

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ MINING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.271

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-5-12



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТКИ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ ПЛАСТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕРНИЗИРОВАННЫХ КАРЬЕРНЫХ КОМБАЙНОВ

Чебан А.Ю.

Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия

Аннотация. Актуальность исследования. Пластовые месторождения полезных ископаемых, в частности угля, горючих сланцев, фосфоритов, преимущественно имеют сложную структуру с наличием в продуктивных пластах прослоев пустых пород или некондиционных включений. Разработка сложноструктурных месторождений без обеспечения необходимого уровня селекции при выемке приводит к существенным потерям полезного ископаемого и его разубоживанию. Повысить качество селективной выемки при разработке сложноструктурных пластовых месторождений позволяют технологии с применением карьерных комбайнов, однако наличие в ряде случаев в пласте прослоев прочных горных пород ограничивает возможность использования карьерных комбайнов и делает их работу малопродуктивной. **Цель работы.** Совершенствование технологии послыной отработки сложноструктурных пластов за счет применения модернизированного карьерного комбайна, обеспечивающего повышение эффективности рыхления прочных породных прослоев посредством их предварительной дезинтеграции с применением раствора поверхностно-активных веществ. **Результаты.** В статье предлагается технико-технологическое решение по разработке сложноструктурных пластов, сложенных породами, значительно различающимися по прочности, с применением карьерного комбайна, снабженного оборудованием для дезинтеграции прочных породных прослоев небольшой мощности путем формирования щелей с одновременной подачей в них раствора поверхностно-активных веществ. Модернизированный карьерный комбайн для обеспечения рациональных режимов рыхления полезного ископаемого и прочных породных прослоев снабжен фрезерным рабочим органом с изменяемой схемой расстановки резцов. **Практическая значимость.** Предлагаемое технико-технологическое решение может быть использовано при разработке сложноструктурных угольных пластов и позволит существенно повысить производительность карьерного комбайна при выемке прочных породных прослоев за счет их предварительной дезинтеграции, что обеспечит снижение себестоимости работ и позволит повысить рентабельность горного производства.

Ключевые слова: сложноструктурный пласт, прочный породный прослой, карьерный комбайн, производительность рыхления, фрезерный рабочий орган, формирование щелей, дезинтеграция

© Чебан А.Ю., 2023

Для цитирования

Чебан А.Ю. Повышение эффективности разработки сложноструктурных пластовых месторождений за счет применения модернизированных карьерных комбайнов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 5-12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-5-12>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

INCREASING THE EFFICIENCY OF MINING OF COMPLEX-STRUCTURED BEDDED DEPOSITS BY USING MODERNIZED SURFACE MINERS

Cheban A.Yu.

Mining Institute of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

Abstract. Relevance. Bedded deposits of minerals, in particular coal, oil shale, phosphorites, predominantly have a complex structure with interlayers of waste rocks or substandard inclusions in producing beds. Complex-structured deposit mining without providing the required level of selection during extraction leads to significant losses of minerals and their dilution. To improve the quality of selective extraction in complex-structured bedded deposit mining, mining companies involve technologies using surface miners; however, in some cases, layers of strong rocks in the bed limits the possibility of using surface miners and makes their operation low-yielding. **Objective.** Improving the technology of layer-by-layer mining of complex-structured beds by using a modernized surface miner, ensuring an increase in the efficiency of loosening strong rock layers by their preliminary disintegration using a solution of surfactants. **Results.** The paper proposes a technical and technological solution to mining of complex-structured beds composed of rocks that significantly differ in strength, using a surface miner with equipment for the disintegration of strong rock interlayers of small thickness by forming cracks and delivering into them a solution of surfactants. The upgraded surface miner is equipped with a milling working body with a variable arrangement of cutters to ensure reasonable modes of loosening minerals and strong rock interlayers. **Practical Relevance.** The proposed technical and technological solution may be used in mining of complex-structured coal beds. This will significantly increase performance of surface miners when extracting strong rock interlayers due to their preliminary disintegration, resulting in lower cost of operation and higher profitability of mining.

Keywords: complex-structured bed, strong rock interlayer, surface miner, loosening performance, milling working body, formation of cracks, disintegration

For citation

Cheban A.Yu. Increasing the Efficiency of Mining of Complex-Structured Bedded Deposits by Using Modernized Surface Miners. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 5-12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-5-12>

Введение

Важным направлением развития горной науки и производства является создание технологий, основанных на обеспечении принципов малоотходности и ресурсосбережения, позволяющих увеличить извлечение полезного ископаемого из недр и повысить эффективность его последующей переработки [1-7]. При разработке пластовых месторождений, характеризующихся сложной структурой, когда пласты полезного ископаемого перемежаются пустыми породами, а их мощность варьирует в широких пределах, очень важно обеспечить необходимую глубину селекции для сохранения природного качества полезного ископаемого. Применение традиционных технологий, включающих взрывное рыхление массива с последующей выемкой подготовленной горной массы крупными одноковшовыми экскаваторами и погрузчиками ведет к существенным потерям полезного ископаемого и его разубоживанию [8-10]. Так, с учетом технических параметров карьерно-

го оборудования, задействованного на угольных разрезах Дальнего Востока, минимальная мощность селективно извлекаемого угольного пласта составляет 1-2 м, а максимальная мощность внутрипластовых породных прослоев, включаемая в подсчет запасов, достигает 0,7-1 м, таким образом, маломощные пласты угля вместе с пустыми породами отправляются в отвал, а прослой пустых пород извлекаются совместно с углем, существенно снижая его качество [8]. Повысить глубину селективной выемки позволяют технологические схемы, предусматривающие безвзрывное рыхление сложноструктурных массивов с применением бульдозерно-рыхлительных агрегатов, карьерных комбайнов, фрезерных машин и другого оборудования.

Состояние вопроса и постановка проблемы

Карьерные комбайны активно применяются для разработки месторождений угля, известняков, апатитов, фосфоритов и других полезных ископаемых [11, 12]. По сравнению с традиционными технологиями, включаю-

щими буровзрывное рыхление массива и выемку взорванной массы одноковшовыми экскаваторами или погрузчиками, технология механической выемки с применением карьерных комбайнов обеспечивает упрощение технологического процесса, уменьшение номенклатуры карьерного оборудования (поскольку рыхление, выемка, погрузка и крупное дробление производится одной машиной), обеспечение селективной выемки тонких пластов полезного ископаемого мощностью до 0,2 м и менее, высокую производительность при работе с плотными и легко разрабатываемыми полускальными породами [13, 14]. Недостатком карьерных комбайнов является значительное снижение производительности при увеличении прочности горных пород [14, 15], что ведет к росту себестоимости выемки и делает технологию с применением буровзрывного рыхления экономически более предпочтительной. Кроме того, при разработке прочных пород на рабочий орган, трансмиссию и металлоконструкцию комбайна действуют повышенные динамические нагрузки, которые могут привести к поломке оборудования.

В горном производстве используются карьерные комбайны различных производителей Krupp, MAN Takraf, Voest-Alpin, Rahco, имеются отдельные образцы карьерных комбайнов отечественного производства, но наибольшее распространение получили комбайны фирмы Wirtgen [16-19]. В результате анализа научнотехнической литературы автором получены зависимости технической производительности карьерных комбайнов фирмы Wirtgen различных типоразмеров от прочности разрабатываемых горных пород (рис. 1).

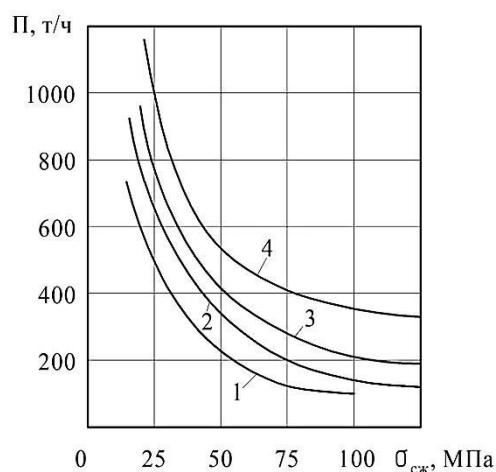


Рис. 1. Зависимости технической производительности комбайнов от прочности горных пород на сжатие: 1 – комбайн Wirtgen 2100SM; 2 – комбайн Wirtgen 2600SM; 3 – комбайн Wirtgen 2200SM; 4 – комбайн Wirtgen 2500SM

Fig. 1. Dependences between technical performance of surface miners and compressive strength of rocks: 1 is Wirtgen 2100SM; 2 is Wirtgen 2600SM; 3 is Wirtgen 2200SM; 4 is Wirtgen 2500SM

Особенно большой эффект от применения карьерных комбайнов наблюдается при разработке сложноструктурных пластов, при этом обеспечивается повышение коэффициента извлечения полезного ископаемого из недр, а также улучшение его качества за счет снижения разубоживания пустыми породами [17]. В сложноструктурных пластах полезное ископаемое перемежается с породными прослоями, которые преимущественно имеют прочность, существенно большую, чем полезное ископаемое. Так, на карьере Кивиоли (Эстония) пласты горючих сланцев прочностью 2-4 единицы по шкале М.М. Протодяконова чередуются с прослоями известняка прочностью 5-10 единиц [20]. На Восточно-Бейском разрезе (Хакассия) пласты каменного угля прочностью 1,5-2 единицы по шкале М.М. Протодяконова имеют в своем составе прослойки пустых пород с прочностью от 3 до 8 единиц, на Талдинском разрезе (Кемеровская область) прочность породных прослоев на сжатие составляет 50-100 МПа, что многократно превышает прочность каменного угля, на Эльгинском каменноугольном месторождении (Якутия) прочность породных прослоев меньше и обычно не превышает 48-55 МПа, однако также существенно выше прочности угля, в связи с чем производительность выемочной техники при разработке угля и породных прослоев значительно различается [13, 21]. Проведенные в работе [13] расчеты показали, что производительность карьерного комбайна Wirtgen 4200SM, задействованного на разработке сложноструктурного угольного пласта Эльгинского месторождения, при выемке угля будет составлять 2030 т/ч, а при выемке породных прослоев – 763 т/ч. На карьере Кивиоли скорость движения комбайна Wirtgen 2500SM (при равной мощности фрезеруемого слоя) в процессе выемки горючих сланцев была в 2-3 раза выше, чем при выемке прослоев известняка [20].

Повысить производительность рыхления прочных пород возможно путем их предварительной дезинтеграции (разупрочнения) с применением растворов поверхностно-активных веществ (ПАВ) [21-23]. Так, при пропитке массива на Талдинском угольном месторождении раствором ПАВ через сеть скважин 1,3×1,3 м в течение двух суток удалось снизить прочность на сжатие мелкозернистых песчаников с 93 до 60 МПа, а алевролитов и аргиллитов – с 90 до 70 МПа [21]. Лабораторные исследования по дезинтеграции образцов прочных пород Эльгинского угольного месторождения растворами ПАВ показали возможность снижения их прочности на 30-50% [22]. Технология, предлагаемая в работе [21], с бурением сети скважин трудоемка и затратна для разупрочнения прочных породных прослоев малой мощности.

При добыче угля важное значение имеет его фракционный состав, поскольку наличие большого количества мелких фракций (<13 мм) снижает его рыночную стоимость, ведет к увеличению потерь от просыпания и выдувания при погрузке и транспортировке, кроме то-

го, в ряде случаев сжигание угля, содержащего большое количество мелочи, приводит к снижению коэффициента полезного действия топочных устройств, уменьшает эффективность и экологическую безопасность использования топлива [24]. Для снижения выхода мелких классов при добыче угля на карьерные комбайны устанавливаются так называемые «угольные» рабочие органы с удлиненными резцами и увеличенным расстоянием между ними [17, 25]. Такие рабочие органы обеспечивают высокую производительность выемки, однако предназначены для использования исключительно в «легких» условиях работы и не могут использоваться для выемки прочных породных прослоев. В то же время на сложноструктурных угольных месторождениях происходит постоянное чередование слоев угля и пустых пород. Так, на Эльгинском месторождении, содержащем ценные марки коксующихся и энергетических углей, запасы, предназначенные для отработки открытым способом, содержатся в 22-х пластах, большинство из которых имеют сложное строение и включают от 1-2 до 10-12 породных прослоев, преимущественно мощностью до 0,5 м. Например, угольный пласт Н₁₅, условно разделенный на шесть участков, содержит 1802 породных прослоя мощностью 0,05-0,20 м, 283 прослоя мощностью 0,20-0,50 м и 44 прослоя мощностью более 0,5 м, в общем на долю породных прослоев приходится 13,7% объема пласта [13, 17].

Для отработки сложноструктурных угольных пластов без замены исполнительного оборудования комбайна при выемке угля и породных прослоев в работе [17] предлагается конструкция фрезерного рабочего органа карьерного комбайна, оснащенного комбинированным режущим инструментом, включающим удлиненные резцы для рыхления угля и стандартные резцы для рыхления более прочных пород. С помощью привода, размещенного внутри корпуса рабочего органа, резцы могут поворачиваться в положение для отработки угля или прочных пород. Недостатком технологии является невысокая производительность выемки прочных породных прослоев, а также относительно высокие нагрузки на конструкцию фрезерного рабочего органа со стороны прочных пород, что снижает долговечность оборудования и может привести к его поломке.

Целью работы является совершенствование технологии послойной отработки сложноструктурных пластов за счет применения модернизированного карьерного комбайна, обеспечивающего повышение эффективности рыхления прочных породных прослоев посредством их предварительной дезинтеграции с применением раствора поверхностно-активных веществ.

Результаты исследования

Институтом горного дела ДВО РАН предлагается технико-технологическое решение по разработке сложноструктурных пластов, сложенных породами, значительно различающихся по прочности, с приме-

нением модернизированного карьерного комбайна (рис. 2), оснащенного фрезерным рабочим органом 1 с изменяемой схемой расстановки резцов 2, 3, приемным транспортером 4 и разгрузочным конвейером 5 на поворотной консоли 6, а также оборудованием для дезинтеграции прослоев 7 прочных пород. Оборудование для дезинтеграции прослоев 7 включает раму 8, на которой установлены привод 9, вал с нарезными дисками 10, трубопроводы с насадками 11 для подачи раствора ПАВ из цистерны 12 (рис. 2, а). Рама 8 шарнирно прикреплена к металлоконструкции карьерного комбайна и может поворачиваться посредством гидроцилиндров 13.

При разработке сложноструктурного угольного пласта модернизированный карьерный комбайн может одновременно выполнять рыхление и погрузку угля, а также подготовку прочных пород прослоя 7 к выемке. Рыхление угля осуществляется фрезерным рабочим органом 1, на котором посредством привода в рабочее положение повернуты удлиненные резцы 2 с увеличенным шагом расстановки (рис. 2, в), с целью снижения выхода мелких фракций (подробное описание конструкции фрезерного рабочего органа с изменяемой расстановкой резцов приведено в работе [17]). Разрыхленный уголь подается на приемный транспортер 4, далее на разгрузочный конвейер 5 и в автосамосвал (на рис. 2 не показан). После выемки угля из верхней части 14 сложноструктурного пласта обнажается прослой 7, для осуществления его дезинтеграции гидроцилиндрами 13 опускается рама 8, нарезными дисками 10 ведется формирование щелей 15 на ширину обрабатываемой фрезерным рабочим органом полосы 16, в щели 15 через насадки 11 подается раствор ПАВ (рис. 2, а, б). После прохода модернизированного карьерного комбайна до конца полосы 16 осуществляется его разворот с отработкой смежной полосы на рабочей площадке и выполнением ранее описанной последовательности операций.

Пропитка прослоя раствором ПАВ осуществляется в течение двух-трех суток, молекулы ПАВ адсорбируются на поверхности разрушаемой породы, понижая поверхностную энергию и оказывая влияние на ее механические характеристики, это, согласно данным исследований [21, 22], позволит снизить прочность прослоя на 30-40%. Несмотря на существенное снижение прочности пород дезинтегрированного прослоя 17, они по-прежнему будут значительно прочнее угля, в связи с чем для рыхления необходимо использовать стандартные резцы 3. В связи с этим перед выемкой дезинтегрированного прослоя 17 в рабочее положение поворачиваются стандартные резцы 3 фрезерного рабочего органа 1 с обычным шагом расстановки (рис. 2, г). При этом рама 8 с нарезными дисками 10 находится в поднятом состоянии и оборудование для дезинтеграции прослоев прочных пород в работе не задействовано.

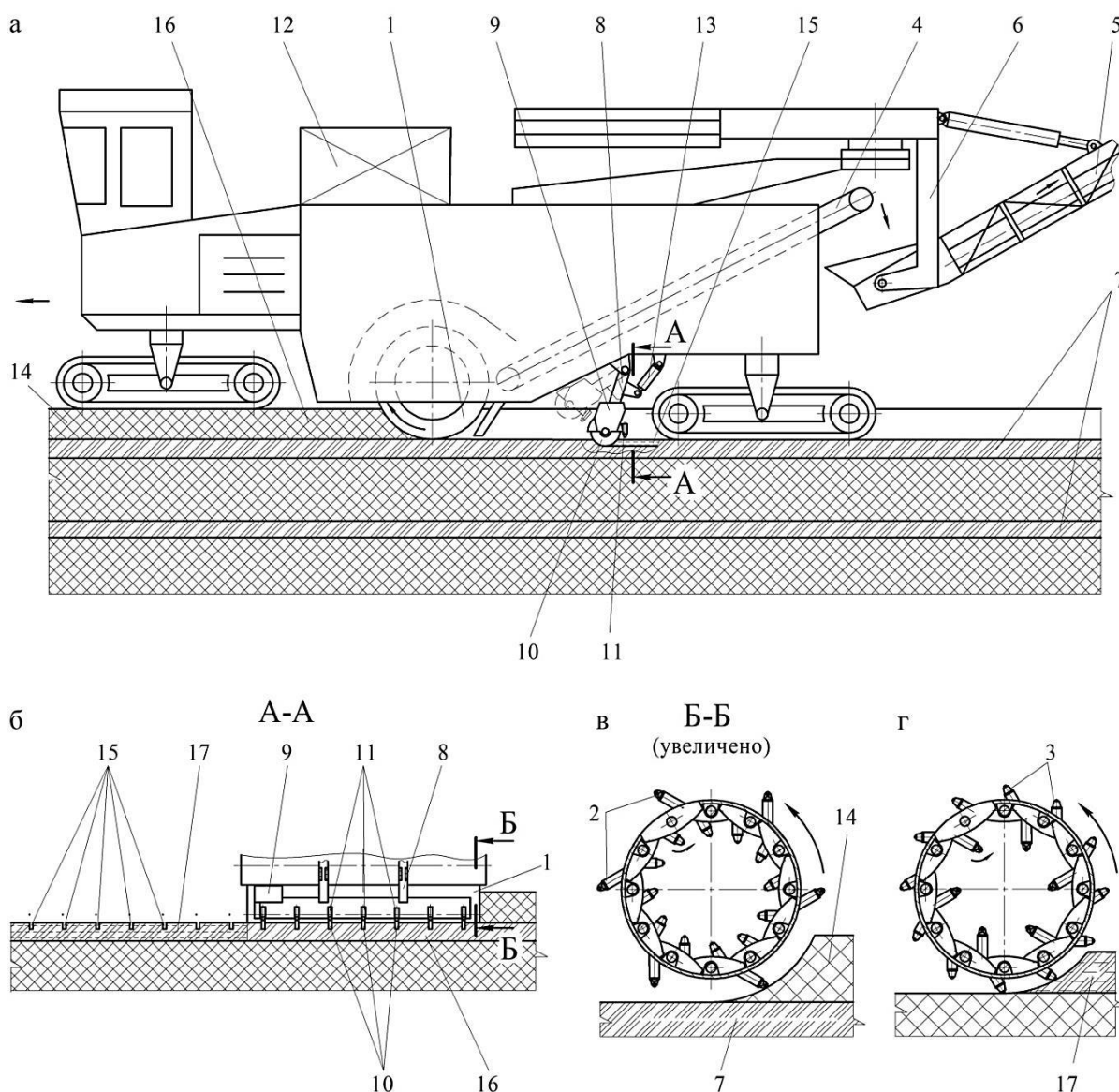


Рис. 2. Схема послойной разработки сложноструктурного пласта модернизированным карьерным комбайном с дезинтеграцией прослоев прочных пород: а – общий вид комбайна; б – формирование щелей в прослое; в, г – фрезерный рабочий орган с резцами в положении для разработки угля и дезинтегрированного прослоя соответственно

Fig. 2. Scheme of a layer-by-layer mining of a complex-structured bed by a modernized surface miner with disintegration of interlayers of strong rocks: а is a general view of the surface miner; б is formation of cracks in the interlayer; в, г is a milling working body with cutters in the position for mining of coal and the disintegrated interlayer, respectively

После выемки дезинтегрированного прослоя 17 прочных пород в рабочее положение вновь устанавливаются удлиненные резцы 2 фрезерного рабочего органа 1 и осуществляется выемка угля из нижележащей части сложноструктурного пласта.

По сравнению с бурением сети скважин для заливки раствора ПАВ формирование щелей 15 посредством нарезных дисков 10 более технологично для разупрочнения прослоев 7 прочных пород небольшой мощности и не требует применения дополнительного горного

оборудования. Ближкое расстояние между смежными щелями 15 позволит повысить скорость дезинтеграции прослоя. Глубина щелей 15 для заливки необходимого объема раствора ПАВ определяется по формуле

$$h = \frac{H \cdot B \cdot V \cdot k}{s \cdot n},$$

где H – мощность прослоя, м; B – ширина обрабатываемой полосы, м; V – удельный расход раствора

ПАВ на пропитку массива, $\text{м}^3/\text{м}^3$; k – коэффициент, учитывающий частичное поглощение раствора ПАВ непосредственно при заливке из-за наличия трещиноватости и пористости массива; s – ширина формируемой щели, м; n – число щелей.

Расчеты показывают, что при разработке сложноструктурного пласта модернизированным карьерным комбайном с шириной фрезерования 2,6 м для дезинтеграции прослоя мощностью 0,25 м, при формировании семи щелей на обрабатываемой полосе с шириной щели 0,01 м и удельным расходом раствора ПАВ для пропитки массива – $0,005 \text{ м}^3/\text{м}^3$, при коэффициенте $k = 0,9$ необходимая глубина щелей составит порядка 4-5 см. Ограниченная подача раствора ПАВ через близко нарезанные друг от друга щели в локальном объеме прослоя с учетом его мощности обеспечивает поглощение раствора ПАВ прочными породами прослоя с минимальным просачиванием раствора в пласт полезного ископаемого.

Исходя из графиков, представленных на рис. 1, видно, что при снижении прочности пород прослоя с 90 МПа на 30-40% техническая производительность комбайнов существенно возрастет, в частности у карьерного комбайна Wirtgen 2600SM производительность увеличится в 1,5-1,8 раза.

Заключение

В статье предлагается технико-технологическое решение по разработке сложноструктурных пластов, сложенных породами, значительно различающимися по прочности, с применением модернизированного карьерного комбайна, снабженного оборудованием для дезинтеграции прочных породных прослоев небольшой мощности. Дезинтеграция прослоев осуществляется путем формирования щелей с одновременной подачей в них раствора ПАВ для пропитки прочных пород. Формирование щелей в сравнении с бурением сети скважин для подачи раствора ПАВ позволит существенно упростить и удешевить процесс подготовки к ведению дезинтеграции тонких прослоев, а также повысить его производительность. Предложена формула для определения необходимой глубины формируемых щелей, в которые подается раствор ПАВ.

Модernизированный карьерный комбайн снабжен фрезерным рабочим органом с изменяемой схемой расстановки резцов, при этом полезное ископаемое обрабатывается удлиненными редко расставленными резцами для обеспечения высокой производительности выемки. Перед обработкой дезинтегрированных породных прослоев, имеющих более высокую прочность в сравнении с полезным ископаемым, осуществляется поворот резцов с изменением схемы их расстановки и включением в работу стандартных резцов. Снижение прочности породного прослоя после его пропитки раствором ПАВ позволяет снизить нагрузки на рабочее оборудование и значительно повысить производительность карьерного комбайна, что обеспечит снижение себестоимости выемки и позволит повысить рентабельность горного производства.

Список источников

1. Трубецкой К.Н., Захаров В.Н., Галченко Ю.П. Природоподобные и конвергентные технологии при освоении минеральных ресурсов литосферы // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. №6. С. 560-566.
2. Afum B.O., Ben-Awuah E., Askari-Nasab H. A mixed integer linear programming framework for optimising the extraction strategy of open pit - underground mining options and transitions // International Journal Of Mining Reclamation And Environment. 2019, vol. 34, no. 10, pp.700-724.
3. LaRoche-Boisvert M., Dimitrakopoulos R. An Application of Simultaneous Stochastic Optimization at a Large Open-Pit Gold Mining Complex under Supply Uncertainty // Minerals 2021, vol. 11, no. 2, p. 172.
4. Sekisov A., Rasskazova A. Assessment of the possibility of hydrometallurgical processing of low-grade ores in the oxidation zone of the Malmyzh Cu-Au porphyry deposit // Minerals. 2021, vol. 11, no. 1, pp. 1-11.
5. Baninla Y., Zhang M., Lu Y., Liang R., Zhang Q., Zhou Yu., Khan K. A transitional perspective of global and regional mineral material flows // Resources, Conservation and Recycling. 2019, vol. 140, pp. 91-101.
6. Секисов А.Г., Шевченко Ю.С., Лавров А.Ю. Взрывоинъекционная подготовка руд к выщелачиванию // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды: сб. науч. ст. Новосибирск, 2012. С. 125-132.
7. Sekisov G.V., Cheban A.Y. Low-waste mining technology for structurally complex deposits with mixed-type process flows of ore extraction and processing // Journal of Mining Science. 2021. Т. 57. № 6. С. 978-985.
8. Щадов В.М. Открытая разработка сложноструктурных угольных месторождений Восточной Сибири и Дальнего Востока. М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2004. 298 с.
9. Азев В.А., Гартман А.А., Хажиев В.А. О технологических параметрах открытой угледобычи лоппадающих месторождений при роботизации автомобильного транспорта // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 5-12.
10. Чебан А.Ю. Совершенствование геотехнологии выемки тонких рудных тел с применением стрелового комбайна // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. №1. С. 340-348.
11. Mohd Im. Variation of production with time, cutting tool and fuel consumption of surface miner 2200 SM 3.8 // International Journal of Technical Research and Applications. 2016, no. 1, pp. 224-226.
12. Чебан А.Ю. Способ добычных работ для малых угольных разрезов с применением усовершенствованного карьерного комбайна // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. №2. С. 36-42.

13. Ермаков С.А., Иль А.П., Хосоев Д.В. Оценка эффективности применения комбайнов Wirtgen на Эльгинском каменноугольном месторождении // Горная промышленность. 2018. №6. С. 77-79.
14. Kumar C., Murthy V., Kumaraswamidhas L., Prakash A. Influence of cutting drum specifications on the production performance of surface miner under varied rock strength – some investigations // Journal of Mines, Metals and Fuels. 2016, vol. 64, pp. 181-186.
15. Чебан А.Ю. К вопросу об определении производительности карьерных комбайнов в различных условиях эксплуатации // Системы. Методы. Технологии. 2014. №3. С. 145-148.
16. Клементьева И.Н., Кузиев Д.А. Современное состояние и перспективы развития конструкций карьерных комбайнов для безвзрывной послойной выемки прочных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. №2. С. 123-128.
17. Улучшение качества минерального сырья при разработке сложноструктурных месторождений посредством модернизации рабочего оборудования карьерных комбайнов / А.Е. Бурдонов, А.Ю. Чебан, Н.П. Хрунина, К.В. Прохоров // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. №11. С. 4-9.
18. Palei S.K., Karmakar N.C., Paliwal P., Schimm B. Optimization of productivity with surface miner using conveyor loading and truck dispatch system // International Journal of Research in Engineering and Technology. 2013, vol. 2, no. 9, pp. 393-396.
19. Чебан А.Ю. Классификация конструкций карьерных комбайнов // Недропользование XXI век. 2015. №5. С. 64-69.
20. Пихлер М., Панкевич Ю.Б., Николаев Д.В. Первые результаты работы горного комбайна Wirtgen 2500SM на сланцевом карьере Kivioli (Эстония) // Горная промышленность. 2006. №3. С. 20-22.
21. Применение методов физико-химического разупрочнения массивов крепких пород при работе машин типа КСМ / А.Г. Кузнецов, Р.М. Штейнцайг, Г.Я. Воронков, А.И. Шендеров, А.А. Александров // Горная промышленность. 1997. №4. С. 3-7.
22. Панишев С.В., Хосоев Д.В., Матвеев А.И. Повышение эффективности разработки вскрышных пород и углей Эльгинского месторождения Якутии путем их разупрочнения с использованием поверхностно-активных веществ // Горная промышленность. 2021. №1. С. 98-104.
23. Чебан А.Ю., Секисов А.Г. Совершенствование технологии разработки сложноструктурных месторождений с применением комбинированной выемки руд // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 35-44.
24. Maloletnev A.S., Mazneva O.A., Naumov K.I. Preparation of granulated domestic fuel from small coal fractions of the Moscow and Kansk-Achinsk basins // Solid Fuel Chemistry. 2012, vol. 46, no. 2, pp. 114-120.
25. Смагин В.П., Федорко П.В., Федорко Н.П. Анализ использования комбайна Wirtgen 2200SM при разработке сложноструктурных угольных пластов на разрезе «Черемховский» // Горная промышленность. 2015. №2. С. 74-76.

References

1. Trubetsky K.N., Zakharov V.N., Galchenko Yu.P. Nature-like and convergent technologies in the development of mineral resources of the lithosphere. *Vestnik Rossiiskoy akademii nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences]. 2020;90(6):560-566. (In Russ.)
2. Afum B.O., Ben-Awuah E., Askari-Nasab H. A mixed integer linear programming framework for optimising the extraction strategy of open pit - underground mining options and transitions. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2019;34(10):700-724.
3. LaRoche-Boisvert M., Dimitrakopoulos R. An application of simultaneous stochastic optimization at a large open-pit gold mining complex under supply uncertainty. *Minerals*. 2021;11(2). Article ID 172.
4. Sekisov A., Rasskazova A. Assessment of the possibility of hydrometallurgical processing of low-grade ores in the oxidation zone of the Malmyzh Cu-Au porphyry deposit. *Minerals*. 2021;11(1). Article ID 69.
5. Baninla Y., Zhang M., Lu Y., Liang R., Zhang Q., Zhou Yu., Khan K. A transitional perspective of global and regional mineral material flows. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019;140:91-101.
6. Sekisov A.G., Shevchenko Yu.S., Lavrov A.Yu. Explosive injection preparation of ores for leaching. *Fundamentalnye problemy formirovaniya tekhnogennoy geosredy: sb. nauch. st.* [Fundamental problems of the formation of the industry-related geoenvironment: Collection of research papers]. Novosibirsk, 2012, pp. 125-132. (In Russ.)
7. Sekisov G.V., Cheban A.Y. Low-waste mining technology for structurally complex deposits with mixed-type process flows of ore extraction and processing. *Journal of Mining Science*. 2021;57(6):978-985.
8. Shchadov V.M. *Otkrytaya razrabotka slozhnostrukturnykh ugolnykh mestorozhdeniy Vostochnoy Sibiri i Dalnego Vostoka* [Open-pit mining of complex-structured coal deposits in Eastern Siberia and the Far East]. Moscow: Publishing House of Moscow State Mining University, 2004, 298 p. (In Russ.)
9. Azev V.A., Gartman A.A., Khazhiev V.A. Technology parameters of open-pit coal mining of flat dipping deposits using robotization of road transport. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022;20(2):5-12. (In Russ.)
10. Cheban A.Yu. Improving geotechnology of extraction of thin ore bodies using boom-type roadheaders. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Nauki o Zemle* [News of Tula State University. Earth Sciences]. 2020;(1):340-348. (In Russ.)

11. Mohd Im. Variation of production with time, cutting tool and fuel consumption of surface miner 2200 SM 3.8. *International Journal of Technical Research and Applications*. 2016;(1):224-226.
12. Cheban A.Yu. A method of mining operation for small coal strip mines using an advanced surface miners. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2019;(2):36-42. (In Russ.)
13. Ermakov S.A., Il A.P., Khosoev D.V. Assessment of the operation performance of Wirtgen surface miners at the Elga hard coal deposit. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry]. 2018;(6):77-79. (In Russ.)
14. Kumar C., Murthy V., Kumaraswamidhas L., Prakash A. Influence of cutting drum specifications on the production performance of surface miner under varied rock strength - some investigations. *Journal of Mines, Metals and Fuels*. 2016;64:181-186.
15. Cheban A.Yu. On determination of the capacity level of surface miners under various operating conditions. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies]. 2014;(3):145-148. (In Russ.)
16. Klementeva I.N., Kuziev D.A. An actual status and prospects for development of surface miners designed for blastless layer-by-layer excavation of solid rock. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2019;(2):123-128. (In Russ.)
17. Burdonov A.E., Cheban A.Yu., Khrunina N.P., Prokhorov K.V. Improving the quality of mineral raw materials in mining of complex-structured deposits by modernizing the working equipment of surface miners. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia]. 2017;21(11):4-9. (In Russ.)
18. Palei S.K., Karmakar N.C., Paliwal P., Schimm B. Optimization of productivity with surface miner using conveyor loading and truck dispatch system. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2013;2(9):393-396.
19. Cheban A.Yu. The classification of designs of surface miners. *Nedropolzovanie XXI vek* [Subsoil Use in the 21st Century]. 2015;(5):64-69. (In Russ.)
20. Pikhler M., Pankevich Yu.B., Nikolaev D.V. The first results of the operation of the Wirtgen 2500SM surface miner at the Kivioli shale quarry (Estonia). *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry]. 2006;(3):20-22. (In Russ.)
21. Kuznetsov A.G., Shteintsai R.M., Voronkov G.Ya., Shenderov A.I., Aleksandrov A.A. Application of methods of physical and chemical dilution of solid rock masses during the operation of machines of the continuous surface miner type. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry]. 1997;(4):3-7. (In Russ.)
22. Panishev S.V., Khosoev D.V., Matveev A.I. Increasing efficiency of mining of overburden rocks and coals at the Elga coal deposit in Yakutia by their dilution with surfactants. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry]. 2021;(1):98-104. (In Russ.)
23. Cheban A.Yu., Sekisov A.G. Improvement in the technology for the development of complex deposits applying combined ore extraction. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022;20(3):35-44. (In Russ.)
24. Maloletnev A.S., Mazneva O.A., Naumov K.I. Preparation of granulated domestic fuel from small coal fractions of the Moscow and Kansk-Achinsk Basins. *Solid Fuel Chemistry*. 2012;46(2):114-120.
25. Smagin V.P., Fedorko P.V., Fedorko N.P. Analysis of the Wirtgen 2200SM surface miner operation at the Cheremkhovskoe opencast mine in complex-structured coal beds. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry]. 2015;(2):74-76. (In Russ.)

Поступила 05.05.2023; принята к публикации 13.09.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 05/05/2023; revised 13/09/2023; published 25/12/2023

Чебан Антон Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИГД ХФИЦ ДВО РАН), Хабаровск, Россия.
Email: chebanay@mail.ru. ORCID 0000-0003-2707-626X

Anton Yu. Cheban – PhD (Eng.), Associate Professor, Lead Researcher, Mining Institute of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (MI KhFRC FEB RAS), Khabarovsk, Russia.
Email: chebanay@mail.ru. ORCID 0000-0003-2707-626X