

УДК 622.232.83.054.52

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ МЕЖДУ ДЕТАЛЯМИ УЗЛОВ КРЕПЛЕНИЯ  
ДИСКОВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ПРОХОДЧЕСКИХ ЗАБОЕВ**

**Л. Е. Маметьев, А. А. Хорешок, А. М. Цехин, А. Ю. Борисов**

*Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева,  
E-mail: bau.asp@rambler.ru, ул. Весенняя, 28, 650000, г. Кемерово, Россия*

Обоснованы варианты технических решений по совершенствованию конструкций рабочих органов проходческих комбайнов избирательного действия и очистных комбайнов со шнековыми исполнительными органами. Предложено использование биконических, конических дисковых инструментов и узлов их крепления к многогранным призмам как на коронках проходческих комбайнов, так и на лопастных шнеках очистных комбайнов для разрушения структурно-неоднородных забойных массивов. Рекомендованы реверсивные режимы работы универсальных радиальных коронок с дисковым инструментом, закрепленным на трехгранных призмах, для расширения фронта погрузки в прибортовых пространствах горных выработок. Приведены результаты моделирования напряженного состояния дисковых инструментов, различных вариантов узлов его крепления на многогранных призмах, раскрывающих механизм нагружения сопряженных деталей при разрушении забойных массивов.

*Забойный массив, проходческий комбайн, исполнительный орган, коронка, призма, узел крепления, дисковый инструмент, моделирование, напряженное состояние*

Основными средствами механизации проведения горных выработок служат проходческие комбайны. Совершенствование исполнительных органов проходческих комбайнов избирательного действия путем рационального сочетания и расположения на их коронках резцового и дискового инструмента для реализации принципа разрушения угля и крепких горных пород является актуальной задачей. Поэтому в мировой угольной промышленности ведутся работы по изысканию способов и средств, повышающих эффективность разрушения горного массива с высокими прочностными свойствами при снижении удельного расхода инструмента.

В настоящее время для шахт ОАО «СУЭК-Кузбасс» разработаны комплекты проходческого оборудования для проведения подготовительных выработок [1], получившие название модули, со следующими основными показателями: сечение выработок от 9 до 24 м<sup>2</sup>; глубина расположения выработок — не более 600 м; форма сечения выработок прямоугольная, трапециевидная; мощность пластов от 1.4 до 6.0 м; угол падения пластов до 20°. Модули ориентированы на длину выемочных столбов от 1 000 до 4 500 м; длину лав от 150 до 350 м; размеры целиков у монтажно-демонтажных камер от 15 до 80 м; расстояния между сбойками от 60 до 200 м; размеры охранных целиков от 10 до 30 м. При этом предусмотрены различные направления под-

---

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России по проекту 632 «Исследование параметров технологий и техники для выбора и разработки инновационных технических решений по повышению эффективности эксплуатации выемочно-проходческих горных машин в Кузбассе».

вигания забоя: по простиранию; под углом к линии простирания; по падению; под углом к линии падения; по восстанию; под углом к линии восстания. Типовые модули рекомендуются как основа для разработки паспортов проведения одной, двух или трех параллельных выработок, а также их крепления с учетом конкретных горно-геологических и горнотехнических условий. Использование модулей обеспечивает увеличение скорости подготовки выемочных столбов и своевременное воспроизводство фронта очистных работ.

На кафедре горных машин и комплексов КузГТУ накоплен многолетний опыт в исследованиях, связанных с разработкой, испытаниями и совершенствованием конструкций рабочих органов с различными типами породоразрушающих инструментов для проходческих комбайнов избирательного действия [2–9]. Результаты исследований показывают, что из всех известных типов горных инструментов дисковый отличается максимальной износостойкостью при разрушении забойных массивов в широком диапазоне физико-механических свойств. Несмотря на высокую стоимость и конструктивную сложность, дисковый инструмент имеет преимущества по сравнению с режущим инструментом в продолжительности срока службы и меньших затратах на его замену. Работа дискового инструмента в режиме качения по забойному массиву обеспечивает снижение крутящего момента на исполнительном органе, улучшает пусковые характеристики его привода. Это позволяет ожидать положительный экономический эффект на этапах производства и эксплуатации с адаптацией дискового инструмента к разрушению забойных массивов со сложной структурной неоднородностью.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Процесс добычи угля подземным способом связан с эксплуатацией обширного парка проходческих, очистных и буровых машин, исполнительные органы которых оснащены различными типами породоразрушающего инструмента. Обоснованию области применения, проектированию, изготовлению, испытаниям и эксплуатации конкретных типов породоразрушающего инструмента предшествуют поисковые научно-исследовательские разработки, основные результаты которых известны из публикаций ученых ИГД СО РАН, КузГТУ, ИУ СО РАН и производственников ОАО “СУЭК-Кузбасс” [1–20].

Совместные исследования ученых кафедры горных машин и комплексов КузГТУ и производственников ОАО “СУЭК-Кузбасс” направлены на совершенствование технологических схем проходки горных выработок и разработку новых технических решений по узлам крепления дискового инструмента на радиальных коронках проходческих комбайнов избирательного действия. В качестве базовых вариантов узлов крепления дисковых инструментов к радиальным коронкам проходческого комбайна выбраны двухопорные с внутренней схемой размещения дисков между кронштейнами и консольные с внешней схемой размещения дисков перед трехгранными и четырехгранными призмами.

В результате проведенных исследований разработаны конечно-элементные модели и проведена оценка напряженно-деформированного состояния различных вариантов узлов крепления дискового инструмента при разрушении структурно неоднородного забойного массива горных пород с пределами прочности на одноосное сжатие  $\sigma_{сж}$  от 12.4 до 140 МПа. В конструкциях приняты марки сталей 35ХГСА, Ст. 45.

При моделировании напряженно-деформированного состояния сопрягаемых элементов узлов крепления дисковых инструментов к двухопорным кронштейнам и многогранным призмам на исполнительных органах проходческих комбайнов избирательного действия использовалась система SolidWorks Simulation, в которой решаются общие задачи по методу конечных элементов (МКЭ) в линейной постановке. При дискретизации геометрической модели использовалась

сетка с параболическими конечными элементами (КЭ) в форме тетраэдров. Параболические КЭ обеспечивают лучшее описание геометрии модели сеткой и повышенную точность расчетов за счет большего числа узлов по сравнению с линейными КЭ. Размер конечных элементов выбирался таким образом, чтобы дальнейшее повышение плотности сетки не оказывало существенного влияния на результаты расчетов. Параметры сетки: размер КЭ — 10 мм; допуск — 0.5 мм; автоматическое уплотнение сетки не использовалось. Для расчета выбран алгоритм FFEPlus, так как он является наиболее производительным при решении задач большой размерности [6].

В ходе реализации изложенной методики получены картины напряженно-деформированного состояния сопряженных конструктивных элементов узлов крепления дискового инструмента для различных вариантов конструктивного исполнения исполнительных органов проходческих комбайнов избирательного действия. При этом варианты узлов крепления дискового инструмента на двухопорных кронштейнах и консольного крепления к трехгранным призмам рекомендованы для радиальных коронок, а варианты консольного крепления спаренного дискового инструмента к четырехгранным призмам — для размещения на цилиндрической поверхности корпуса раздаточного редуктора между двумя аксиальными коронками. Разработка моделей напряженного состояния дискового инструмента при разрушении забоев очистными и проходческими комбайнами охватывает три этапа [2–9].

На первом разработаны, изготовлены и испытаны в шахтных условиях экспериментальные коронки с двухопорными узлами крепления дискового инструмента (рис. 1а), что позволило определить эффективные границы области применения дисков по прочности разрушаемого забойного массива. Для двухопорных узлов крепления дискового инструмента построены конечно-элементные модели (рис. 1б) для определения напряженного состояния конструктивных элементов [2, 3]. Так как при испытаниях в шахтных условиях выявлен эффект заштыбовки внутреннего пространства дискового инструмента между двумя опорными кронштейнами, то для устранения этого недостатка на втором этапе исследований осуществлено моделирование консольных узлов крепления дискового инструмента к трехгранным призмам. Базу для реализации второго этапа моделирования составили новые разработки в виде патентов РФ (2455486, 128898, 134586, 138704, 141339), обеспечивающих совмещение процессов разрушения забоя, дробления негабаритов и погрузки продуктов разрушения в прибортовых зонах [4].

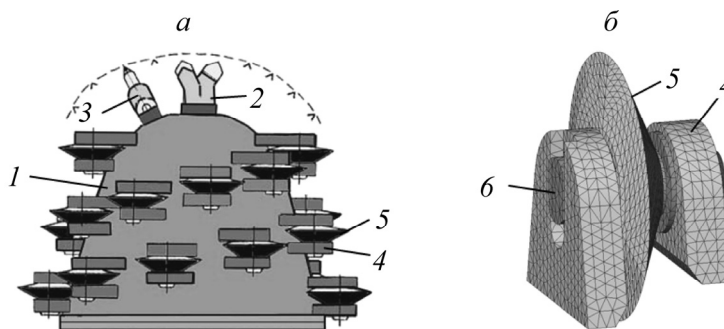


Рис. 1. Экспериментальная коронка с узлами крепления дискового инструмента: а — конструкция; б — конечно-элементная модель двухопорного узла крепления; 1 — коронка; 2 — забурник; 3 — резец; 4 — кронштейн; 5 — диск; 6 — ось

Для реализации второго и третьего этапов моделирования разработан комплекс оригинальных технических решений в виде патентов РФ (2455486, 128898, 134586, 136086, 138704, 141339, 146845, 149617, 152701), направленных на повышение эффективности: монтажно-демонтажных

операций, процессов зарубки исполнительного органа, пылеподавления в процессе разрушения, дробления и погрузки горной массы, защиты внутреннего пространства многогранных призм от продуктов разрушения.

На втором этапе основная цель исследований состояла в оценке адаптации к парку проходческих комбайнов стрелового исполнительного органа с двумя радиальными коронками (рис. 2*а*), оснащенными дисковыми инструментами на трехгранных призмах и кинематически связанными для обеспечения разнонаправленных и реверсивных режимов вращения. Разработаны конечно-элементные модели для трех вариантов конструкций консольного закрепления дискового инструмента к трехгранным призмам, а именно: для первого — планкой, второго — винтом, третьего — гайкой (рис. 2*б*). Для всех вариантов узлов крепления дискового инструмента определены напряженные состояния сопряженных конструктивных элементов в характерных сечениях при разрушении забойных массивов [5].

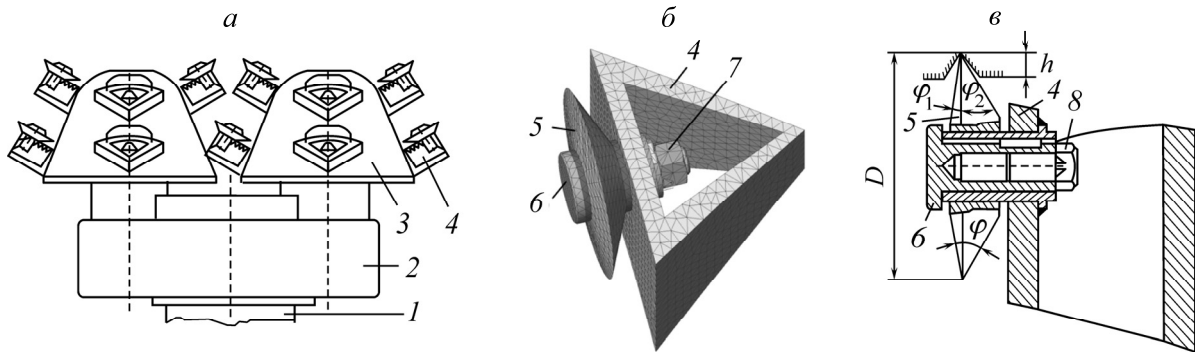


Рис. 2. Исполнительный орган с двумя радиальными разрушающе-погрузочными коронками и дисковыми инструментами на трехгранных призмах: *а* — конструктивная схема; *б* — конечно-элементная модель консольного узла крепления дискового инструмента гайкой; *в* — конструкция узла крепления винтом: 1 — стрела; 2 — раздаточный редуктор; 3 — коронка; 4 — трехгранная призма; 5 — диск; 6 — ось; 7 — гайка; 8 — винт

На третьем этапе осуществлено моделирование процессов разрушения целиков между двумя аксиальными резовыми коронками, прикрепленными к корпусу раздаточного редуктора стрелового исполнительного органа (рис. 3*а*). На поверхности корпуса раздаточного редуктора размещены четырехгранные призмы с отдельными дисковыми инструментами, конечно-элементные модели которых представлены на рис. 3*б* (патент РФ 136086). Моделирование напряженного состояния выполнено в характерных сечениях сопряженных конструктивных элементов узлов крепления двух дисковых инструментов по плоскостям, проходящим через режущую кромку дисков [9].

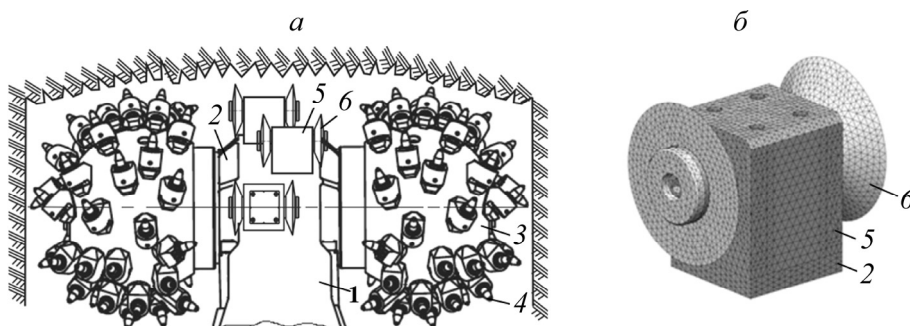


Рис. 3. Конструкция стреловидного исполнительного органа с аксиальными резовыми коронками: *а* — конструктивная схема; *б* — конечно-элементная модель четырехгранной призмы с двумя дисками; 1 — стрела; 2 — раздаточный редуктор; 3 — коронка; 4 — резец; 5 — четырехгранная призма; 6 — дисковый инструмент

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 представлены обобщенные зависимости распределения эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$  по критерию Мизеса в сопрягаемых деталях консольных узлов крепления дискового инструмента. Рассмотрены значения  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$  в плоскости сечения, проходящего через режущую кромку конических и биконических дисков. Данные зависимости учитывают варианты крепления дискового инструмента во внутреннем пространстве трехгранных призм (рис. 2): 1 — планкой, 2 — винтом, 3 — гайкой.

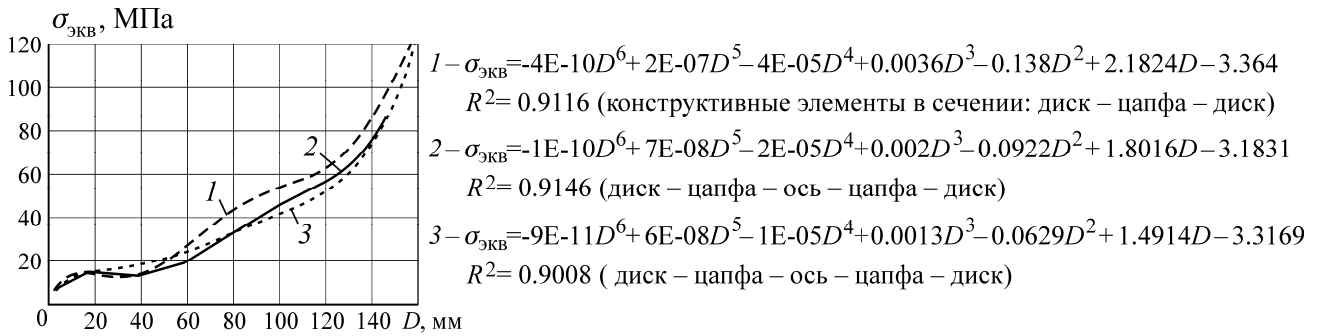


Рис. 4. Зависимости распределения эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$  в диаметральном сечении по клиновой реборде диска ( $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = 25^\circ + 5^\circ = 30^\circ$ ) для сопрягаемых конструктивных элементов (1–3) узлов крепления к трехгранным призмам при  $\sigma_{\text{сж}} = 70$  МПа

На рис. 5 приведены обобщенные зависимости распределения эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$  по критерию Мизеса в сопрягаемых деталях консольных узлов крепления двух дисковых инструментов к боковым граням четырехгранных призм от диаметральных размеров в плоскости сечения, проходящей через режущую кромку биконических дисков ( $\varphi = 25^\circ + 5^\circ = 30^\circ$ ), которые размещены в пространстве между двумя аксиальными коронками при разрушении горного массива.

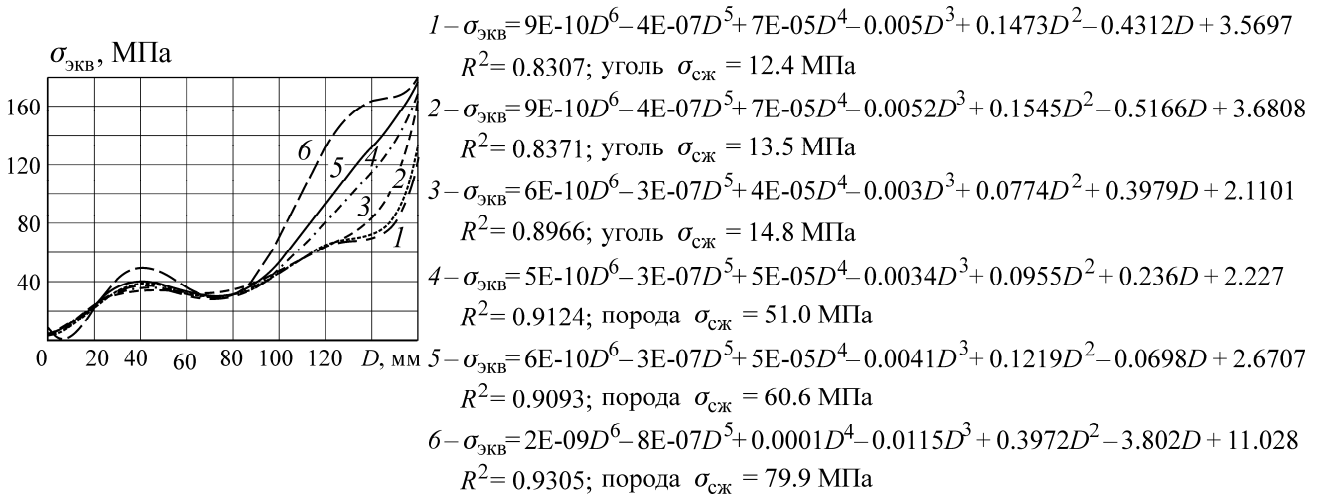


Рис. 5. Зависимости распределения эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$  в диаметральном сечении по клиновой реборде диска для сопрягаемых конструктивных элементов узлов крепления к четырехгранной призме при разрушении горного массива

На рис. 6 представлены обобщенные зависимости распределения эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$  по критерию Мизеса на кромках дисковых инструментов (биконических: 1 —  $\varphi = 25^\circ + 5^\circ$ , 2 —  $\varphi = 20^\circ + 10^\circ$ , 3 —  $\varphi = 15^\circ + 15^\circ$ , конического: 4 —  $\varphi = 30^\circ$ ) консольных узлов крепления четырехгранной призмы от показателей разрушаемого горного массива.

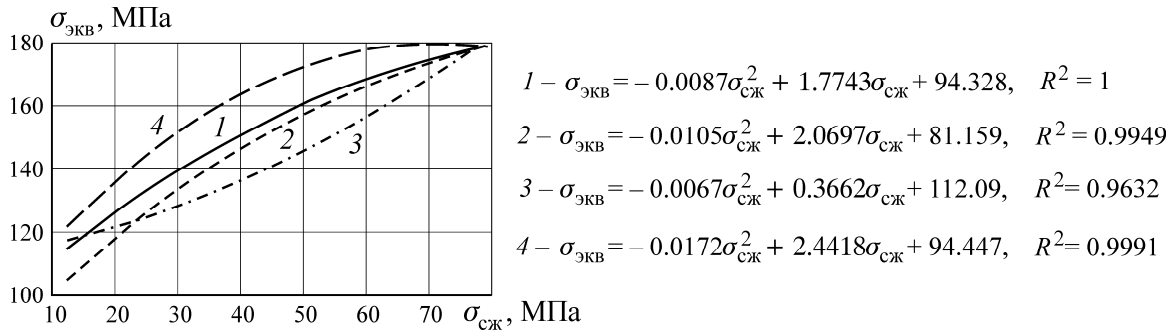


Рис. 6. Зависимости распределения эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}$  на кромках дисковых инструментов (1–4) консольных узлов крепления четырехгранной призмы от показателей разрушаемого горного массива  $\sigma_{\text{сж}}$

Представленные зависимости свидетельствуют о том, что перспективными являются результаты совместных исследований КузГТУ и ЮТИ (филиал) НИ ТПУ, направленные на моделирование напряженно-деформированного состояния спаренного дискового инструмента с узлами крепления к четырехгранным призмам (по патенту РФ 146845) при разрушении структурно-неоднородных углеродных забойных массивов ( $\sigma_{\text{сж}} = 12.4\text{--}80$  МПа) стреловыми исполнительными органами проходческих комбайнов избирательного действия. Реализация предложенных узлов крепления дисковых инструментов на четырехгранных призмах для обеспечения спаренного режима вращения позволит расширить область применения и повысить эффективность эксплуатации проходческих комбайнов избирательного действия как в угольных, так и в породных забойных массивах.

## ВЫВОДЫ

Проведена сравнительная оценка напряженного состояния сопрягаемых конструктивных элементов модульных блоков в виде многогранных призм с дисковым инструментом в сечениях, проходящих через режущую кромку дисков на исполнительных органах проходческих комбайнов избирательного действия при разрушении угольных и породных забойных массивов с пределами прочности на одноосное сжатие  $\sigma_{\text{сж}}$  от 12.4 до 140 МПа.

Установлено, что зависимости эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}$  по критерию Мизеса от диаметров  $D$  дисковых инструментов для трех вариантов сопрягаемых конструктивных элементов узлов крепления к трехгранным призмам имеют сходный характер изменения в виде полиномов шестой степени. При этом для конструкции первого варианта узла крепления планкой наблюдается увеличение зон напряженного состояния по сравнению с вариантами крепления винтом и гайкой. Отмечено снижение размеров зон максимальных эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}$  в диаметральной сечении по клиновому реборде диска в третьем варианте узла крепления дискового инструмента гайкой по сравнению со вторым вариантом крепления винтом, что характеризуется более высокой жесткостью конструкции.

Показано, что зависимости эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}$  по критерию Мизеса от диаметров  $D$  дисковых инструментов для сопрягаемых конструктивных элементов узлов крепления к четырехгранной призме также описываются полиномами шестой степени. При этом процесс разрушения угольных забойных массивов характеризуется крутонарастающей зоной концентрации максимальных напряжений, которая ограничена суженным контуром в сечениях, проходящих через режущие кромки сменного комплекта дисков, направлена в сторону контакта с поверхностью разрушения забоя при глубине их внедрения  $h = 0.04$  м. Отмечено, что при

разрушении породных забойных массивов пологонарастающая зона концентрации максимальных напряжений, которая ограничена расширенным контуром в сечениях, проходящих через режущие кромки сменного комплекта дисков, направлена в сторону контакта с поверхностью разрушения забоя при глубине их внедрения  $h = 0.006$  м.

Выявлено, что зависимости эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{эКВ}}$  по критерию Мизеса на кромках дисковых инструментов консольных узлов крепления четырехгранной призмы от показателей разрушаемого горного массива  $\sigma_{\text{СЖ}}$  описываются полиномами второй степени.

Определено, что минимальный уровень эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{эКВ}}$  при разрушении как угольных ( $\sigma_{\text{СЖ}} = 12.4, 13.5, 14.8$  МПа), так и породных ( $\sigma_{\text{СЖ}} = 51, 60.6, 78.9$  МПа) забойных массивов обеспечен установкой на узлах крепления биконического дискового инструмента ( $\varphi = 25^\circ + 5^\circ = 30^\circ, 20^\circ + 10^\circ$  и  $15^\circ + 15^\circ$ ), а максимальный уровень эквивалентных напряжений отмечен при использовании конического дискового инструмента ( $\varphi = 30^\circ$ ).

Подтверждено, что с переходом от асимметрии к симметрии биконических дисковых инструментов для трехгранных и четырехгранных призм прослеживается снижение параметров зон эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{эКВ}}$  в узлах крепления при общем увеличении максимальных напряжений с ростом прочности разрушаемого массива. При этом дисковые инструменты конического ( $\varphi = 30^\circ$ ) и биконического ( $\varphi = 25^\circ + 5^\circ = 30^\circ$ ) исполнений реализуют процесс разрушения с большими размерами зон максимальных эквивалентных напряжений, чем варианты биконического исполнения ( $\varphi = 20^\circ + 10^\circ$  и  $15^\circ + 15^\circ$ ), а использование для деталей узлов крепления марок сталей 35ХГСА и Ст. 45 обеспечивают гарантированный запас прочности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демура В. Н., Артемьев В. Б., Ясюченя С. В., Копылов К. Н., Ютяев Е. П., Мешков А. А., Лупий М. Г., Феофанов Г. Л. Технологические схемы подготовки и обработки выемочных участков на шахтах ОАО «СУЭК-Кузбасс»: Альбом. — М.: Горное дело ООО «Киммерийский центр», 2014 (Библиотека горного инженера. Т. 3: Подземные горные работы. Кн. 12).
2. Хорешок А. А., Маметьев Л. Е., Борисов А. Ю., Мухортиков С. Г. Совершенствование конструкции продольно-осевых коронок проходческого комбайна избирательного действия // Горное оборудование и электромеханика. — 2010. — № 5.
3. Хорешок А. А., Маметьев Л. Е., Кузнецов В. В., Борисов А. Ю., Воробьев А. В. Распределение напряжений в узлах крепления дискового инструмента на коронках проходческих комбайнов // Вестн. КузГТУ. — 2012. — № 6.
4. Нестеров В. И., Маметьев Л. Е., Хорешок А. А., Борисов А. Ю. Исполнительный орган проходческого комбайна для совмещения процессов разрушения забоя с дроблением негабаритов и погрузкой горной массы // Вестн. КузГТУ. — 2012. — № 3.
5. Хорешок А. А., Маметьев Л. Е., Борисов А. Ю., Мухортиков С. Г., Воробьев А. В. Разработка реверсивных коронок для проходческих комбайнов с дисковым инструментом на сменных трехгранных призмах // Горное оборудование и электромеханика. — 2013. — № 9.
6. Маметьев Л. Е., Хорешок А. А., Борисов А. Ю., Воробьев А. В. Совершенствование конструкций узлов крепления дискового инструмента на коронках проходческих комбайнов // Вестн. КузГТУ. — 2014. — № 1.

7. Маметьев Л. Е., Хорешок А. А., Цехин А. М., Борисов А. Ю. Разработка устройства пылеподавления для реверсивных коронок проходческих комбайнов // Вестн. КузГТУ. — 2014. — № 3.
8. Маметьев Л. Е., Борисов А. Ю. Улучшение процессов монтажа и демонтажа узлов крепления дискового инструмента на коронках проходческих комбайнов // Вестн. КузГТУ. — 2014. — № 4.
9. Маметьев Л. Е., Хорешок А. А., Борисов А. Ю. Направление повышения зарубежной способности исполнительных органов проходческих комбайнов с аксиальными коронками // Вестн. КузГТУ. — 2014. — № 5.
10. Крестовоздвиженский П. Д., Клишин В. И., Никитенко С. М., Герике П. Б. Выбор формы армирующих вставок для тангенциальных поворотных резов горных машин // ФТПРПИ. — 2014. — № 6.
11. Герике Б. Л., Герике П. Б., Клишин В. И., Филатов А. П. Моделирование разрушающего действия дискового инструмента проходческо-очистных комбайнов на породный массив // ФТПРПИ. — 2008. — № 5.
12. Герике Б. Л., Филатов А. П., Герике П. Б., Клишин В. И. Концепция породоразрушающего исполнительного органа машины для подземной разработки кимберлитовых руд // ФТПРПИ. — 2006. — № 6.
13. Герике П. Б., Беликов М. А. Моделирование взаимодействия дискового режущего инструмента с массивом горных пород // ФТПРПИ. — 2003. — № 2.
14. Опарин В. Н., Усольцева О. М., Семенов В. Н., Цой П. А. О некоторых особенностях эволюции напряженно-деформированного состояния образцов горных пород со структурой при их одноосном нагружении // ФТПРПИ. — 2013. — № 5.
15. Опарин В. Н., Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н. Обоснование принципов построения конструктивной схемы подземной ракеты // ФТПРПИ. — 2010. — № 5.
16. Buyalich G. D., Buyalich K. G., and Voyevodin V. V. Radial deformations of working cylinder of hydraulic legs depending on their extension, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 201, Vol. 91, No. 1.
17. Buyalich G. D., Anuchin A. V., and Dronov A. A. The numerical analysis of accuracy of hydraulic leg cylinder in modeling using Solid Works Simulation, Applied Mechanics and Materials, 2015, Vol. 770.
18. Buyalich G. D., Buyalich K. G. Comparative analysis of the lip seal in hydraulic power cylinder, Applied Mechanics and Materials, 2015, Vol. 770.
19. Buyalich G. D., Buyalich K. G. Modeling of Hydraulic Power Cylinder Seal Assembly Operation, Mining 2014: Taishan Academic Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control : Chinese Coal in the Century: Mining, Green and Safety, China, Qingdao, 17–20 October 2014, Amsterdam – Paris – Beijing: Atlantis Press, 2014.
20. Буюлич Г. Д., Александров Б. А., Антонов Ю. А., Воеводин В. В. Повышение сопротивления консолей механизированной крепи // ФТПРПИ. — 2000. — № 5.

*Поступила в редакцию 19/V 2015*