

На правах рукописи

БАБЫРЬ Никита Валерьевич



**ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ
АДАПТИВНОЙ К СЛОЖНЫМ ГОРНО-
ГЕОЛОГИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ СЕКЦИИ КРЕПИ
ОЧИСТНОГО МЕХАНИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА**

Специальность 05.05.06 - Горные машины

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Габов Виктор Васильевич

Официальные оппоненты:

Буялич Геннадий Данилович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», кафедра горных машин и комплексов, заведующий кафедрой

Кузиев Дильшад Алишерович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», кафедра горного оборудования, транспорта и машиностроения, доцент

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет»

Защита диссертации состоится 17 декабря 2020 г. в 10 ч. 30 мин. 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 16 октября 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Уголь относится к стратегическим видам сырья и является одним из важнейших сырьевых материалов для энергетической, металлургической и химической промышленности, а с учетом разведанных больших его запасов с ним связаны и перспективы будущего развития указанных отраслей.

В настоящее время в угольной промышленности 3/4 объема угля добывается подземным способом очистными механизированными комплексами (ОМК). Интенсивность добычи угля возрастает. В процесс добычи вовлекаются угольные пласты со сложными горно-геологическими условиями (ГГУ), значения параметров которых изменяются в широком диапазоне. Переменные условия эксплуатации обуславливают нестабильность режимов работы ОМК и их механизированных крепей, а также существенное снижение эффективности их работы. Основная функция механизированной крепи по её назначению - создание условий для эффективной и безопасной работы по добычи угля в комплексно механизированных очистных забоях (КМОЗ), что достигается поддержанием кровли, ограждением призабойного пространства и управлением горным давлением. Однако современные дорогостоящие механизированные крепи в процессе отработки выемочных столбов при постоянно возрастающей нагрузке на очистные забои не достаточно адаптивны к изменяющимся ГГУ, а их применение не обеспечивает необходимую устойчивость работы ОМК в рациональных режимах.

Для решения проблемы повышения устойчивости работы ОМК в рациональных режимах необходима разработка новых схемных и конструктивных технических решений секций механизированной крепи (СМК), адаптивных к изменяющимся ГГУ.

Степень разработанности темы исследования. Существенный вклад в развитие теории и практики создания механизированных крепей внесли известные ученые Г. Д. Буялич, В.Н. Гетопанов, И.А. Кияшко, В.Н. Клишин, Ю.А. Коровкин, Ю.Ф. Пономаренко, Б.А. Фролов, В.И. Хорин, Г.И. Ягодкин, S.S. Peng, H.S. Chiang, и др.

Однако, несмотря на множество разработанных основных нормативных документов, а также научных работ вопросам повышения адаптивности секций механизированных крепей в изменяющихся по мере отработки выемочных столбов ГГУ, обоснованию их структуры и параметров уделялось недостаточное внимание, что требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Цель исследования

Выявление закономерностей силового взаимодействия секций механизированной крепи с породами непосредственной кровли для разработки научно обоснованных технических решений секции механизированной крепи, способных адаптироваться к изменяющимся горно-геологическим условиям, что обеспечит повышение эффективности и безопасности процесса добычи угля в комплексно-механизированных очистных забоях и в развитие угледобывающей отрасли страны.

Идея исследования заключается в повышении адаптивности в процессе силового взаимодействия секции механизированной крепи с породами непосредственной кровли:

- в режиме пошагового перемещения секций крепи – обоснованием структуры и параметров схемных и конструктивных технических решений контактно и кинематически адаптивных секций крепи к изменяющимся горно-геологическим условиям;

- в режиме управления горным давлением – переходом на безимпульсное регулирование сопротивления механизированной крепи опусканию пород непосредственной кровли с рекуперацией энергии горного давления в гидросистему комплекса и переходом на повышенное давление в гидросистеме.

Задачи исследования:

1. Анализ и обобщение производственного опыта, известных результатов теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации.

2. Проведение теоретических исследований процесса силового взаимодействия секций механизированной крепи с породами непосредственной кровли в комплексно-механизированном очистном забое угольных шахт.

3. Обоснование параметров устройства безимпульсного регулирования сопротивления гидростоек секции механизированной крепи опусканию пород непосредственной кровли.

4. Математическое моделирование процесса функционирования гидростоек с безимпульсным регулированием сопротивления гидростоек опусканию пород непосредственной кровли.

5. Разработка схемных и конструктивных технических решений адаптивных секций механизированной крепи к изменяющимся горно-геологическим условиям.

Научная новизна исследований:

1. Установлена зависимость степени ослабления прочности и устойчивости пород непосредственной кровли в процессе циклических

силовых воздействий механизированной крепи от кратности силовых воздействий, определяемой соотношением длины перекрытия к шагу передвижки на породы кровли и от степени напряженности пород в контакте с перекрытием секции крепи, оцениваемой коэффициентом топания кровли.

2. Установлено, что максимально возможное время работы блока в режиме регулирования за цикл выемки ограничено геометрическими размерами гидротрансформатора, встроенного в полость штока второй ступени гидростойки, увеличивается пропорционально давлению рабочей жидкости во входном цилиндре и квадрату диаметра выходного гидроцилиндра гидротрансформатора блока безимпульсного регулирования.

Теоретическая и практическая значимость работы:

На основе анализа структуры и осуществляемых операций секцией механизированной крепи установлено, что при силовом взаимодействии секций механизированной крепи с породами непосредственной кровли при передвижке секций крепи уменьшение диапазона изменчивости величины контактных напряжений в породах кровли может быть достигнуто введением дополнительных структурных элементов в секцию с повышенным усилием подпора, обеспечивающих снижение коэффициента трения скольжения подшипниковыми опорами, а также неподвижность их контакта с кровлей.

Обоснованы схемные и конструктивные технические решения, повышающие контактную и кинематическую адаптивности секции механизированной крепи, и как следствие, устойчивость процесса управления кровлей в комплексно-механизированных очистных забоях, непрерывность процесса выемки и производительность очистных механизированных комплексов.

Результаты работы использованы в отчете по научно-исследовательской работе «Исследование нагруженности секций механизированной крепи и разработка рекомендаций по повышению устойчивости их работы на основе безимпульсного управления горным давлением для условий шахты им. А.Д. Рубана» в рамках хоздоговора (№16040 и №17027, Санкт-Петербург, 2016-2018 г.)

Результаты диссертационной работы использованы в производственной деятельности АО «Шахты «Полосухинская», для повышения устойчивости работы очистного механизированного комплекса КМ138 в рациональных режимах при изменении горно-геологических условий, которые подтверждаются актом о внедрении от 03.02.2019 г. и патентом на полезную модель RU №191483 от 29.04.2019 г.

Методология и методы исследования

В работе использован комплексный метод исследований, включающий научный анализ и обобщение ранее опубликованных исследований, теоретические исследования, синтез схемных и конструктивных технических решений, промышленный эксперимент, компьютерное моделирование и обработка полученных результатов методами компьютерной алгебры.

Соответствие паспорту специальности

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.05.06 – Горные машины по п.4 области исследования «Обоснование и выбор конструктивных и схемных решений машин и оборудования во взаимосвязи с горнотехническими условиями, эргономическими и экологическими требованиями».

Положения, выносимые на защиту:

1. Установлено, что циклически повторяющиеся силовые воздействия секций механизированной крепи на породы кровли при выполнении операций цикла приводят к снижению их прочности и устойчивости, оцениваемых коэффициентом топания пород кровли, равным произведению коэффициентов, характеризующих степень кратности воздействия секции крепи на непосредственную кровлю, степень напряженности пород непосредственной кровли в зоне контакта с перекрытием секции крепи в режиме управления горным давлением, прочностные свойства непосредственной кровли, с учетом степени ослабления пород непосредственной кровли вследствие ее трещиноватости и слоистости.

2. Повышение энергетической эффективности функционирования гидросистемы гидростойки очистного механизированного комплекса с блоком непрерывного безимпульсного регулирования её сопротивления опусканию пород кровли, оцениваемой снижением потерь гидравлической энергии, передаваемой в напорную магистраль гидросистемы механизированной крепи очистного механизированного комплекса за цикл, достигается совершенствованием структуры гидросистемы установкой блока безимпульсного регулирования сопротивлением, что обеспечивает снижение гидравлических сопротивлений гидросистемы и уменьшение количества последовательных структурных элементов в блоке с 8 до 4х, исключением внешних соединительных каналов и переводом функционирования гидросистемы на повышенное давление второй ступени гидростойки.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Научные положения, выводы и рекомендации, разработанные в

диссертации, соответствуют положениям теории, построенной на известных фактах, и удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Основные положения и результаты работы докладывались и получили положительную оценку на Международно-практической конференции молодых ученых и студентов «Опыт прошлого – взгляд на будущее» (г. Тула, 2016 г.); Международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.); Международной конференции «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» (г. Тула, 2017 г.); Международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики» (г. Санкт-Петербург, 2018 г.)

Личный вклад соискателя заключается в постановке цели, в формулирование задач и в разработке методик исследований; в проведении анализа процесса циклического взаимодействия гидростоек секций механизированной крепи с породами непосредственной кровли; в формулировании положений и выводов, выносимых на защиту; в разработке схемных и конструктивных технических решений контактно и кинематически адаптивной секций механизированной крепи; в проведении математического моделирования процесса функционирования гидростоек с безимпульсным регулированием сопротивления опусканию пород непосредственной кровли.

Данные о публикациях автора

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 11 печатных работах, 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, в одной статье - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus; новизна решений защищена тремя патентами на полезную модель.

Структура и содержание

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и пяти приложений. Материалы работы изложены на 156 страницах печатного текста, в том числе содержит 16 таблиц и 57 рисунков. Список литературы включает 106 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы актуальность работы, цель и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, а также научная и практическая значимость полученных результатов исследований, апробация результатов работы, личный вклад соискателя и данные о публикациях автора.

В главе 1 представлен анализ этапов развития механизированных крепей очистных комплексов и процесса добычи угля в КМОЗ шахт. Отмечено, что с развитием очистных комплексов интенсивность процесса добычи угля возрастает. Подготавливаются к выемке участки с большими запасами, сокращается время их отработки, в процесс добычи вовлекаются низко технологичные угольные пласты. В связи с этим увеличивается диапазон изменения ГГУ по мере отработки выемочных столбов с большими запасами, в которых поддерживать устойчивость процесса добычи становится все сложнее. Была обоснована необходимость повышения адаптивности СМК к переменным ГГУ, сформулированы цель и задачи исследований.

В главе 2 представлены теоретические и экспериментальные исследования влияния циклических силовых воздействий СМК на состояние пород непосредственной кровли. В практике горных работ широко используется для обозначения этого явления термин «топтание кровли». Однако до настоящего времени не установлены факторы, влияющие на процесс «топтания», а также зависимости численного его значения от этих факторов.

Поэтому для выявления особенностей силового взаимодействия СМК с породами непосредственной кровли за цикл выемки, а также для оценки влияния последовательных силовых воздействий на снижение прочности и устойчивости пород кровли совместно с техническим отделом АО «Шахты «Полосухинская» были проведены комплексные обследования состояния пород кровли в КМОЗ шахт холдинга «Сибуглемет».

При обследовании были выполнены следующие работы:

1. Анализ рабочих характеристик СМК, применяемых на шахте;
2. Анализ состояния кровли в КМОЗ шахты.

При обследовании использовался метод фиксации наблюдаемых явлений и объектов, замеров продолжительности выполняемых операций и состояния кровли в КМОЗ АО «Шахты «Полосухинская».

По результатам обследования выявлено, что наиболее интенсивная конвергенция вмещающих пород происходит после очередного прохода очистного комбайна. При этом в непосредственной кровле возникают критические напряжения способствующие расслоению, разрушению и

высыпанию пород кровли в межсекционное пространство (рисунок 1).

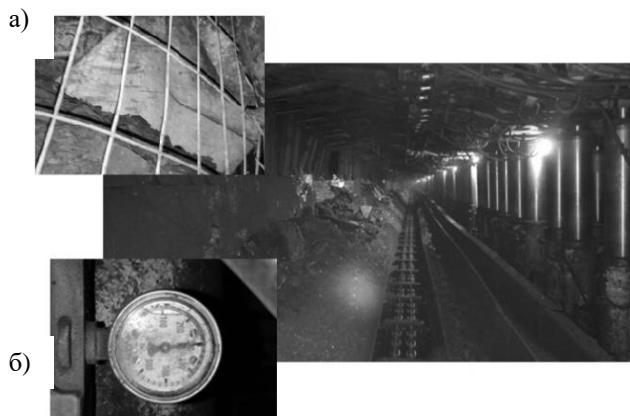


Рисунок 1 – Комплексные обследования шахт холдинга «Сибуглемет», где а) потери устойчивости незакрепленных пролетов кровли; б) манометр МП-3У на гидростойке

Установлено, что основными негативными факторами, влияющими на состояние пород кровли за время цикла выполняемых операций в лаве, являются:

- циклически повторяющиеся силовые воздействия СМК на непосредственную кровлю при снятии распора, передвижке СМК и при управлении кровлей из-за большого диапазона их изменений (рисунок 2, поз. 4-5) от минимальных значений при передвижке секций, до максимальных значений при управлении горным давлением, которые приводят к возникновению и быстрому росту трещин в породах непосредственной кровли, их разрушению и высыпанию пород;

- последовательные срабатывания предохранительного клапана (рисунок 2, поз. 3-4), формирующие характеристику «равного сопротивления», являются причиной возникновения переходных (динамических) процессов в гидростойках СМК, которые приводят при силовом взаимодействии секции крепи с кровлей к интенсификации трещинообразования и расслоения пород непосредственной кровли.

Все эти факторы обуславливают неустойчивость процесса регулирования сопротивления СМК опусканию пород кровли.

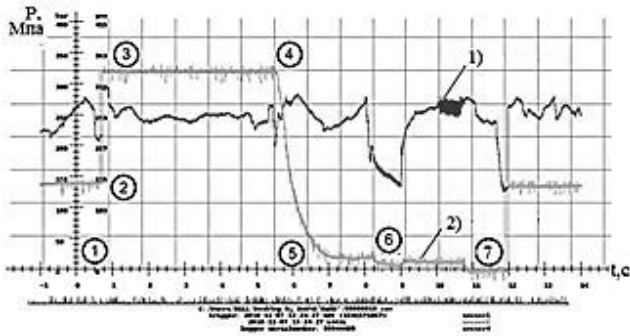


Рисунок 2 – Осциллограмма давлений в гидросистеме секции механизированной крепи М-138 за цикл операций в лаве 26-325 АО «Шахты «Полосухинская», где: 1 – давление в напорной магистрали; 2 – давление в поршневой полости.

Для предотвращения разрушений пород непосредственной кровли при снятии распора и передвижки секции крепи из-за большого диапазона изменения разности сил, усовершенствована рабочая силовая характеристика взаимодействия СМК с породами непосредственной кровли и структура СМК (см. рисунок 3, точки на кривой 4-5-6).

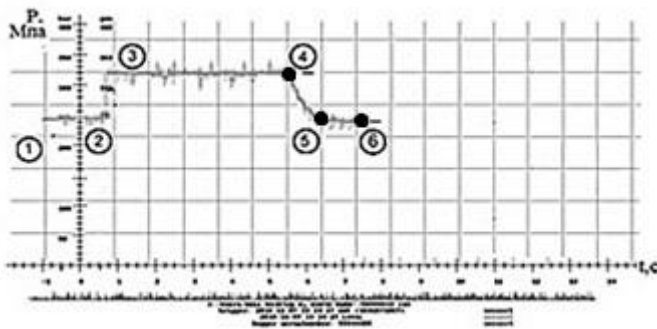


Рисунок 3 – Скорректированная рабочая характеристика СМК

По результатам комплексных обследований состояния кровли КМОЗ и анализа рабочих характеристик СМК установлено, что современные секции крепи по их структуре не могут обеспечить эти условия, поэтому необходимо совершенствование структуры и параметров СМК и их рабочих характеристик.

Цель достигается:

- уменьшением диапазона изменчивости сил сопротивления СМК опусканию пород кровли за цикл;
- дополнением структурной схемы СМК неподвижным в момент ее передвижки распорным элементом;
- уменьшением диапазона изменчивости сил взаимодействия перекрытия СМК с кровлей и основания СМК с почвой при ее циклических перемещениях;
- сохранением в момент передвижки СМК значений сил распора неподвижных опорных ее элементов с кровлей и почвой.

Диапазон изменчивости сил определяется разностью сил взаимодействия СМК с кровлей (1):

$$\Delta F = F_{нк} - F_{но} \quad (1)$$

где, $F_{нк} = P_{нк} \cdot \frac{\pi d_n^2}{4} \cdot N_{см}$ – силы сопротивления секции крепи в режиме управления горным давлением, кН; $F_{но} = P_{но} \cdot \frac{\pi d_n^2}{4} \cdot N_{см}$ – силы сопротивления секции крепи в режиме передвижки секцией крепи с подпором, кН; $N_{см}$ – количество стоек в ряду секции, шт; $P_{нк}$ – давление срабатывания предохранительного клапана, МПа; $P_{но}$ – давление подпора при передвижке, МПа.

После преобразований формула определения диапазона изменчивости сил взаимодействия с кровлей за цикл имеет вид (2):

$$\Delta F = \frac{\pi d_n^2}{4} \cdot N_{см} (P_{нк} - P_{но}). \quad (2)$$

Предложено циклически повторяющиеся силовые воздействия СМК на породы кровли при выполнении операций цикла приводящих к ослаблению пород непосредственной кровли оценивать коэффициентом «топтанья» кровли равным (3):

$$K_m = C_{ок} \cdot K_{кр} \cdot K_{\sigma} \cdot K_{mp} \cdot K_{сл}, \quad (3)$$

где $C_{ок}$ – коэффициент, характеризующий прочностные свойства непосредственной кровли (класс кровли); K_{σ} – коэффициент, учитывающий степень напряженности пород непосредственной кровли в контакте с перекрытием секции крепи в режиме управления горным давлением; $K_{кр}$ – степень кратности воздействия секции крепи на породы кровли, K_{mp} и $K_{сл}$ – коэффициенты, отражающие степень ослабления пород непосредственной кровли вследствие трещиноватости и слоистости, соответственно.

Значения коэффициента K_{σ} определяется по формуле (4):

$$K_{\sigma} = C_1 \frac{\sigma_{\phi}}{\sigma_{кр}} = C_1 \frac{P_{нк} \cdot S_{nn} \cdot n_{см}}{L_n \cdot \lambda_{ли} \cdot \sigma_{кр}}, \quad (4)$$

где $P_{нк}$ – давление срабатывания предохранительного клапана гидростойки; S_{nn} – площадь сечения поршневой полости гидростойки; n_{cm} – количество гидростоек секции крепи; L_n – длина поддерживающей части перекрытия секции крепи; $\lambda_{иу}$ – шаг расстановки секции крепи по длине очистного забоя; $\sigma_{кр}$ – критическое напряжение кровли в условиях лавы (предельное напряжение при котором кровля разрушается).

Значения коэффициента $K_{кр}$ определяется соотношением (5):

$$K_{кр} = C_2 \frac{L_n}{\lambda_г}, \quad (5)$$

где C_1 и C_2 – коэффициенты ослабления пород непосредственной кровли с изменением фактической их напряженности и кратности нагрузок, $\lambda_г$ – шаг передвижки секции крепи.

Например, в условиях АО «Шахты «Полосухинская» для случая использования ОМК КМ-138 с механизированной крепью М-138, длиной поддерживающей части перекрытия секции крепи 5 м и шагом передвижки секции крепи 0,8 м коэффициент кратности воздействия секции крепи на кровлю с породами равен (6):

$$K_{кр} = \frac{5}{0,8} = 6,2 \quad (6)$$

После преобразований формула коэффициента «топтанья» кровли будет иметь вид (7):

$$K_m = \frac{C_{ок} \cdot C_1 \cdot P_{нк} \cdot S_{nn} \cdot n_{cm}}{\sigma_{кр} \cdot \lambda_{иу}} \cdot \frac{C_2 \cdot K_{кр} \cdot K_{сл}}{\lambda_г}. \quad (7)$$

Для повышения устойчивости процесса регулирования сопротивления СМК опусканию пород кровли и циклической передвижки секции крепи без разрушений и высыпаний пород кровли необходим поиск нетрадиционных технических решений повышающих адаптивность СМК к изменяющимся ГГУ, которые обеспечат:

- снижение диапазона изменчивости сил сопротивления гидростоек опусканию пород кровли и передвижению секций крепи;
- уменьшение вероятности высыпаний породы в межсекционное пространство;
- повышение интенсивности работы очистного механизированного комплекса в рациональных режимах.

В главе 3 на основании проведенных исследований разработаны схемные и конструктивные технические решения СМК, повышающие их контактную и кинематическую адаптивности.

СМК с опорной и направляющей балками (рисунок 4) обеспечивающая неподвижность контакта опорной балки с породами кровли, снижение сил сопротивления передвижению секции крепи применением опор скольжения, предотвращение разрушений пород непосредственной кровли и высыпание их в межсекционное пространство.

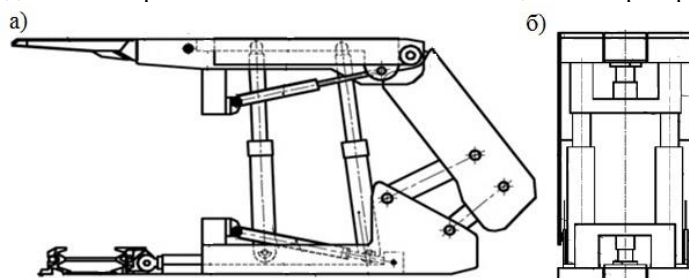


Рисунок 4 – Секция механизированной крепи с опорной и направляющей балками RU №169318, где а) общий вид; б) вид спереди

Усилия передвижки типовой и разработанной секции крепи определяются по формулам 8 и 9:

$$F_r = N \cdot f_{cy}; \quad (8)$$

$$F_{np} = N \cdot f_{np}; \quad (9)$$

Кратность снижения сил сопротивления равна отношению (10):

$$K_{cc} = \frac{F_r}{F_{np}} = \frac{f_{np}}{f_{cy}} = 10 \quad (10)$$

где, K_{cc} – кратность снижения сил сопротивления передвижению секций крепи; f_{np} – коэффициент трения скольжения с подшипниковой опорой ($0,02 \div 0,06$); f_{cy} – коэффициент сцепления перекрытия с кровлей при передвижке ($0,2 \div 0,6$); N – нормальная составляющая сил распора, кН.

Как видно из формулы 10 передвижка секции крепи с подшипниковыми опорами обеспечивает 10-кратное снижение сил сопротивления их перемещению по сравнению с типовой секцией крепи.

В таблице 1 приведено сравнение режимных и технологических параметров типовой СМК (I) и предлагаемых СМК (II, III), адаптивных не только к ГГУ, но и технологическим условиям, что расширяет возможность использования предлагаемых крепей в новых технологических схемах.

В качестве аналога блока безимпульсного регулирования (ББР) принято схемное решение обеспечивающее управление горным давлением с рекуперацией энергии в напорную магистраль гидросистемы СМК. ББР был изготовлен и испытан в производственных условиях на стенде завода ООО «Красный Октябрь» и в шахте имени А.Д. Рубана.

Целью промышленного эксперимента являлась оценка влияния ББР на изменение давления в поршневой полости гидростойки до момента срабатывания предохранительного клапана в условиях нарастающей нагрузки.

Состав объекта включает испытательный стенд (рисунок 6) с испытываемой гидростойкой 3 и элементов ББР: гидротрансформатора 4, дросселя и обратного клапана 5, вентиля 6. Гидростойка 3 установлена в двух зажимных встречно перемещающихся по направляющим 1 каретках 2.

Результаты испытаний на стенде завода ООО «Красный Октябрь» экспериментального образца устройства управления сопротивлением гидростойки, изготовленного на заводе, подтвердили возможность осуществления самого принципа безимпульсного управления горным давлением с рекуперацией энергии горного давления в гидросистему ОМК. Однако был выявлен ряд факторов, ограничивающих работоспособность блока, таких как влияние давления в напорной магистрали на режим работы в гидростойке; не защищенная компоновка блока от внешних воздействий; конструкция блока, которая загромождает межстоечное пространство СМК.

В главе 4 представлено математическое моделирование процесса функционирования гидростоек с безимпульсным регулированием сопротивления гидростоек опусканию пород непосредственной кровли.

Автором обоснована принципиально новая структура гидравлической схемы гидростойки секции крепи с ББР, установленным в полости штока второй ступени (рисунок 7).

Достоинствами разработанного ББР по сравнению с известным техническим решением являются жесткая установка гидротрансформатора во внутренней полости трубчатого штока второй ступени гидростойки; защищенная компоновка гидротрансформатора от внешних воздействий; уменьшение габаритов конструкции, которая не загромождает рабочее пространство; повышение КПД передачи энергии переходом на повышенное давление; уменьшение количества последовательных структурных элементов в блоке с 8 до 4х, исключением внешних гидрокommunikаций (шланги, бобышки поршней).

Большая камера гидротрансформатора 2 (рисунок 8) соединена с напорной магистралью 10 двумя параллельными линиями, в одной из которых последовательно установлены регулируемый дроссель 3 и подпорный клапан 4, а в другой - обратный клапан 2. Площадь сечения камеры большой поршневой полости равна S_2 .

нагружения проведено математическое моделирование процесса силового взаимодействия гидростоек с ББР установленным в штоковой полости второй ступени СМК с породами непосредственной кровли в КМОЗ.

Движение штока гидростойки под действием обрушенных пород описывается дифференциальным уравнением действующих на него сил (12):

$$m_{ш1} \cdot \ddot{y}_{ш1} = -\mu \cdot \dot{y}_{ш1} + P_4 \cdot S_4 - F - mg; \quad (12)$$

где F_i – возмущающая сила импульсного воздействия горного давления на гидростойку при смещении кровли, кН; m – масса обрушающихся пород, кг; $m_{ш1}$ – приведенная масса подвижных частей секции крепи и ГС с учетом массы жидкости в гидростойках, кг; P_4 – давление в поршневой полости второй ступени гидростойке, МПа; S_4 – площадь поршневой полости второй ступени гидростойке, мм²; $y_{ш1}$ – перемещение поршня гидравлической стойки, мм; μ – коэффициент жидкостного трения. μ – коэффициент жидкостного трения.

Движение блока поршней гидротрансформатора (13):

$$m_m \cdot \ddot{y}_m = -\mu \cdot \frac{dy_m}{dt} - P_1 \cdot S_1 + P_2 \cdot S_2 - mg; \quad (13)$$

где m_m – масса блока поршней гидротрансформатора с учетом массы жидкости, кг; P_1 – давление в камере большого поршня, МПа; P_2 – давление в камере малого поршня, МПа; S_1 – рабочей поверхности камеры большого поршня гидротрансформатора, мм²; S_2 – площадь рабочей поверхности камеры малого поршня гидротрансформатора, мм².

Из-за нелинейности системы уравнений (рисунок 9) и необходимости цикличного срабатывания логических условий, описывающих перемещение выдвигных элементов гидравлической стойки, а также для большей наглядности и контроля вычислений, использован классический четырехэтапный метод Рунге-Кутты. Решение проводилось при помощи системы компьютерной алгебры Wolfram Mathematica.

При решении системы уравнений действующая сила F_i может быть задана в любом виде: как при плавном изменении нагрузки, так и при мгновенном импульсном нагружении системы.

Для расчета в качестве исходных данных приняты рабочие характеристики реального серийного оборудования, используемого в качестве прототипа.

На рисунке 10 представлены результаты компьютерного моделирования, из которых следует, что изменения давления в поршневой полости при нагружении гидравлической стойки с гидротрансформатором незначительны. Длительность первого импульса составила не более 0,01 секунды и не превышает 2,5 МПа, что отражает увеличение

демпфирования.

Несущую способность гидростоек СМК с блоками непрерывного безимпульсного регулирования при различных динамических воздействиях (от $F_i = 1600$ кН до $F_i = 3200$ кН) можно оценить по изменению давления в полости штока второй ступени гидростойки при нагружении.

Результаты моделирования процесса вытеснения рабочей жидкости в напорную магистраль (рисунок 10) из поршневой полости гидротрансформатора блока регулирования, встроенного в штоковую полость второй ступени гидравлической стойки, подтверждают адекватность математической модели переходных процессов при передвижении элементов гидростойки СМК при изменении действующих сил. При этом обеспечивается существенное демпфирование силовых импульсов и давлений в элементах гидравлической стойки и ее гидросистеме.

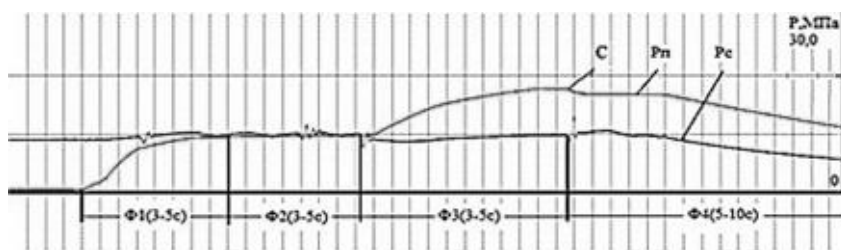


Рисунок 11 - Установочный режим проведения опыта на заводе ООО «Красный октябрь»: P_n - давление в поршневой полости гидростойки; P_c - давление в сливной магистрали гидросистемы

Сравнением теоретических результатов и экспериментальных данных испытаний гидравлической стойки МКЮ 2Ш-13/27 с блоком регулирования на нагрузочном стенде завода ООО «Красный Октябрь» г. Ленинск-Кузнецк была проверена адекватность разработанной математической модели, при увеличении внешней нагрузки на испытываемую гидравлическую стойку до момента срабатывания предохранительного клапана (точка С на линии давления, рисунок 11), наблюдалось устойчивое смещение поршней гидротрансформатора блока регулирования с вытеснением рабочей жидкости в нагнетательную магистраль насосной станции.

При этом явно выраженного роста амплитуды давления или возникновения колебательных явлений в гидросистеме не отмечено. Этим подтверждается адекватность разработанной математической модели переходных процессов движения элементов гидравлической стойки СМК к

реальным процессам при изменении внешних действующих на нее сил.

Из анализа графиков (рисунок 10) можно сделать вывод о том, что характер моделируемого процесса совпадает с экспериментальным (рисунок 11), а погрешности расчётных значений не превышают 10%

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе приведены теоретические и экспериментальные исследования, совокупность которых можно квалифицировать как решение научной задачи по обоснованию структуры и параметров адаптивной в изменяющихся горно-геологических условиях механизированной крепи очистного комплекса.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Анализ известных конструкций и режимных параметров секций механизированной крепи ОМК, показал отсутствие апробированных схемных и конструктивных технических решений адаптивных СМК для сложных ГГУ и слабых непосредственных породах кровли, состояние которых, обусловлено характером взаимодействия с механизированной крепью.

2. Установлено, что коэффициент топания кровли, характеризующий степень ослабления пород кровли, прямо пропорционален кратности силовых воздействий секции крепи на породы кровли ($K_{кр}=6,2$ – для случая использования ОМК КМ-138), степени напряженности пород в контакте с перекрытием секции крепи и коэффициентами ослабления устойчивости пород, вследствие их слоистостей и трещиноватостей, конкретные значения которых, принимаются в зависимости от горно-геологических данных.

3. Теоретически и экспериментально обоснованы рациональные параметры ББР сопротивления гидростоек опусканию пород кровли, повышающие устойчивость пород непосредственной кровли вследствие уменьшения коэффициента кратности сил взаимодействия и коэффициента сил сопротивления их перемещению ($K_{cc}=10$), а также повышающие надежность и технологичность.

4. Разработана математическая модель процесса силового взаимодействия элементов гидросистемы с учетом конструктивных и геометрических значений их параметров обеспечивающая обоснованный выбор рациональных параметров элементов гидросистемы ББР и СМК.

5. На предложенное схемное и конструктивное технические решения, контактно и кинематически адаптивных СМК, получен патент на полезную модель RU №169381 от 16.03.2017 г. и RU №173403 от

25.08.2017 г., обеспечивающие расширения диапазона условий эффективной эксплуатации на более сложные горно-геологические условия.

6. На предложенное схемное и конструктивное технические решения, гидрофицированной крепи с регулируемым сопротивлением и рекуперацией энергии, получен патент на полезную модель RU №191483 от 29.04.2019 г., обеспечивающее более устойчивую работу в рациональных режимах.

7. Результаты данной работы использованы в научно исследовательском отчете в рамках хоздоговора (№ 16040 и №17027, Санкт-Петербург, 2016-2018 г.)

8. Результаты диссертационной работы использованы в производственной деятельности АО «Шахты «Полосухинская», с целью повышения устойчивости работы ОМК KM138 в рациональных режимах при изменении горно-геологических условий, которые подтверждаются актом о внедрении от 03.02.2019 г.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня 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. Бувевич // 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. Габов, В.В. Испытание блока безимпульсного регулирования сопротивления гидростоек секции механизированной крепи опусканию пород кровли / В.В. Габов, **Н.В. Бабырь**, А.В. Стебнев, С.Г. Мухортиков// Специальный выпуск ГИАБ по материалам научно-практической конференции «Подземная угледобыча XXI века». – 2018. - С. 21-27.

Публикации в изданиях, индексирующихся в международной базе данных SCOPUS:

4. **Babyr, N.** «Enhancement of powered cleaning equipment with the view of mining and geological conditions» / N V Babyr., A I Korolev, T V Neupokoeva // IOP: Earth and Environmental Science 194 (EES). - 2018. - URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/194/3/032004/meta> (дата обращения: 17.08.2019). - Текст: электронный.

Публикации в других отечественных изданиях:

5. **Бабырь, Н.В.** Повышение адаптивности механизированной секции крепи к медленно изменяемому горному давлению / Н.В. Бабырь, Д.А. Задков // XIV Международная научно-техническая конференция «Чтения памяти В.Р. Кубачека». Екатеринбург. – 2016. - С. 18-21.

6. **Бабырь, Н.В.** Повышение адаптивности секции механизированной крепи совершенствованием механической характеристики ее гидростоек. / Н.В. Бабырь // Инновации на транспорте и в машиностроении: сборник трудов IV международной научно-практической конференции. Том II. Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». Санкт-Петербург. – 2016. - С. 9-12.

7. **Бабырь, Н.В.** Повышение устойчивости работы ОМК в сложных горно-геологических условиях / Н.В. Бабырь, Д.А. Задков // Сборник трудов 6-ой Международно-практической конференции молодых ученых и студентов «Опыт прошлого – взгляд на будущее» ФГБОУ «Тульский государственный университет». Тула. – 2016. - С. 265-268.

8. **Бабырь, Н.В.** Адаптация механизированных крепей для изменяющихся по мере отработки выемочных столбов горно-геологических условий / Н.В. Бабырь // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018. Санкт-Петербург. – 2018. - С. 89.

Результаты интеллектуальной деятельности:

9. Патент №169318 Российская Федерация, МКП E21D23/04, E21D23/06. Секция механизированной крепи с направляющей и опорной балками: № 2016142172; заявл. 26.10.2016; опубл. 16.03.2017 / Габов В.В., Задков Д.А., **Бабырь Н.В.**, Буевич В.В., Стебнев А.В.; заявитель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». – 9 с.: ил. – Текст: непосредственный.

10. Патент №17340 Российская Федерация, МКП E21D23/04. 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 ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». – 11 с.: ил. – Текст: непосредственный.

11. Патент №191483 Российская Федерация, МКП E21D15/44, E21D23/16. Гидрофицированная крепь с регулируемым сопротивлением и рекуперацией энергии: №2019113188; заявл. 29.04.2019; опубл. 07.08.2019 / Габов В.В., **Бабырь Н.В.**; заявитель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». – 7 с.: ил. – Текст: непосредственный.



Рисунок 6 – Нагрузочный стенд завода ООО «Красный Октябрь»

$$\begin{aligned}
 m_{ш1} \cdot y_{ш1}'' &= -\mu \cdot y_{ш1}' + P_4 \cdot S_4 - F - mg; \\
 m_M \cdot y_M' &= -\mu \frac{dy_M}{dt} - P_1 \cdot S_1 + P_2 \cdot S_1 - mg; \\
 m_{ш2} \cdot y_{ш2}'' &= -\mu \cdot y_{ш2}' + P_5 \cdot S_5 - P_4 \cdot S_4 - mg; \\
 \frac{S_1(y_M^{max} - y_M) + V_{ш1}}{E_{ж}} \cdot \frac{dp_1}{dt} &= y_M' \cdot S_1 - \varphi \cdot S_1 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_6)}; \\
 \frac{S_2(y_M^{max} - y_M) + V_{ш1}}{E_{ж}} \cdot \frac{dp_2}{dt} &= -\varphi \cdot S_1^{AP} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_2 - P_3)} - y_M' \cdot S_2; \\
 \frac{S_3(y_M^{max} - y_M) + V_{ш1}}{E_{ж}} \cdot \frac{dp_3}{dt} &= \varphi \cdot S_1^{AP} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_2 - P_3)} - \varphi \cdot S_2^{AP} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_3 - P_4)}; \\
 \frac{S_4(y_M^{max} - y_M) + V_{ш1}}{E_{ж}} \cdot \frac{dp_4}{dt} &= \varphi \cdot S_2^{AP} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_3 - P_4)} + \varphi \cdot S_3^{AP} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_5 - P_4)}; \\
 \frac{S_5(y_M^{max} - y_M) + V_{ш1}}{E_{ж}} \cdot \frac{dp_5}{dt} &= \varphi \cdot S_2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_6 - P_5)} - \varphi \cdot S_3^{AP} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_5 - P_4)}; \\
 \varphi \cdot S_1 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_6)} - \varphi \cdot S_2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_6 - P_5)} &= \beta \cdot V_{шл} \cdot \frac{dp_{шл}}{dt}.
 \end{aligned}$$

Рисунок 9 – Система основных дифференциальных уравнений компьютерной алгебры Wolfram Mathematica

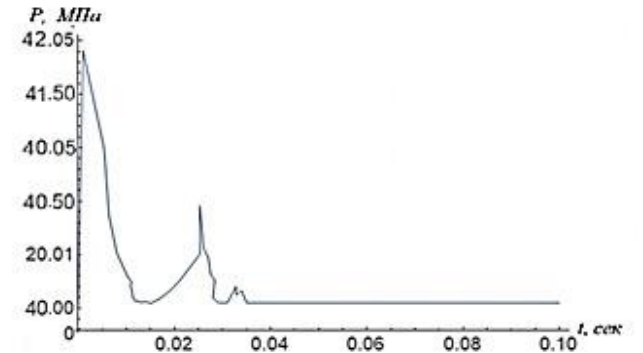
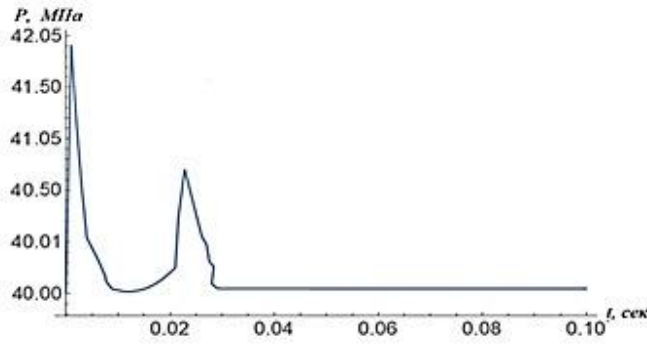
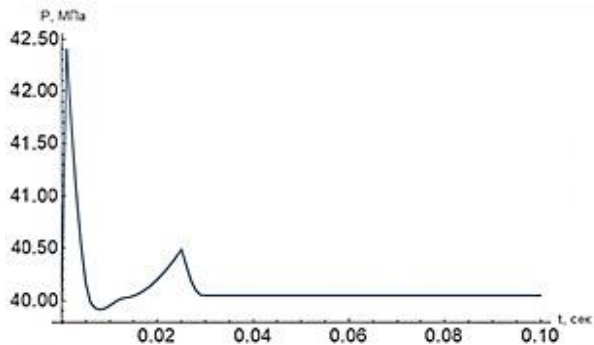


Рисунок 10 - Результаты математического моделирования при возмущающей силе $F_i = 1600$ кН, 2500 кН и 3200 кН

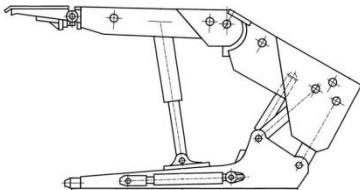
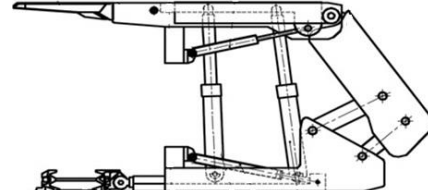
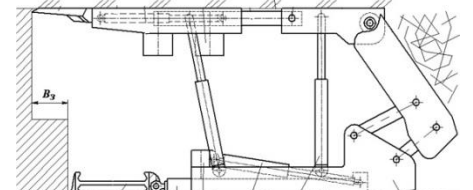
| Режимные и технологические параметры | I типовая | II разработанная (с опорной и направляющей балками) | III разработанная (с телескопическим перекрытием) |
|---|--|---|---|
| Наличие распорного элемента при передвижке | нет | опорная балка | завальная или забойная части |
| Давление в поршневой полости ГС | пассивно изменяющееся от $P_{н.р}$ - $P_{пк}$ | с ББР регулирование $P_{п.п} = 28-34$ МПа | с ББР регулирование $P_{п.п} = 28-34$ МПа |
| Режимы передвижки | - с разрывом - с пассивным подпором 1,0-1,5 МПа | - с разрывом - активный - с распором опорной балки 1,5- $P_{н.р}$ | - с разрывом - активный - с распором на опорный элемент 1,5- $P_{н.р}$ |
| Контакт с кровлей при передвижке | подвижный | неподвижный опорный элемент | неподвижный опорный элемент |
| Давление настройки ПК | $P_{п.к} = 40-45$ МПа | $P_{п.к} = 45$ МПа | $P_{п.к} = 45$ МПа |
| Диапазон регулирование сопротивления | нет | $P_{рег.} = 36-40$ МПа | нет |
| Увеличение ширины призабойного пространства (B_3) | B_3 | B_3 | $B_3; 2B_3$ |
| Увеличение схем групповой передвижке | - | - | + |
| Сохранность кровли при передвижке | - | + | + |
| Конструктивное исполнение |  |  |  |

Таблица 1 – Сравнение режимных и технологических параметров работы, типовой и предлагаемых секций механизированной крепи