Председатель комиссии:**

Главный инженер

(Должность)

(подпись, дата)

Сергеев Е.Г.  
(ФИО)

**Члены комиссии:**

Главный специалист

(Должность)

(подпись, дата)

Чистяков С.Ю.  
(ФИО)

Главный инженер проектов

(Должность)

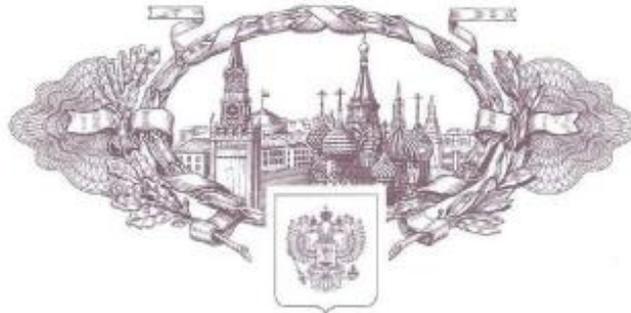
(подпись, дата)

Бувич В.В.  
(ФИО)

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**  
**Патенты на полезные модели**



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

**№ 214566**

**ФРОНТАЛЬНЫЙ ОЧИСТНОЙ АГРЕГАТ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Габов Виктор Васильевич (RU), Гаращенко Жанна Максимовна (RU), Виленская Анастасия Викторовна (RU)*

Заявка № 2022125481

Приоритет полезной модели 29 сентября 2022 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 03 ноября 2022 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 29 сентября 2032 г.

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности*

*Ю.С. Зубов*



## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Расчет гидравлики

Количество станций необходимое для комплекса для отработки целиков (В.1):

$$n = \frac{Q_{\Sigma n}}{Q}, \quad (\text{В.1})$$

где  $Q_{\Sigma n}$  - расчётный расход рабочей жидкости для  $n$  модулей, л/мин;

$Q$  - расход одной насосной станции, л/мин.

1) Для осуществления процесса скалывания:

Диаметр цилиндра подачи, мм (В.2):

$$D_{ц4} = \sqrt{\frac{4F_{ск}}{\pi P}}, \quad (\text{В.2})$$

где  $F_{ск}$  - усилие на рабочем инструменте «пика» при скалывании, кН;

$P$  - максимальное рабочее давление в гидроцилиндрах, МПа.

Диаметр гидроцилиндра округляется в большую сторону под стандартизированные размеры согласно ГОСТ 15608.

Расход  $Q$  рабочей жидкости через гидроцилиндр (В.3):

$$Q_4 = \frac{\pi D_{ц4}^2 h_4}{4t_4}, \quad (\text{В.3})$$

где  $h_4$  - ход штока гидроцилиндра осуществления процесса скалывания, м;

$t_4$  - время скола (В.4), учитывающее скорость подачи цилиндра  $V_{n.min}$  и  $V_{n.max}$ , с.

$$t_4 = \frac{S}{V}, \quad (\text{В.4})$$

где  $S$  - путь, пройденный рабочим инструментом при скалывании, м;

$V$  - минимальная и максимальная скорости подачи цилиндра,  $t_{min4}$ ,  $t_{max4}$ , с.

2) При подъеме исполнительного органа усилие в цилиндре при перемещении исполнительного органа из одной позиции в другую, Кн (В.5):

$$F_{ц3} = \frac{GR}{l_{ц.min.3}}, \quad (\text{В.5})$$

где  $G = mg$  - вес отдельной части стрелы (исполнительного органа);

$m$  - масса отдельной части стрелы, кг;

$R$  - длина цилиндра, м.

Время подъема исполнительного органа при минимальной и максимальной скорости соответственно  $V_{n.min}$  и  $V_{n.max}$ , с (В.6):

$$t_3 = \frac{\pi L}{4V}, \quad (\text{В.6})$$

где  $L$  - длина исполнительного органа, мм.

Расход рабочей жидкости через гидроцилиндр, м<sup>3</sup>/с (В.7):

$$Q_3 = \frac{\pi D_{ц3}^2 h_3}{4t_3}, \quad (\text{В.7})$$

где  $h_3$  - ход штока гидроцилиндра обеспечивающий подъем исполнительного органа на задаваемый угол, м.

3) При подъеме стрелы усилие на цилиндре при перемещении исполнительного органа из одной позиции в другую, Кн (В.8):

$$F_{ц5} = \frac{GR}{l_{ц min 5}}, \quad (\text{В.8})$$

где  $G$  - вес стрелы с исполнительным органом, Н;

$l_{ц min 5}$  - длина цилиндра, м.

Диаметр цилиндра, мм (В.9):

$$D_{ц5} = \sqrt{\frac{4 F_{ц5}}{\pi P}}, \quad (\text{В.9})$$

Время подъема стрелы, с (В.10):

$$t_5 = \frac{\pi L}{4V}, \quad (\text{В.10})$$

где  $L$  - длина стрелы в собранном состоянии, мм.

Расход рабочей жидкости через гидроцилиндр, м<sup>3</sup>/с (В.11):

$$Q_5 = \frac{\pi D_{ц5}^2 h_5}{4 t_5}, \quad (\text{В.11})$$

где  $h_2$  - ход гидроцилиндра обеспечивающий подъем исполнительного органа заданный угол, м.

4) При повороте исполнительного органа усилие на цилиндре, кН (В.12):

$$F_{ц2} = \frac{G R}{l_{ц2 min}}, \quad (\text{В.12})$$

где  $l_{ц2 min}$  - длина цилиндра, м.

Так, как в повороте исполнительного органа принимают участие два гидроцилиндра в режиме противофазы и учитывая усилие на скос по углу, диаметр  $D_{ц2}$ , мм (В.13):

$$D_{ц2} = \sqrt{\frac{4F_{ц2}}{\pi P}}, \quad (В.13)$$

Время поворота рамы, с (В.14):

$$t_2 = \frac{\pi L}{4V}, \quad (В.14)$$

Определение расхода рабочей жидкости через гидроцилиндр, м<sup>3</sup>/с (В.15):

$$Q_2 = \frac{\pi D_{ц2}^2 h_2}{4t_2}, \quad (В.15)$$

где  $h_2$  - ход поршня обеспечивает поворот исполнительного органа на заданный угол  $\varphi$ , м.

Для всех гидроцилиндров определяется как минимальный  $Q_{\min.i}$  расход, так и максимальный  $Q_{\max.i2}$ .

### **Определение гидросистемы выемочного модуля**

Определение потребного давления насосной станции

Исходные данные:

- максимальное рабочее давление в гидроцилиндрах  $P$ , МПа;
- скорость скалывания  $V$ , м/с;
- расчетный диаметр гидроцилиндра  $d$ , мм;
- средний потребный расход рабочей жидкости при работе модулей в противофазе на 1 модуль  $Q_{ср}$ , л/мин;
- скорость жидкости в напорном трубопроводе, устанавливается исходя из требований к скорости движения жидкости в трубопроводах  $V_{mp}$ , м/с;
- максимальная длина магистралей от насосной станции до модулей  $L$ , м.

Определение общего расхода гидросистемы для  $n_M$  модулей, л/мин (В.16):

$$Q_{\Sigma} = Q_{ср} n_M \quad (В.16)$$

Учитываются местные потери, длина магистрали, м (В.17):

$$L_{np} = L + L \cdot (0,1 \dots 0,15), \quad (В.17)$$

Внутренний диаметр напорной магистрали  $d$ , мм (В.18):

$$d = \sqrt{\frac{Q_{\Sigma 4}^4}{V_{\text{тр}} \pi}}, \quad (\text{B.18})$$

Скорость течения жидкости, м/с (B.19):

$$V_{\text{тр}} = \frac{Q_4}{s}, \quad (\text{B.19})$$

где  $s$  - площадь сечения трубопровода, м<sup>2</sup> (B.20):

$$s = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (\text{B.20})$$

Режим течения жидкости в напорном трубопроводе, (B.21):

$$Re = \frac{V_{\text{тр}} d}{\nu}, \quad (\text{B.21})$$

где  $\nu = 0.02 \cdot 10^{-4}$  - кинематический коэффициент вязкости воды при температуре 5<sup>0</sup>С, м/с.

Абсолютная шероховатость стальных бесшовных труб  $K = 0,02$  мм,

Суммарные потери по длине в напорной магистрали, МПа (B.22):

$$\Delta P_{\text{н}} = \frac{K L_{\text{пр}} V_{\text{тр}}^2}{d d 2g}, \quad (\text{B.22})$$

где  $\frac{K}{d}$  - шероховатость стальных бесшовных труб, МПа.

Необходимое давление насосной станции, МПа (B.23):

$$P = P_{\text{ци.4}} + \Delta P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{ри3.}} + \Delta P_{\text{рп}} + \Delta P_{\text{зми.3}} + P_{\text{с}}, \quad (\text{B.23})$$

где  $P_{\text{ци.4}}$  - максимальное рабочее давление в гидроцилиндрах, МПа;

$\Delta P_{\text{н}}$  - потеря давления в напорной магистрали, МПа;

$\Delta P_{\text{ри3.}}$  - потеря давления на распределителе в линии управления гидроцилиндрами, МПа;

$\Delta P_{\text{рп}} \leq 0,3$  МПа - потеря давления на регуляторе потока, МПа;

$\Delta P_{\text{зми.3}} \leq 0,1$  МПа - потеря давления на гидрозамке, МПа;

$\Delta P_{\text{с}} \leq 0,5$  МПа - противодействие в сливной магистрали гидроцилиндра, МПа (складывается из потерь давления на распределительно регулирующих устройствах и потерь по длине сливной магистрали).