DOI: *10.25515/PMI.2017.5.576*

УДК 622.23.05

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОЧЕЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОПРИВОДА СТОЕК СЕКЦИЙ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ КРЕПЕЙ ОЧИСТНЫХ КОМПЛЕКСОВ

А.В.СТЕБНЕВ[1], В.В.БУЕВИЧ[2]
[1] *ОАО «СУЭК – КУЗБАСС», Ленинск-Кузнецкий, Россия*
[2] *АО «ВНИИ Галургии», Санкт-Петербург, Россия*

Рассмотрен способ снижения динамической нагруженности секции крепи и пород непосредственной кровли, возникающей вследствие последовательных во времени срабатываний предохранительного клапана при работе стоек в режиме «равного сопротивления». В разработанной рабочей характеристике гидростоек секций механизированной крепи защита от перегрузок выделена в самостоятельную функцию и отделена от функции управления горным давлением. Сопротивление гидростоек секций крепи опусканию пород кровли регулируется безымпульсным способом, а передвижка секций крепи может осуществляться в «безразгрузочном» режиме. В результате снижается статическое «топтание» непосредственной кровли, а в режиме управления горным давлением исключаются динамические воздействия механизированной крепи на непосредственную кровлю. При этом защита секции крепи от перегрузок срабатывает только при перегрузке крепи и не участвует непосредственно в формировании процесса управления горным давлением. Предложенный безымпульсный способ обеспечивает управляемую передачу гидравлической энергии с малым перепадом давлений из поршневых полостей гидростоек в напорную магистраль гидросистемы очистного механизированного комплекса и последующее полезное ее использование.

***Ключевые слова*:** уголь, забой, крепь, гидросистема, горное давление, регулирование, рабочая характеристика, «топтание» кровли, адаптация

***Как цитировать эту статью*:** Стебнев А.В. Совершенствование рабочей характеристики гидропривода стоек секций механизированных крепей очистных комплексов / А.В.Стебнев, В.В.Буевич // Записки Горного института. 2017. Т. 227. С. 576-581. DOI: 10.25515/PMI.2017.5.576

Введение. С момента создания в середине XX в. первых очистных механизированных комплексов (ОМК) для подземной добычи угля в длинных комплексно-механизированных очистных забоях (КМОЗ) шел поиск наилучших конструкций секций крепи [6, 7] и способов управления горным давлением в очистных забоях, совершенствовались гидросистемы секций крепи и гидросистемы управления механизированной крепью комплексов [5, 9, 14]. За это время созданы многочисленные типы надежных мощных высокопроизводительных очистных комплексов с гидрофицированными крепями с ручным, дистанционным, программным и автоматизированным управлением [8, 12].

Известны значительные успехи в повышении интенсивности очистных работ в КМОЗ угольных шахт преимущественно при отработке высокотехнологичных угольных пластов [6, 7, 16-20]. Однако при отработке угольных пластов в сложных горно-геологических условиях эффективность использования комплексов существенно снижается [13].

В настоящее время изготовление механизированных крепей, как правило, осуществляется под конкретные горно-геологические и технологические условия эксплуатации. Но и в этом случае горное давление и прочностные свойства пород непосредственной кровли изменяются, как правило, в широком диапазоне, что существенно сказывается на эффективности использования комплексов. Одной из причин такого положения является неизменяемая, жесткая по структуре, форме и значениям параметров, рабочая характеристика гидропривода стоек секций крепи.

Постановка проблемы. Работа современных секций механизированных крепей (СМК), с их жесткими по усилиям рабочими характеристиками гидропривода стоек, сопровождается статическим и динамическим «топтанием» непосредственной кровли. Последствия этих процессов проявляются в интенсивности трещинообразования в породах кровли, ее просыпях в призабойное пространство, в несимметричных нагрузках на крепь и в потере контакта перекрытий крепи с кровлей. Поэтому повышение эффективности процесса управления горным давлением в очистном забое совершенствованием структуры и параметров СМК, их рабочих характеристик и гидростоек были и остаются актуальными.

DOI: 10.25515/PMI.2017.5.576

Цель работы заключается в повышении эффективности управления сопротивлением гидростоек СМК опусканию пород непосредственной кровли исключением из процесса статических, с большим диапазоном изменения значений, и динамических силовых воздействий СМК на кровлю при выполнении ими всех операций цикла.

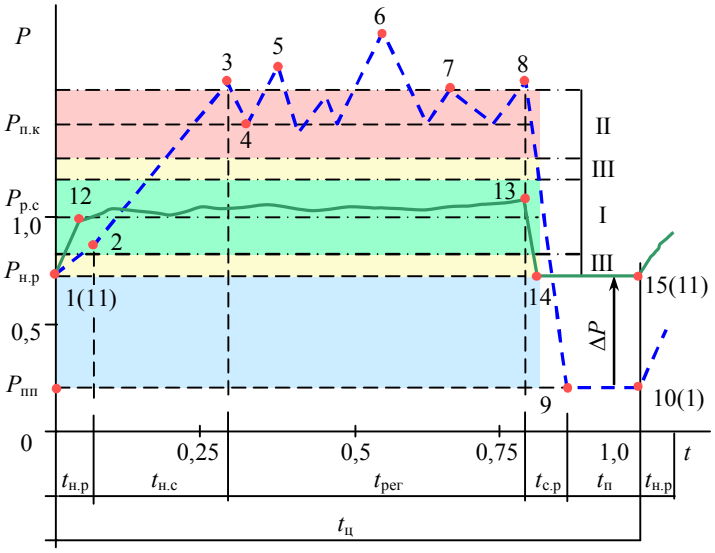


Рис.1. Рабочие характеристики гидростойки СМК
I – зона регулирования сопротивления ($P_{р.с}$); II – зона настройки предохранительного клапана (зона защиты); III – зоны разделительные

Результаты и их обсуждение. Основным силовым опорным элементом любой секции механизированной крепи является гидравлическая стойка. В соответствии с заданной рабочей характеристикой она циклически выполняет функции силового взаимодействия с породами почвы и кровли через основание и перекрытие секции крепи. Качество процесса поддержания кровли, ограждения призабойного пространства от просыпей и вывалов породы зависит от качества выполняемых каждой секцией и механизированной крепью комплекса в целом всех операций цикла и их опосредованного влияния на процесс управления горным давлением. Процесс взаимодействия СМК с кровлей, в соответствии с ее типовой рабочей характеристикой, отмечен на графике (рис.1) точками 1-10. Изменение давления в поршневой полости гидростойки и время в цикле операций представлены в относительных единицах.

Цикл функционирования секции механизированной крепи отражают участки рабочей характеристики ее гидростойки, при этом они показывают медленно изменяющиеся (статические) значения давления рабочей жидкости в поршневой полости гидростоек. Основные операции цикла: начальный распор с давлением $P_{н.р}$ отражает линия 1-2 во времени $t_{н.р}$, работа в режиме нарастающего сопротивления показана линией 2-3 во времени $t_{н.с}$, работа в режиме постоянного (равного) сопротивления отражена линией 3-8 ($P_{рег}$) и временем регулирования $t_{рег}$ с характерными точками 3 и 4 (3 – открытие предохранительного клапана при достижении им давления настройки $P_{п.к}$ и 4 – закрытие предохранительного клапана), точками 5-8 показаны различные по величине забросы давления, линия 8-9 – снятие распора ($P_{с.р}$) для передвижки секции крепи и линия 9-10 отражает давление подпора ($P_{пп}$) при передвижке.

В процессе конвергенции боковых пород в упруго деформируемых звеньях системы «механизированная крепь – непосредственная кровля» (рабочая жидкость в поршневых полостях гидростоек, оболочки цилиндров стоек, породы кровли) накапливается потенциальная энергия [9]. Как отмечал в своем исследовании И.В.Антипов под статическим «топтанием» кровли понимается состояние, когда «…система «крепь – породный массив» не приходит в состояние равновесия даже при отсутствии внешних воздействий, каким является перемещение крепи. В процессе передвижки крепи наблюдается динамическое «топтание кровли», обусловленное снятием распора при перемещении секции механизированной крепи к забою, которое также отрицательно воздействует на нижний слой пород кровли» [1, с.16]. Таким образом, участок характеристики 3-8, или работа в режиме постоянного сопротивления, показывает негативный эффект статического «топтания», а перепад статических сил, обусловленный снятием распора при передвижке крепи, отражает негативный эффект динамического «топтания» пород непосредственной кровли.

Значительная разность давлений рабочей жидкости в поршневых полостях гидростоек (распорных усилий) в начале и конце указанных операций приводит к активизации процесса образования «системных» техногенных трещин в породах непосредственной кровли, которые направлены преимущественно параллельно и перпендикулярно плоскости забоя [9].

В производственных условиях используются механизированные крепи, рассчитанные на предельные прогнозируемые нагрузки в конкретных условиях эксплуатации, с учетом значений которых устанавливается уровень давления срабатывания предохранительных клапанов ($P_{п.к}$).

Поэтому гидростойки секций в процессе управления горным давлением работают преимущественно в режиме нарастающего сопротивления (участок 2-3, рис.1), не выходя на режим постоянного сопротивления 7. Как показывают многочисленные данные, накопленные за годы эксплуатации комплексов, стойки механизированной крепи в этом случае, как правило, нагружаются неравномерно, а срабатывания предохранительных клапанов отражают, по сути, аварийные ситуации [3].

Поэтому нарушения целостности пород кровли (заколы, вывалы и отслоения) в одном случае являются следствием завышенного сопротивления крепи, превышающего прочность пород непосредственной кровли, в другом – следствием последовательных срабатываний предохранительного клапана, которые сопровождаются динамическими силовыми воздействиями на породы непосредственной кровли [4, 15].

Интегральными оценками режимов работы секций крепи являются: длительность цикла ($t_{ц}$) последовательно выполняемых операций; средневзвешенное за цикл сопротивление ($F_{св}$) гидростойки или секции крепи; перепады давлений в поршневых полостях гидростоек в статических и динамических режимах при выполнении операций цикла.

Длительность цикла работы секции крепи слагается из длительности отдельных операций:

$$t_{ц} = t_{н.р} + t_{н.с} + t_{рег} + t_{с.р} + t_{п},$$

где $t_{н.р}$ – время начального распора; $t_{н.с}$ – время нарастающего сопротивления; $t_{рег}$ – время регулируемого сопротивления секции (гидростойки); $t_{с.р}$ – время снятия распора с секции крепи; $t_{п}$ – время передвижки секции крепи.

Время работы секции крепи в режиме регулируемого сопротивления ($P_{р.с}$) не зависит от режима работы секции и определяется исключительно длительностью цикла выемки угля в КМОЗ.

Приращение значений давления в поршневой полости стоек при выполнении операций цикла определяется разностью давлений в начале и в конце каждой выполняемой операции (рис.1) и будет равно при выполнении операции начального распора $\Delta P_{н.р_I} = P_{н.р} - P_{пп}$; нарастающего сопротивления $\Delta P_{н.с_I} = P_{п.к} - P_{н.р}$; разгрузки стоек (снятия распора) $\Delta P_{с.р_I} = P_{п.к} - P_{пп}$. Уровень подпора $P_{пп}$ в режиме передвижки СМК (рис.1) устанавливается в зависимости от степени устойчивости пород непосредственной кровли.

Режим функционирования СМК осуществляется в повторно-кратковременном режиме. Для такого режима сопротивление следует оценивать его средневзвешенным значением, с учетом сил и времени их действия за цикл. Средневзвешенное сопротивление определяется с учетом действия нагрузки за отдельные промежутки времени t_i в течение цикла:

$$F_{св} = \frac{\sum_{1}^{n} F_i \cdot t'_i}{\sum_{i=1}^{n} t'_i},$$

где F_i – осредненные распорные усилия гидростоек за время выполнения операций цикла: $\overline{F}_{н.р}$ – начального распора, $\overline{F}_{н.с}$ и $\overline{F}_{р.с}$ – нарастающего и регулируемого сопротивлений, $\overline{F}_{с.р}$ – снятия распора; $\sum_{i=1}^{n} t_i = t'_{ц}$ – продолжительность работы СМК за один цикл.

При этом величина усилия будет равна произведению соответствующего давления рабочей жидкости в поршневой полости на площадь поршня гидростойки:

$$F_i = P_i \pi D^2 / 4,$$

где P_i – давление рабочей жидкости в поршневой полости гидростойки в рассматриваемом режиме работы; D – диаметр поршня гидростойки.

Степень динамической нагруженности секции за время регулирования горного давления, или в целом за цикл операций, может быть оценена дисперсией, среднеквадратичным отклонением или коэффициентом вариации нагрузок.

Технические решения. Для повышения устойчивости процесса управления горным давлением, предотвращения высыпания пород кровли, повышения адаптации СМК к изменяющимся горно-геологическим условиям предлагаются СМК и механическая характеристика гидропривода ее стоек более совершенной структуры. В основу технических решений заложены следующие принципы:

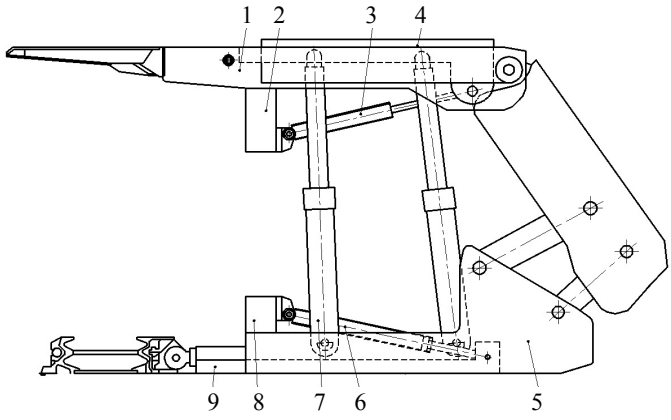


Рис.2. Общий вид секции механизированной крепи

– шагающий способ передвижки СМК с неподвижных контактов распорных элементов секций крепи с кровлей и почвой (рис.2) с компенсационным переносом распорных усилий с перекрытия 1 на распорную балку 4 и с основания 5 на направляющую балку 9 [11];

– существенное уменьшение перепада давлений в поршневых полостях гидростоек при выполнении операции начального распора, нарастающего сопротивления и передвижки секции с подпором (см. рис.1, точки 11-15);

– отделение функции регулирования горного давления от функции защиты СМК от перегрузок;

– безымпульсный способ регулирования сопротивления гидростоек СМК опусканию пород кровли [2, 10];

– адаптивная к изменяемому горному давлению механическая характеристика гидропривода стоек СМК.

Особенностями структурного построения секции крепи являются (рис.2, см. таблицу):

– наличие симметрично расположенной направляющей балки 9 относительно основания 5, при этом балка гидродомкратом передвижки 6 через траверсу 8 с опорным механизмом обеспечивает приподъем основания при передвижке секции;

– наличие опорной балки 4, расположенной в продольном пазу перекрытия 1 с возможностью пошаговой ее передвижки гидродомкратом 3 относительно перекрытия [11];

– основание и перекрытие секции оборудованы опорными механизмами, закрепленными на траверсах 2 и 8, обеспечивающими специальными гидропатронами компенсационный перенос распорных усилий стоек 7 через подшипниковые опоры скольжения на направляющую и опорную балки.

Сравнение значений параметров рабочих характеристик

Параметры режимов работы гидростоек СМК при операциях	Рабочие характеристики		
	I (типовая)	II (разработанная)	III (типовая к разработанной)
1. Давление подпора при передвижке	$P_{\text{пп I}} = \begin{cases} 0 \\ P_{\text{пп}} \end{cases}$	$P_{\text{пп II}} = \begin{cases} 0 \\ P_{\text{пп}} \\ P_{\text{н.р}} \end{cases}$	$\frac{P_{\text{пп}}}{P_{\text{пп}}} = 1{,}0$ $\frac{P_{\text{н.р}}}{P_{\text{пп I}}} \gg 1{,}0$
2. Приращение давления начального подпора	$\Delta P_{\text{н.pI}} = P_{\text{н.р}} - P_{\text{пп}}$	$\Delta P_{\text{н.pII}} = P_{\text{н.р}} - P_{\text{пп}}$	$\Delta P_{\text{н.pII}} \ll P_{\text{н.pI}}$
3. Приращение давления в режиме нарастающего сопротивления	$\Delta P_{\text{н.cI}} = P_{\text{п.к}} - P_{\text{н.р}}$	$\Delta P_{\text{н.cII}} = P_{\text{р.с}} - P_{\text{н.р}}$	$\Delta P_{\text{н.cII}} \ll P_{\text{н.cI}}$
4. Перепад давлений в режиме регулируемого сопротивления	$\Delta P_{\text{perI}} = \Delta P_{\text{п.к}}$	–	Динамическое силовое воздействие
	–	$\Delta P_{\text{perII}} = \Delta P_{\text{р.с}}$	Статическое силовое воздействие
	–	–	$\Delta P_{\text{perII}} < \Delta P_{\text{perI}}$
5. Снятие распора перед передвижкой	$\Delta P_{\text{с.pI}} = P_{\text{п.к}} - P_{\text{пп}}$	$\Delta P_{\text{с.pII}} = P_{\text{perII}} - P_{\text{н.р}}$	$\Delta P_{\text{с.pII}} \ll \Delta P_{\text{с.pI}}$

Структура разработанной рабочей характеристики представлена на рис.1 (точки 11-15) и в сравнении с типовой характеристикой – в таблице. В характеристике установлены уровни по давлению в поршневых полостях стоек, обеспечивающие начальный распор секции, достаточный для исключения расслоения пород непосредственной кровли; необходимый подпор секции при

передвижке и выделены специальные зоны I-III. В таблице регулированию в существующих секциях крепи ($\Delta P_{\text{регI}}$), которое определяется давлением ($P_{\text{п.к}}$) настройки предохранительного клапана, соответствует линия 3-8, а в разработанной схеме давлению регулирования ($\Delta P_{\text{регII}}$) соответствует линия 12-13 (рис.1). Зона I отражает пределы регулирования сопротивления ($P_{\text{р.с}}$) секции крепи (зона адаптации СМК к скорости опускания пород кровли). Зона II показывает пределы настройки предохранительных клапанов, выполняющих исключительно функцию защиты секции от перегрузок. Зоны III разделяют функциональные зоны I и II для исключения ложных срабатываний из-за их взаимовлияний.

Передвижка секции механизированной крепи (без балок) в зависимости от условий может осуществляться в трех различных режимах: в безразгрузочном режиме, с частичной компенсацией усилия распора и с разрывом контакта перекрытия секции с непосредственной кровлей. При этом работа в каждом из трех режимов включает последовательное выполнение операций: разгрузки гидростоек (снятие распора $P_{\text{срII}}$, точки 13, 14 рис.1), передвижки секции (точки 14, 15) и последующего распора гидростоек (точки 11, 12) с опорой основания 5 (рис.2) в почву и перекрытия 1 в кровлю. Уменьшение циклически повторяющихся силовых воздействий на непосредственную кровлю при передвижке секций крепи обеспечивается компенсацией распорных усилий на распорную и направляющую балки (рис.2). При этом передвижка секций крепи осуществляется при неподвижных контактах распорной балки 4 с кровлей и направляющей балки 6 с почвой.

При передвижных СМК в безразгрузочном режиме и в режиме с подпором подшипниковые опоры обеспечивают снижение сил трения при скольжении их по опорным балкам. Устройство безымпульсного регулирования сопротивления гидростойки в функции скорости опускания пород непосредственной кровли изменяет жесткость ее рабочей характеристики. Жесткость гидростоек обеспечивается дозированным увеличением или уменьшением непрямого перетока рабочей жидкости из ее поршневой полости с малым перепадом давления через редукционное устройство в напорную гидромагистраль ОМК. Пределы саморегулирования давлений в поршневых полостях гидростоек (пределы адаптации, зона I, рис.1) устанавливаются в зависимости от типа кровли.

Из сравнения параметров режимов работы типовой секции крепи с рабочей характеристикой I и разработанной адаптивной секции с ее рабочей характеристикой II (см. таблицу) следует, что существенно снижаются перепады давления при выполнении операций передвижки и начального распора секции, управления горным давлением в режиме нарастающего сопротивления и при снятии распора с секции. Следовательно, снижается статическое «топтание» пород непосредственной кровли. Безымпульсное регулирование сопротивления гидростоек опусканию пород кровли не только исключает динамические силовые воздействия на породы кровли (динамическое «топтание» кровли), но и обеспечивает возможность передачи части энергии горного давления в гидросистему ОМК и ее дальнейшее полезное использование.

Выводы

Измененная структура и параметры предлагаемой рабочей характеристики гидропривода стоек секций механизированной крепи с разделением функций защиты и управления горным давлением, безымпульсным регулированием сопротивления гидростоек секций крепи, передвижкой секций крепи с сохранением контактов опорных элементов с почвой и кровлей пласта неподвижными обеспечивают:

1) снижение статического и динамического «топтания» пород непосредственной кровли и, как следствие, повышение устойчивости процесса ведения очистных работ;

2) повышение статической адаптивности секции крепи к изменяемому случайным образом горному давлению;

3) передачу части энергии горного давления, реализуемой на секции крепи, в гидросистему очистного комплекса и полезное ее использование.

Предлагаемые критериальные показатели режимов работы секций механизированных крепей обеспечивают более объективную их оценку и выбор наиболее перспективных способов и устройств управления горным давлением.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Антипов И.В.* Геомеханические и технологические основы создания нового уровня крепей очистных забоев тонких пологих пластов: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.02. Донецк: Донецкий научно-исследовательский угольный институт, 1996. 39 с.

2. Безимпульсное управление режимом работы гидростоек секций гидрофицированной крепи очистного механизированного комплекса / В.В.Буевич, В.В.Габов, Д.А.Задков, О.В.Кабанов // Горное оборудование и электромеханика. 2015. № 3. С. 26-30.

3. *Быков С.В.* Определение сопротивления механизированных крепей поддерживающего типа / С.В.Быков, Б.К.Мышляев // Вопросы горного давления. Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1985. Вып. 43. С. 108-117.

4. Взаимодействие механизированных крепей с боковыми породами / И.А.Кияшко, С.А.Саратикянц, Н.П.Овчинников и др. М.: Недра, 1990. 128 с.

5. Завод горных машин «Глиник» – комплексный поставщик оборудования для очистных забоев / А.Зяра, Р.Слюсаж, А.Крет, К.Дзик // Глюкауф. 2008. № 1(2). С. 74-80.

6. *Клишин В.И.* Адаптация механизированных крепей к условиям динамического нагружения. Новосибирск: Наука, 2002. 200 с.

7. *Клишин В.И.* Повышение адаптации однорядной механизированной крепи к условиям нагружения / В.И.Клишин, Ю.В.Матвиец // ФТПРПИ. 1993. № 2. С. 23-29.

8. Концепция развития очистного, проходческого, конвейерного и бурового оборудования на период до 2020 г. / Ю.Н.Линник, И.С.Крашкин, В.Г.Мерзляков и др. // Горные машины и автоматика, 2006. № 2. С. 2-12.

9. *Коровкин Ю.А.* Механизированные крепи очистных забоев / Ю.А.Коровкин, Ю.Л.Худин. М.: Недра, 1990. 413 с.

10. Патент 2510460 РФ, МПК E21D23/16. Гидрофицированная крепь с регулируемым сопротивлением и рекуперацией энергии / В.В.Буевич, В.В.Габов, О.В.Кабанов: заявитель и патентообладатель ФГБОУ высшего профессионального образования «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». № 2012131355/03. Заявл. 20.07.2012. Опубл. 10.01.2014. Бюл. № 1.

11. Патент на полезную модель 169381 РФ, МПК E21D 23/04, E21D 23/06. Секция механизированной крепи с направляющей и опорной балками / В.В.Габов, Д.А.Задков, В.В.Буевич, Н.В.Бабырь, А.В.Стебнев: патентообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». № 2016142172. Заявл. 26.10.2016. Опубл. 16.03.2017. Бюл. № 8.

12. *Подколзин А.А.* Совершенствование гидросистемы секции механизированной крепи // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. Вып. 2. С. 49-54.

13. *Ремезов А.В.* Исследование влияния опорного давления от очистного забоя и зон ПГД на горные выработки / А.В.Ремезов, В.В.Климов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2011. Вып. 4. С. 40-43.

14. Система автоматического управления крепью (САУК) как средство адаптации крепи к различным горно-геологическим условиям шахт Кузбасса / В.И.Клишин, У.Кисслинг, М.Ройтер, А.О.Вессел // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2014. № 1. С. 34-39.

15. *Черемenский Б.Г.* Энергетический критерий выбора рационального сопротивления крепи // Физические процессы горного производства: Всесоюз. межвуз. сб. / Ленингр. горн. ин-т им. Г.В.Плеханова. Л., 1979. Вып. 7. С. 81-84.

16. *Novak Petr.* Roof support control in longwall technology / Petr Novak, Jan Babjak // 14th Coal Operators' Conference, University of Wollongong, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy & Mine Managers Association of Australia, 2014. P. 34-41.

17. *Peng S.S.* Longwall Mining, 2nd edition, 2006. Published by: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. Inc. (SME). 621 p.

18. *Ramesh Kumar B.* Selection of Powered Roof Supports – 2-Leg Shields vis-à-vis 4-Leg Chock Shields / B.Ramesh Kumar, U.Siva Sankar, V.N.S.Prasad // International Conference on Underground Space Technology, 17-19 January 2011, Bangalore, India. P. 1-20.

19. *Vatavu Sorin.* Constructive and Calculus particularities for the hydraulic props of powered roof support / Sorin Vatavu, Niculina Vatavu // Annual of the University of Mining and Geology «St. Ivan Rilski». Sofia, Bulgaria. Vol. 49. Part III. Mechanization, electrification and automation in mines. 2006. P. 7-10.

20. What can the changes in shield resistance tell us during the period of shearer's cutting and neighboring shields' advance / Cheng Jingyi, Wan Zhijun, Syd S. Peng, Liu Sifei, Ji Yinlin // International Journal of Mining Science and Technology. 2015. Date Views 15.08.2015 dx. P. 1-7. doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.03.006.

***Авторы*: А.В.Стебнев,** *главный механик*, *stebnevav@suek.ru* (*ОАО «СУЭК – КУЗБАСС»*, *Ленинск-Кузнецкий*, *Россия*), **В.В.Буевич,** *ведущий инженер*, *buevich.v@bk.ru* (*АО «ВНИИ Галургии»*, *Санкт-Петербург*, *Россия*).

Статья принята к публикации 30.05.2017.