

На правах рукописи

Стебнев Александр Валериевич



**ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ, АДАПТИВНОЙ К
УСЛОВИЯМ ЭКСПЛУАТАЦИИ СЕКЦИИ
МЕХАНИЗИРОВАННОЙ КРЕПИ ОЧИСТНОГО
КОМПЛЕКСА**

Специальность 05.05.06 – Горные машины

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2021

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Габов Виктор Васильевич

Официальные оппоненты:

Лагунова Юлия Андреевна

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», кафедра горных машин и комплексов, профессор

Турук Юрий Владимирович

доктор технических наук, доцент, Шахтинский автодорожный институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», кафедра «Проектирования и строительства автомобильных дорог», профессор


Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», г. Тула

Защита диссертации состоится 30 августа 2021 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.07 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 30 июня 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Уголь является необходимым элементом для функционирования металлургической, энергетической и химической отраслей промышленности, несомненно, относится во многих странах, и в частности в России, к стратегическому сырью. Акционерное общество «СУЭК-Кузбасс» является основным поставщиком угля в России. Проведение принятой в АО «СУЭК-Кузбасс» стратегии повышения уровня концентрации горных работ, оснащение очистных забоев современными надёжными высоко энерговооружёнными очистными механизированными комплексами (ОМК) и вспомогательным оборудованием привело к существенному росту нагрузок на очистные забои при сокращении их количества. При этом рост потенциальных возможностей вводимых в эксплуатацию комплексов существенно превосходит достигаемую на практике их эффективность. Упущенные возможности в наращивании объемов и эффективности добычи угля по этой причине остаются весьма значимыми для предприятий.

Производительность одних и тех же комплексов существенно различается в зависимости от горно-геологических условий (ГГУ) их эксплуатации. Следовательно, сложившееся положение заключается и в самих комплексах, в недостаточной их адаптивности и адаптивности их механизированной крепи к изменяющимся в широком диапазоне ГГУ по мере отработки выемочных столбов.

Существенная роль, в плане общей адаптации ОМК к условиям эксплуатации, принадлежит его крепи, которая по назначению должна обеспечивать необходимые условия для эффективной и безопасной работы очистного забоя.

Таким образом, обоснование структуры и параметров энергоэффективной, адаптивной к условиям эксплуатации секции механизированной крепи очистного комплекса, является актуальной научно-практической задачей.

Степень разработанности темы исследования. Заметный вклад в развитие теории и практики использования механизированной крепи для очистных забоев внесли отраслевые и бассейновые научно-исследовательские и проектные институты России: ИГД им. А.А. Скочинского, Гипроуглемаш, ИГД СО РАН,

ПНИУИ и другие, известные ученые: И.В. Антипов, Г.Д. Буялич, А.В. Докукин, В.И. Клишин, Ю.А. Коровкин, И.С. Крашкин, Б.К. Мышляев, Н.Л. Разумняк, Б.А. Фролов, В.Н. Хорин, Г.И. Ягодкин, О. Якоби и многие др.

Несмотря на значительный объём теоретических и экспериментальных исследований и накопленный производственный опыт до настоящего времени не разработаны способы, технические решения и методики выбора параметров энергоэффективных, адаптивных к изменяющимся условиям эксплуатации секций механизированной крепи для комплексно-механизированных очистных забоев (КМОЗ), обеспечивающих в режиме управления горным давлением снижение вероятности разрушения пород непосредственной кровли и их высыпания в межсекционное пространство.

Целью работы является обоснование структуры и параметров энергоэффективных, кинематически и контактно адаптивных секций механизированной крепи ОМК с безимпульсным регулированием горного давления для реализации схемных и конструктивных технических решений, обеспечивающих использование энергии горного давления, уменьшение диапазона изменчивости сил сопротивления гидростоек опусканию пород кровли в режиме управления горным давлением и при выполнении циклически повторяющихся вспомогательных операций.

Идея работы заключается в повышении устойчивости процесса силового многоциклового взаимодействия секции механизированной крепи (СМК) с кровлей, которое достигается совершенствованием их структуры и рабочей характеристики уменьшением диапазона изменчивости сил сопротивления опусканию пород непосредственной кровли и приданием им свойств энергетической, силовой, кинематической и контактной адаптивности к изменяющимся условиям эксплуатации по мере отработки выемочного столба при безимпульсном методе регулирования сопротивления гидростоек с передачей части энергии горного давления вытеснением рабочей жидкости из их поршневой полости в гидросистему комплекса.

Задачи исследований:

1. Провести анализ особенностей процесса развития очистных механизированных комплексов и их щитовых секций крепи.

2. Обосновать схемные и конструктивные технические решения блока безимпульсного регулирования сопротивления (БРС) гидростоек СМК опусканию пород кровли в очистном забое.

3. Разработать структуру и обосновать параметры энергоэффективных, адаптивных к ГГУ СМК, обеспечивающих уменьшение диапазона изменчивости сил их сопротивления опусканию пород кровли при выполнении ими последовательных операций циклов в КМОЗ.

4. Провести экспериментальные исследования процесса функционирования опытного образца блока БРС на нагрузочном стенде ООО «Завод Красный Октябрь» и в шахтных условиях.

5. Установить зависимость количества энергии, отводимой в гидросистему ОМК в процессе управления горным давлением в КМОЗ при использовании блока БРС, от значений параметров СМК, ОМК и интенсивности процесса выемки.

Научная новизна работы:

1. Выявлены тенденции развития щитовых СМК, обусловленные увеличением количества их вспомогательных структурных элементов и функций при сохранении количества основных функций.

2. Доказана возможность и определены условия преобразования, передачи и использования энергии горного давления в КМОЗ угольных шахт.

3. Установлена зависимость количества энергии горного давления, преобразуемой и передаваемой гидростойками СМК в гидросистему комплекса, от параметров механизированной крепи и интенсивности процесса выемки угля.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Установлена зависимость количества энергии горного давления, передаваемой в гидросистему крепи, от параметров крепи и режима работы КМОЗ.

2. Разработаны, изготовлены и испытаны совместно с гидростойкой МКЮ.2Ш-13/27 экспериментальный и опытный образцы блоков БРС на стенде завода «Красный Октябрь» и в очистном забое шахты «Имени А.Д. Рубана» АО «СУЭК-Кузбасс».

3. Опытный образец блока БРС принят к использованию в проекте модернизации секции крепи МКЮ.2Ш-13/27 для условий шахты «Имени А.Д. Рубана» АО «СУЭК-Кузбасс».

Методология и методы исследования. В исследованиях использован комплексный метод, включающий анализ результатов теоретических исследований и опыта эксплуатации СМК, синтез схемных и конструктивных технических решений, экспериментальные исследования силового взаимодействия СМК с породами кровли в производственных условиях.

Соответствие паспорту специальности. Тема исследований соответствует области исследований паспорта специальности 05.05.06 – «Горные машины» по пунктам: п.1 «Изучение закономерностей внешних и внутренних рабочих процессов в горных машинах, комплексах и агрегатах с учетом внешней среды», п.3 «Обоснование и оптимизация параметров и режимов работы машин и оборудования и их элементов» и п. 4 «Обоснование и выбор конструктивных и схемных решений машин и оборудования во взаимосвязи с горнотехническими условиями, эргономическими и экологическими требованиями».

Положения, выносимые на защиту:

1. Установлена закономерность процесса развития СМК, заключающаяся в том, что при неизменном количестве основных структурных элементов и функций проявляются устойчивые тенденции в развитии вспомогательных структурных ее элементов и функций, направленных на улучшение контактной, кинематической и силовой адаптивностей к условиям эксплуатации:

– количество элементов и функций ручного управления устойчиво снижалось и в настоящее время сохраняется только как элементы настройки и резервирования;

– количество вспомогательных структурных элементов и функций, с каждым этапом развития СМК, устойчиво увеличивается и направлено на улучшение качества выполнения ими основных функций;

– отмечается устойчивый рост количества вспомогательных функций и операций цикла, частоты и скорости их выполнения, что неизбежно ограничивает непосредственное участие операторов в управлении процессами.

2. Повышение устойчивости работы ОМК в рациональных режимах при отработке выемочных участков достигается уменьшением диапазона изменчивости сил циклического взаимодействия гидростоек СМК с породами непосредственной

кровли и, следовательно, снижением интенсивности процесса трещинообразования и вероятности вывалов породы в межсекционное пространство, что обеспечивается безимпульсным регулированием сопротивления гидростоек опусканию пород кровли в процессе управления горным давлением и передвижкой СМК при неподвижных силовых контактах её распорных элементов с кровлей.

3. Количество энергии, отводимой в гидросистему ОМК в процессе конвергенции боковых пород в КМОЗ, прямо пропорционально давлению в гидростойке СМК, длине лавы, количеству гидравлических стоек в секции крепи, фактической нагрузке на забой и календарному времени его работы, и обратно пропорционально шагу расстановки секций по длине лавы и объёму добычи за цикл.

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается: корректностью постановки задач исследований; подтверждается непротиворечивостью её результатов фундаментальным законам и результатам испытаний гидростоек МКЮ.2Ш-13/27, оснащенных блоками БРС, на нагрузочном стенде ООО «Завод Красный Октябрь» и в промышленных условиях на шахте «Имени А.Д. Рубана» АО «СУЭК-Кузбасс».

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на Международной научно-технической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017, 2018», Санкт-Петербургский горный университет (г. Санкт-Петербург); на Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, 2017, 2018 гг.); на Международной научно-практической конференции «Подземная добыча XXI век» (г. Ленинск-Кузнецкий, 2018 г.); на научно-технических советах электромеханического факультета Санкт-Петербургского горного университета (г. Санкт-Петербург, 2016-2019 гг.).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования, в проведении анализа объекта исследований и выборе метода исследований, в формулировании основных положений диссертационной работы, выносимых на защиту, в обосновании параметров и в разработке схемных и конструктивных технических решения СМК и опытного образца блока безимпульсного регулирования сопротивления

гидростоек опусканию пород непосредственной кровли с рекуперацией энергии в гидросистему комплекса, в подготовке и проведении заводских и шахтных испытаний опытного образца блока БРС совместно с гидростойками МКЮ.2Ш-13/27.

Публикации по работе. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 10 печатных работах, в том числе в 5-ти 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-х статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и в систему цитирования Scopus. Получены 4 патента на полезную модель.

Структура и содержание. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 114 наименований и 5 приложений. Диссертация изложена на 141 странице машинописного текста, содержит 75 рисунков и 10 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены актуальность темы и степень её разработанности, цель, идея, задачи и научная новизна исследования, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, соответствие паспорту специальности, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов работы, личный вклад соискателя и данные о его публикациях.

В первой главе представлены: анализ этапов развития механизации очистных работ, очистных комплексов и их механизированных крепей; анализ эффективности эксплуатации ОМК на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» и факторов, ограничивающих нагрузки на очистные забои; анализ устойчивости режимов работы КМОЗ шахт и развития адаптивных к ГГУ секций механизированной крепи. Отмечены многофакторность условий, осложняющих работу ОМК, их вариативный характер и существенно значимое снижение нагрузок на забои в сложных ГГУ. Установлено, что одним из наиболее перспективных направлений повышения устойчивости работы ОМК в рациональных режимах

является совершенствование структуры и повышение адаптивности СМК к изменяющимся по мере отработки выемочных столбов ГГУ. Обоснованы цель и задачи исследований.

Во второй главе проведен анализ объекта исследований и закономерностей этапов развития структуры и параметров щитовых секций механизированной крепи для пластов средней мощности и мощных. Установлено, что процесс развития СМК от нулевого этапа ($x = 0-2$) до современного этапа характеризуется (рисунок 1):

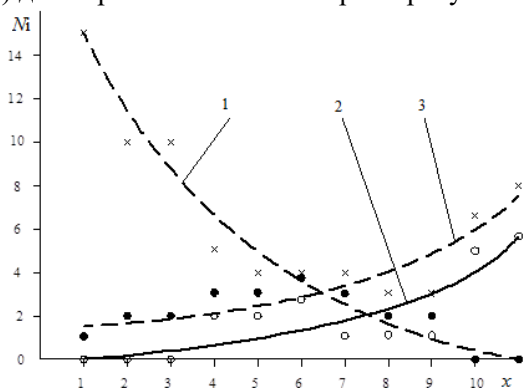


Рисунок 1 – Тенденции развития СМК: 1 – $N_{o,r}$; 2 – $N_{в,з}$; 3 – $N_{o,c}$; x – характерные точки этапов развития СМК

– устойчивым снижением количества операций, выполняемых горнорабочим очистного забоя с секциями крепи ($N_{o,r}$) за цикл, от 15 – на нулевом этапе развития до нуля – на современном этапе (1):

$$N_{o,r} = -0,011x^3 + 0,356x^2 - 4,32x + 18,87; \quad (1)$$

– устойчивым ростом количества вспомогательных структурных элементов ($N_{в,з}$) от нуля, на первом этапе развития, до 6 на четвёртом этапе ($x = 10-11$) при неизменности количества основных структурных элементов и операций за цикл (2):

$$N_{в,з} = 0,016x^3 - 0,18x^2 - 0,78x - 0,71; \quad (2)$$

– тенденцией дальнейшего роста количества операций ($N_{o,c}$), выполняемых приводами секций на всех этапах развития, включая современный (3):

$$N_{o,c} = 0,006x^3 - 0,004x^2 + 0,27x + 1,17. \quad (3)$$

Значения коэффициента уровня механизации операций ($K_m = N_{o.c}/N_{o.п}$) устойчиво увеличивается от 0,06 до 1,0, а значения коэффициента удельной функциональной нагрузки структурного элемента ($K_{yэ} = N_{o.п}/(N_э+1)$) устойчиво снижается от 5,3 до 0,9, то есть до предельного его значения. Здесь $N_{o.п}$ – количество операций за цикл выемки, выполняемых секцией.

На основании результатов анализа установлено:

- основным типом секций крепи ОМК для пластов средней мощности и мощных утвердилась поддерживающе-оградительная, агрегатированная, однорядная, щитовая двухстоечная СМК с направляющей балкой по основанию катамаранного типа;
- тенденции дальнейшего развития СМК отражены в устойчивом увеличении дополнительных структурных элементов и функций, которые направлены, в основном, на развитие адаптивности СМК к переменным условиям эксплуатации, при неизменном количестве основных элементов и функций.

На эффективность функционирования механизированной крепи в реальных условиях эксплуатации влияют следующие основные факторы: техническое состояние гидросистем механизированной крепи в реальных условиях эксплуатации; характер силовых циклических взаимодействий СМК с непосредственной кровлей; технический уровень совершенства и степень адаптивности СМК к переменным, по мере отработки выемочных столбов, ГГУ.

На основе анализа состояния гидросистемы ОМК МКЮ.2Ш-13/27 шахты «Имени А.Д. Рубана» АО «СУЭК-Кузбасс» выявлены фактические, существенно значимые диапазоны изменения значений давления рабочей жидкости в элементах гидросистемы. При этом следует отметить, что давление в напорной магистрали гидросистемы может снижаться с 32 до 16 МПа (во время передвижки конвейера), допускаются наложения диапазонов регулирования, а давление в сливной магистрали и давление подпора при передвижке СМК не контролируются и не регламентированы. Рекомендованы значения давлений в элементах гидросистемы, исключаящие совмещения или пересечения предписанных командами функций, которые могли бы вызывать сбои в алгоритме управления системой.

В процессе взаимодействия СМК с непосредственной кровлей

нарушение целостности пород кровли (заколы, вывалы и отслоения) являются в одном случае следствием завышенного сопротивления крепи, превышающего прочность пород непосредственной кровли, а в другом случае – следствием импульсного способа регулирования сопротивления гидростоек СМК опусканию кровли и ступенчатыми изменениями нагрузок на породы кровли при выполнении операций передвижки СМК. Эти явления, интенсифицирующие процесс возникновения и развития трещин в породах кровли, получили в технической литературе название динамическое и статическое «топтанье кровли». Они приводят к разрушению и просыпям пород кровли в межсекционное пространство, к неустойчивости процессов крепления кровли и управления горным давлением, к снижению производительности ОМК в КМОЗ угольных шахт.

В настоящее время в КМОЗ угольных шахт, оснащенных механизированными очистными комплексами, с энергетической точки зрения, процесс управления горным давлением построен на энергозатратной компенсационной основе: энергии конвергенции боковых пород в зоне очистных забоев противопоставляется гидравлическая энергия, создаваемая гидросистемой механизированной крепи комплекса. При этом регулирование горного давления осуществляется импульсным способом – последовательными срабатываниями предохранительных клапанов гидростоек с перепусками с большим перепадом давлений рабочей жидкости из поршневых полостей гидростоек в сливную магистраль комплекса или на почву. Основными недостатками процесса функционирования такой системы «кровля – гидростойки – почва», содержащей упругие звенья, являются:

- компенсационный энергозатратный метод регулирования сопротивления гидростоек СМК опусканию пород кровли, заключающийся в потреблении электрической энергии, её преобразовании в гидравлическую и затем в механическую, реализуемую гидростойками СМК при взаимодействии с непосредственной кровлей в КМОЗ;

- импульсный силовой характер взаимодействия гидростоек СМК с кровлей при управлении горным давлением (ГД), обуславливающий высокую вероятность разрушения породы непосредственной кровли и высыпания её в межсекционное пространство;

– большой перепад давлений, сопровождающий срабатывания предохранительных клапанов с перепуском рабочей жидкости в сливную магистраль в процессе регулирования ГД, приводящий к динамическим воздействиям на элементы гидросистемы и к снижению их ресурса;

– недостаточная кинематическая и контактная адаптивности СМК к ГГУ, изменяющимся по мере отработки выемочных участков, приводят к неуправляемым нагрузкам секций крепи и напряжениям в породах кровли, контактирующих с перекрытиями секций.

Решение обозначенной проблемы «уменьшения негативного влияния явления «топтанья» на состояние пород непосредственной кровли и на устойчивость процесса добычи угля в КМОЗ шахт», достигается:

а) переходом от применяемого метода регулирования ГД «силовым и энергетическим противодействием конвергенции пород кровли» к принципу «преобразования, передачи и использования энергии ГД в гидросистеме комплекса»;

б) уменьшением диапазона изменчивости силовых воздействий СМК на породы непосредственной кровли в режиме регулирования ГД – использованием деформационно-силовой характеристики на принципе безимпульсного регулирования, и в режиме передвижки секций крепи – совершенствованием их кинематической, контактной и квазистатической адаптивности к условиям эксплуатации.

На основе принятой стратегии обоснован комплексный метод решения проблемы, включающий безимпульсный способ регулирования сопротивления гидростоек секций крепи опусканию пород кровли; способ преобразования, передачи и использования энергии ГД в КМОЗ; способ передвижки СМК с неподвижными контактами её распорных структурных элементов с кровлей и почвой.

Из сравнения идеализированных рабочих характеристик (рисунок 2) типовой 1 с импульсным регулированием и предлагаемой 2 с безимпульсным регулированием сопротивления гидростоек СМК опусканию пород кровли следует:

– устанавливаемые уровни защиты от перегрузок гидростоек

СМК по давлению ($P_{пк1}$, $P_{пк2}$) приняты без изменений, как и в типовой характеристике, при этом давление срабатывания предохранительного клапана определяется из условий, с одной стороны, предельно допустимой нагрузки на крепь, с другой – на непосредственную кровлю по условию её прочности;

– диапазон регулируемого сопротивления гидростоек СМК, по давлению рабочей жидкости в их поршневой полости $P_{рег}$, устанавливается ниже уровня настройки давления предохранительного клапана $P_{пк1}$ настолько, чтобы их режимы работы были независимы;

– нижняя и верхняя границы диапазона регулирования $P_{рег.н}$ и $P_{рег.в}$ определяются из соотношений (4):

$$P_{рег.н} = P_n (1+K_n); \quad P_{рег.в} = P_{пк1} (1-K_v); \quad (4)$$

где P_n – давление в напорной магистрали, МПа; K_n , K_v – коэффициенты запаса устойчивости для нижней и верхней границ диапазона регулирования соответственно;

– уровень давления подпора ($P_{пн}$) при передвижке секции может быть поднят, при необходимости, до уровня начального распора ($P_{н.р}$), что может быть осуществлено использованием специальных распорных элементов в СМК с повышенными распорными усилиями, обеспечивающими неподвижность их контакта с кровлей при передвижке секции.

Технологическая функция управления сопротивлением гидростойки опусканию пород кровли реализуется блоком БРС, содержащим подпорный клапан 9 (рисунок 3), обеспечивающий независимость режима работы блока БРС от изменений давлений в напорной магистрали 11 гидросистемы крепи ОМК. Переток рабочей жидкости объемом V под давлением $P_{рег}$ из большой камеры мультипликатора давления (МД) 6 в каждом цикле работы через дроссель 7 с расходом Q в напорную магистраль может быть определён (5):

$$Q = \beta \cdot \varepsilon \cdot S_q \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_{рег} - P_n)} \quad (5)$$

где β – коэффициент расхода; ε – степень открытия дросселя; S_q – площадь сечения отверстия дросселя, м²; ρ – плотность жидкости, кг/м³; P_n – давление в напорной магистрали, МПа.

Учитывая разность давлений $\Delta P = P_{рег} - P_n$, количество

рекуперированной энергии за цикл можно определить по формуле (6):

$$E = V_M \cdot \Delta P \cdot n_c \cdot N_{\text{сц}}, \quad (6)$$

где V_M – объём малой камеры мультипликатора давления, МПа; n_c – количество гидростоек в секции; $N_{\text{сц}}$ – количество секций в КМОЗ.

При этом количество энергии, отводимой в гидросистему ОМК в процессе конвергенции боковых пород в КМОЗ пропорционально его производительности (7):

$$W_3 = C_k \cdot \Delta P \frac{\pi D_{\text{п}}^2}{4} \cdot n_c \cdot t \frac{L_{\text{л}}}{l_{\text{ш}}} \cdot \frac{Q}{G_{\text{ц}}} \cdot \eta_6, \quad (7)$$

где C_k – показатель интенсивности конвергенции боковых пород кровли, м/цикл; $D_{\text{п}}$ – диаметр поршневой полости гидростойки, м; t – календарное время работы ОМК, ч; $L_{\text{л}}$ – длина лавы, м; $l_{\text{ш}}$ – шаг расстановки СМК по длине лавы, м; Q – добыча угля в лаве за календарное время t , т/ч; $G_{\text{ц}}$ – добыча угля за цикл в КМОЗ, т; η_6 – КПД блока БРС, $\eta_6 = 0,99$.

По сформулированным требованиям и методике выбора параметров блока БРС были разработаны и выданы заводу ООО «Завод Красный Октябрь» ТЗ на разработку и изготовление экспериментального образца блока БРС для использования совместно с гидростойкой МКЮ.2Ш-13/27 ОМК.

В третьей главе изложены результаты экспериментальных исследований процесса функционирования блока БРС на нагрузочном стенде ООО «Завод Красный Октябрь» (рисунок 4) и в шахтных условиях. Цель экспериментальных исследований – оценка целесообразности, эффективности и практической возможности осуществления непрерывного безимпульсного способа регулирования сопротивления гидростоек СМК с рекуперацией энергии ГД в гидросистему СМК ОМК.

Программой экспериментальных исследований было предусмотрено проведение трех групп опытов: установочных, исследовательских и тестовых. По результатам установочных опытов оценивалась устойчивость протекания фаз (Ф1, Ф2, Ф3) процесса в режиме нарастающей нагрузки на испытываемую гидростойку (рисунок 5). В установочных опытах проверялась устойчивость значений исходных параметров работы гидростойки и гидросистемы стенда в целом при отключенном блоке БРС. При проведении исследовательских опытов определялись значения параметров

режима работы БРС при установке калиброванных дросселей с разными диаметрами отверстий. Затем были проведены опыты для проверки устойчивости значений параметров процесса при повторных опытах.

По результатам проведенных испытаний необходимо отметить (рисунок 5): в опытах продолжительность фаз удерживалась в назначенных пределах; четко отражены моменты срабатывания предохранительного клапана (точка С) и реакции по давлению в полости на выходе МД (точка Х); наблюдалось устойчивое смещение поршней МД с вытеснением рабочей жидкости в нагнетательную магистраль насосной станции при давлениях в полости низкого давления более 18,0 МПа.

По экспериментальным данным построена зависимость перемещений блока поршней МД за цикл от диаметра устанавливаемых дросселей в блок БРС (рисунок 6). Для гидростоек секций крепи типа МКЮ.2Ш-13/27 и условий КМОЗ шахты «Имени А.Д. Рубана» АО «СУЭК-Кузбасс» диапазон значений диаметра дросселя рекомендуется в пределах 0,5-1,5 мм. Увеличение диаметра дросселя приводит к пропорциональному увеличению смещения поршней МД при неизменной разности давлений, что подтверждает возможность выбора жесткости рабочей характеристики гидростоек СМК, соответствующей фактической интенсивности конвергенции боковых пород в КМОЗ. Процесс устойчивого через МД вытеснения рабочей жидкости из поршневой полости гидростойки в напорную магистраль насосной станции подтверждает возможность рекуперации энергии ГД в гидросистему механизированной крепи ОМК.

С учетом результатов испытаний были разработаны, изготовлены и испытаны два опытных образца блока БРС (рисунок 7, а) совместно с секцией крепи МКЮ.2Ш-13/27 для условий шахты «Имени А.Д. Рубана» АО «СУЭК-Кузбасс». Цель испытаний – оценка работоспособности блока БРС в производственных условиях с учетом фактического состояния гидросистем механизированной крепи МКЮ.2Ш-13/27 и значений её параметров. Испытания были проведены в период 06.11-12.11.2018 в очистном забое лавы 12-06 пласта Надбайкаимского шахты «Имени А.Д. Рубана» АО «СУЭК-Кузбасс».

Для исключения влияния изменений давления в напорной

магистрала на работу блока БРС был установлен подпорный клапан на выходе блока в линии подключения его к напорной магистрали, настроенный на давление, равное номинальному давлению насосной станции механизированной крепи очистного комплекса. В этом случае был осуществлен принцип независимости режимов работы гидростоек СМК, блоков безимпульсного регулирования гидросистем и СМК от изменений давлений в напорной магистрали СМК. Два опытных образца БРС были установлены в лаве 12-06 в секциях крепи № 97, 105. Полости высокого давления МД БРС были подключены к поршневой полости гидростойки секций, а полость низкого давления через обратный клапан, дроссель диаметром 1 мм и вентиль – к напорной магистрали гидросистемы комплекса. При испытаниях контролировались давление в напорной магистрали гидросистемы (P_M) и давление в поршневой полости гидростойки (P_H) секции крепи (рисунок 8).

Положение поршня мультипликатора блока БРС контролировалось визуально по смещению измерительной линейки, закрепленной на штоке поршней, относительно отметки смотрового окна (рисунок 7, б). Как видно из осциллограммы при значительных изменениях давления в напорной магистрали давление в поршневой полости гидростойки поддерживается устойчиво на заданном уровне. Собственно передвижка СМК осуществлена за время $t_H = 2$ с при суммарных затратах времени на передвижку более 7 с. Следовательно, резерв возможного увеличения скорости передвижки крепи составляет не менее 70 %.

В четвертой главе представлено обоснование схемных и конструктивных технических решений контактно и кинематически адаптивных СМК.

Уменьшение негативного влияния явления «топтанья» на состояние пород непосредственной кровли при выполнении операций передвижки СМК и уменьшение времени передвижки СМК могут быть достигнуты снижением разности сил распора гидростоек, действующих на породы кровли и уменьшением диапазона изменчивости сил сопротивления перемещению СМК. Однако такие результаты не могут быть достигнуты без совершенствования структуры СМК и способа их передвижения. Поэтому разработаны схемные и конструктивные технические решения СМК со

структурными элементами, повышающими кинематическую и контактную их адаптивности к переменным ГГУ: СМК с опорной направляющей балкой по почве и опорной балкой по перекрытию секции и СМК с опорной балкой и телескопическим перекрытием. При этом передвижка СМК осуществляется при неподвижных балках с переносом усилий распора на опоры скольжения опорной балки по перекрытию и на направляющую балку по основанию (рисунок 9), что обеспечивает направленность перемещений, повышенные распорные усилия, неподвижность опорных контактов и снижение сил сопротивления перемещению СМК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой приведено решение актуальной научной задачи – обоснование структуры и параметров энергоэффективной, адаптивной к условиям эксплуатации СМК, обеспечивающей повышение устойчивости работы ОМК в номинальных режимах в переменных по мере отработки выемочных участков ГГУ, что имеет существенное значение для повышения эффективности добычи угля подземным способом.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. На основе анализа выявлены основные закономерности процесса развития щитовых СМК очистных комплексов, которые заключаются в увеличении их дополнительных структурных элементов и функций, направленных на развитие адаптивности к переменным условиям эксплуатации при неизменном количестве основных элементов и функций.

2. Установлено, что повышение устойчивости работы ОМК в рациональных режимах при отработке выемочных участков с изменяющимися в широком диапазоне ГГУ достигается совокупностью технических решений, включающих безимпульсное регулирование сопротивления гидростоек опусканию пород кровли в процессе управления ГД, способ передвижения секций крепи при неподвижных силовых контактах её распорных элементов с кровлей с повышенными значениями сил распора, приводящими к уменьшению диапазона изменчивости сил циклического взаимодействия их гидростоек с породами непосредственной кровли

и, следовательно, к снижению интенсивности процесса трещинообразования и вероятности вывалов породы в межсекционное пространство.

3. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена в производственных условиях сама возможность преобразования энергии ГД в гидравлическую и её использование в гидроприводе СМК ОМК.

4. Установлено, что количество энергии, отводимой в гидросистему ОМК в процессе конвергенции боковых пород в КМОЗ, прямо пропорционально уровню регулируемого давления в гидростойке СМК, длине лавы, количеству гидравлических стоек в секции крепи, фактической нагрузке на забой и календарному времени его работы, и обратно пропорционально шагу расстановки секций по длине лавы и объёму добычи за цикл.

5. Разработаны и запатентованы технические решения – повышающие кинематическую, силовую и контактную адаптивности секций механизированной крепи (патенты на полезную модель RU №169381, RU №173403, RU №176896 и RU 189563).

6. Результаты работы приняты к использованию при модернизации СМК типа МКЮ.2Ш-13/27 для условий шахт АО «СУЭК-Кузбасс».

7. Схемное решение гидросистемы стойки секции гидрофицированной крепи ОМК с подпорным клапаном, ограничительным дросселем и пневмогидроаккумулятором обеспечивает устойчивость и независимость режима работы всех СМК лавы от изменений давлений рабочей жидкости в напорной магистрали гидросистемы комплекса.

8. Разработка и создание адаптивных к ГД в очистном забое СМК открывает возможность создания адаптивных энергосберегающих ОМК и перехода от стратегии силового противодействия ГД к стратегии эффективного использования энергии ГД в технологическом процессе в КМОЗ шахт.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК:

1. **Габов, В.В.** Адаптация секции механизированной крепи совершенствованием механической характеристики гидропривода

ее гидростоек / В.В. Габов, Д.А. Задков, Н.В. Бабырь, А.В. Стебнев, В.В. Бувич // Горное оборудование и электромеханика. – 2016. – № 3. – С. 28-34.

2. **Габов, В.В.** Методика выбора параметров блока безимпульсного регулирования сопротивления гидравлических стоек секции крепи опусканию пород кровли / В.В. Габов, Н.В. Бабырь, А.В. Стебнев // Горное оборудование и электромеханика. – 2017. – № 5. – С. 6-10.

3. **Стебнев, А.В.** Совершенствование рабочей характеристики гидропривода стоек секций механизированных крепей очистных комплексов / А.В. Стебнев, В.В. Бувич // Записки Горного института. – 2017. – Т. 227. – С. 576-581.

4. **Стебнев, А.В.** Анализ и оценка устойчивости режимов работы очистного механизированного комплекса / А.В. Стебнев, В.В. Габов, А.И. Королев // Горное оборудование и электромеханика. – 2018. – №1. – С. 37-40.

5. **Стебнев, А.В.** Испытание блока безимпульсного регулирования сопротивления гидростоек секции механизированной крепи опусканию пород кровли / А.В. Стебнев, С.Г. Мухортиков, В.В. Габов, Н.В. Бабырь // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № S48, Т.1. – С. 416-424.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

6. **Gabov, V.V.** Evaluation of structure and variables within performance rating of hydraulically powered roof support legs with smooth roof control / V.V. Gabov, D.A. Zadkov, A.V. Stebnev // Eurasian mining. – 2016. – № 2. – pp. 37-40.

7. **Stebnev, A.V.** Analysis of operation of powered longwall systems in mines of SUEK-Kuzbass / A.V. Stebnev, S.G. Mukhortikov, D.A. Zadkov, V.V. Gabov // Eurasian mining. – 2017. – № 2. – pp. 28-32.

Публикации в прочих изданиях:

8. **Стебнев, А.В.** Анализ режимов работы очистных механизированных комплексов в условиях шахт АО «СУЭК-Кузбасс» / А.В. Стебнев, С.Г. Мухортиков, Д.А. Задков // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017. Сборник научных трудов. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет. – 2017. – С. 84-89.

9. **Стебнев, А.В.** Структура адаптивной секции механизированной крепи / А.В. Стебнев, В.В. Габов,

С.Г. Мухортиков // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018. Сборник научных трудов. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет. – 2018. – С. 97.

10. **Стебнев, А.В.** Обоснование рабочей характеристики гидростойки секции механизированной крепи / А.В. Стебнев, Д.А. Задков // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018. Сборник научных трудов. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет. – 2018. – С.104.

Патенты:

11. Патент RU 169381 Российская Федерация, МПК E21D 23/04 (2006.01). Секция механизированной крепи с направляющей и опорной балками: № 2016142172: заявл. 26.10.2017: опубл. 16.03.2017 / Габов В.В., Задков Д.А., Бабырь Н.В., Бувеч В.В., Стебнев А.В.; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. – 10 с.: ил.

12. Патент RU 173403 Российская Федерация, E21D 23/04 (2006.01). Секция гидрофицированной крепи с телескопическим перекрытием: № 2017115109: заявл. 27.04.2017: опубл. 25.08.2017 / Габов В.В., Задков Д.А., Бабырь Н.В., Стебнев А.В.; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. – 11 с.: ил.

13. Патент RU 176896 Российская Федерация, E21D 23/04 (2006.01). Секция механизированной крепи с телескопическими основанием и перекрытием: № 2017133717: заявл. 27.11.2017: опубл. 01.02.2018 / Габов В.В., Морозов В.А., Стебнев А.В.; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. – 10 с.: ил.

14. Патент RU 189563 Российская Федерация, E21D 23/16 (2006.01). Гидрофицированная крепь с регулируемым сопротивлением и рекуперацией энергии: № 2018139012: заявл. 07.11.2018: опубл. 28.05.2019 / Стебнев А.В., Мухортиков С.Г.; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. – 10 с.: ил.

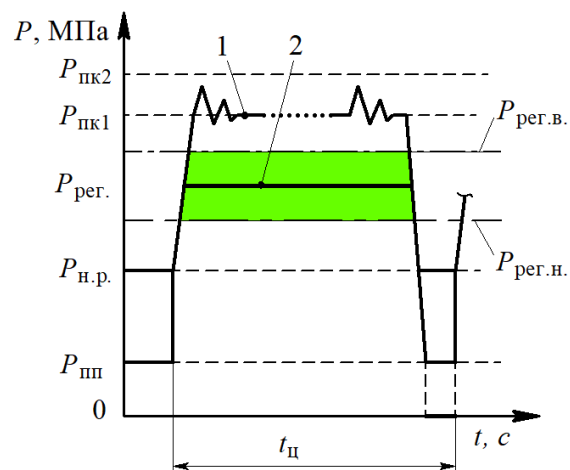


Рисунок 2 – Идеализированные рабочие характеристики гидростойки:
 1 – типовая с импульсным регулированием; 2 – с безимпульсным регулированием сопротивления; $P_{пк1}$, $P_{пк2}$ – устанавливаемые уровни защиты от перегрузок по давлению, МПа; $P_{рег}$ – диапазон регулирования сопротивления гидростоек СМК по давлению, МПа; $P_{рег.н}$ и $P_{рег.в}$ – нижняя и верхняя границы диапазона регулирования, МПа; $P_{н.р}$ – уровень начального распора, МПа; $P_{пп}$ – уровень давления подпора, МПа; $t_{ц}$ – время цикла, с

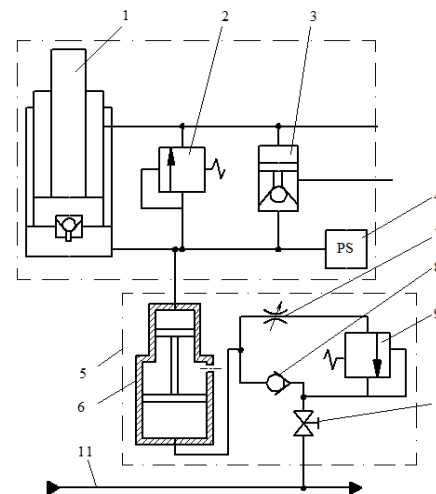


Рисунок 3 – Схема подключения блока БРС к гидростойке: 1 – гидравлическая стойка; 2 – предохранительный клапан; 3 – гидрозамок; 4 – датчик давления; 5 – блок БРС; 6 – мультипликатор давления; 7 – дроссель; 8 – обратный клапан; 9 – подпорный клапан; 10 – вентиль; 11 – напорная магистраль



Рисунок 4 – Экспериментальные исследования блока БРС. Нагрузочный стенд ООО «Завод Красный Октябрь»: 1 – направляющие; 2, 4 – нажимные каретки; 3 – гидростойка; 5 – дроссель и обратный клапан; 6 – вентиль; 7 – мультипликатор давления

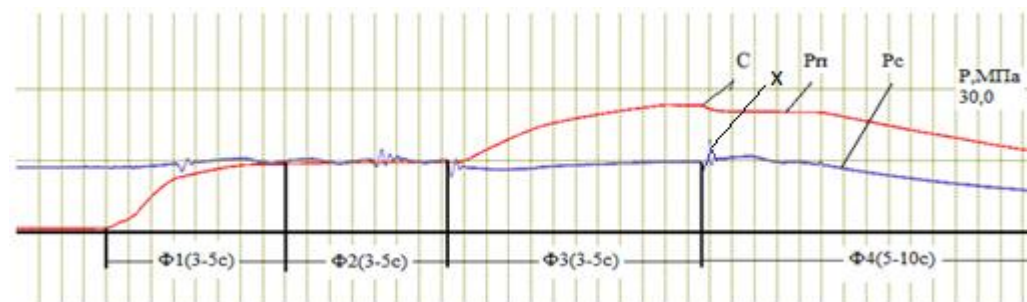


Рисунок 5 – Установочный режим проведения опыта: $P_{п}$ – давление в поршневой полости гидростойки, МПа; $P_{с}$ – давление в магистрали стенда, МПа; С – момент срабатывания предохранительного клапана; X – реакция гидросистемы (по давлению) на выходе мультипликатора; Ф1 – повышение давления в поршневой полости гидростойки до уровня давления в сети насосной станции за время $t = 3-5$ с; Ф2 – сохранение значения давления в заданном диапазоне за время не менее $t = 3-5$ с; Ф3 – повышение давления в поршневой полости стойки за время $t = 3-5$ с до момента срабатывания предохранительного клапана (точка С); Ф4 – снижение нагрузки на испытываемую стойку до уровня, определяемого давлением в сливной магистрали насосной станции стенда за время $t = 5-10$ с

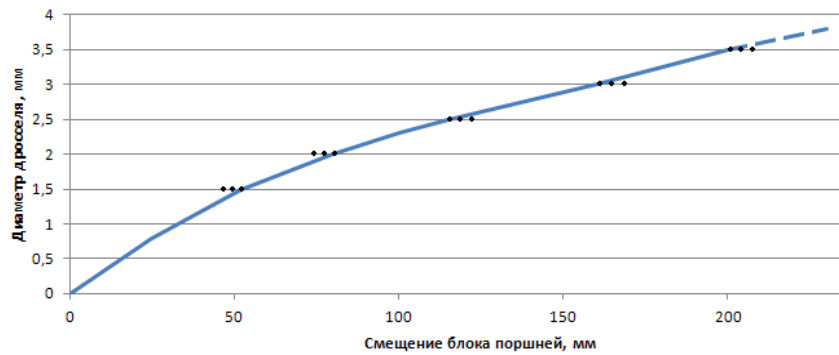


Рисунок 6 – Зависимость смещения блока поршней мультипликатора давления от диаметра дросселя за цикл

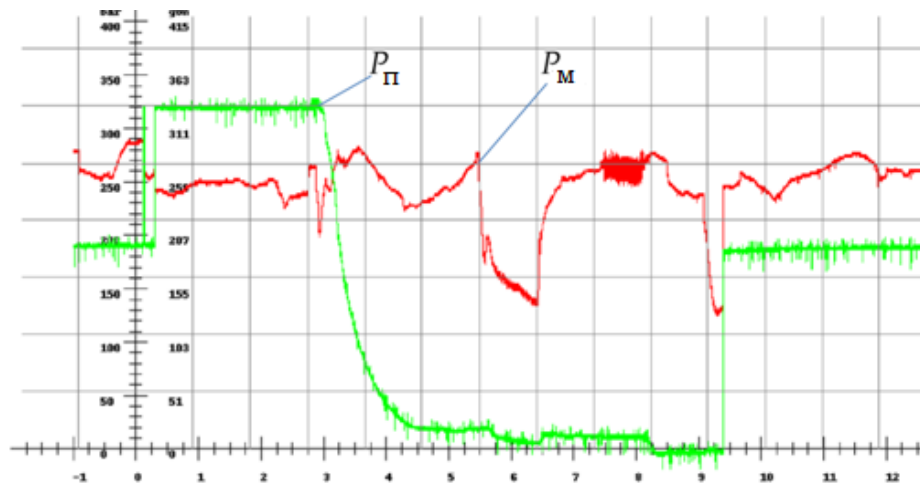


Рисунок 8 – Осциллограмма давлений за цикл операций в поршневой полости (P_{Π}) гидростойки СМК и в напорной магистрали (P_M) гидросистемы ОМК

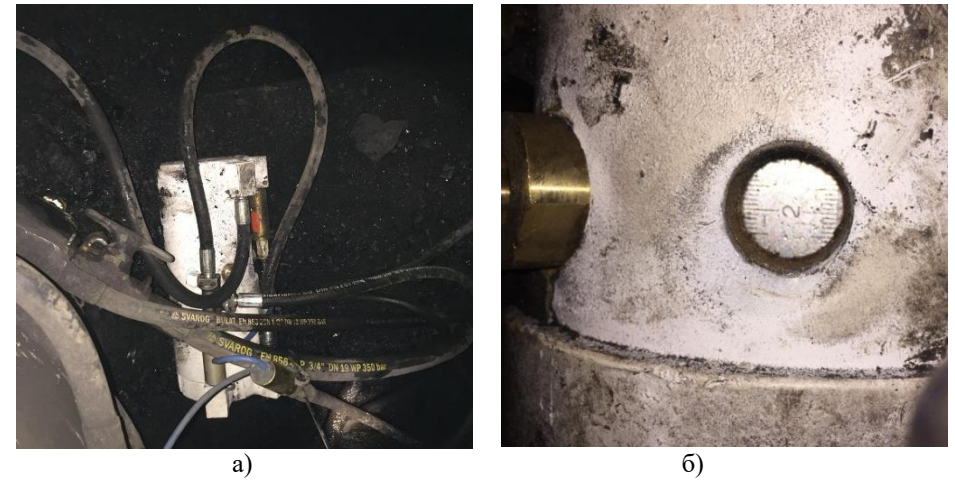


Рисунок 7 – Блок БРС в очистном забое лавы 12-06 пласта Надбайкаимского шахты «Имени А.Д. Рубана» АО «СУЭК-Кузбасс»: а – подключение к гидростойке секции крепи № 97; б – смотровое окно БРС с линейкой

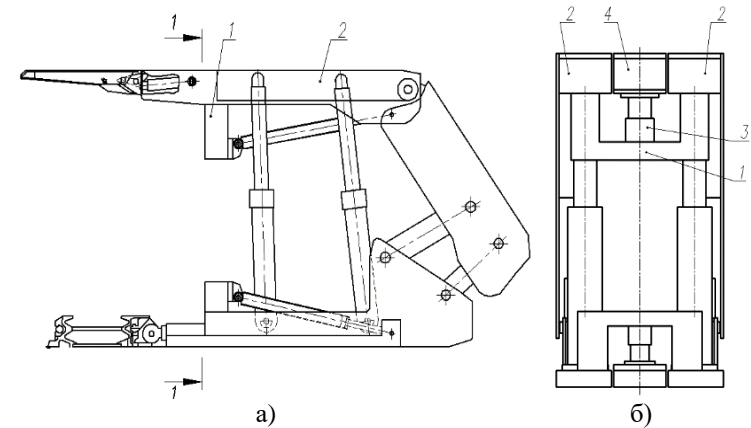


Рисунок 9 – Секция механизированной крепи с опорными балками: а – секция крепи с направляющей балкой по основанию и опорной балкой по перекрытию; б – разрез 1-1; 1 – портал; 2 – перекрытие секции крепи; 3 – гидропатрон, шарнирно соединенный с опорной балкой 4