

УДК 622.27.2

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПОДЗЕМНОЙ УГЛЕДОБЫЧИ В РФ



О. И. КАЗАНИН,

декан горного факультета, д-р техн. наук,
Kazanin_OI@pers.spmi.ru

Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Введение

Мировая угольная отрасль находится под воздействием общемировых трендов по декарбонизации экономики и энергетики, борьбы с изменениями климата. Вытеснение угольной генерации из топливно-энергетических балансов за счет расширения использования возобновляемых источников энергии стало политикой развитых стран, активно продвигаемой по всему миру [1, 2]. Вместе с тем, как отмечается в работе [3], в развивающихся странах, доля которых в мировом потреблении угля превышает 80 %, приоритетным остается доступность энергоресурсов, а потребность в энергоресурсах определяется в первую очередь темпами роста экономик, а не влиянием производства на климат и окружающую среду. По прогнозам Международного Энергетического Агентства [4], добыча угля в 2025 г. составит 8221 млн т, при этом, несмотря на снижение общего объема добычи на 0,4 % по сравнению с 2022 г., ожидается рост добычи в странах Азиатско-Тихоокеанского региона. Потребление угля в мире в этот период возрастет с 8025 млн т в 2022 г. до 8038 млн т в 2025 г. Основным производителем угля является Китай, где ожидаемый в 2025 г. объем добычи составит 4237 млн т. Таким образом, уголь в ближайшей и среднесрочной перспективе остается надежным и наиболее доступным энергетическим ресурсом. Более половины мирового производства угля добывается подземным способом, что предопределяет рост требований к применяемым технологиям как в отношении эффективности и безопасности, так и в отношении воздействия на окружающую среду.

В России в 2022 г. добыча угля составила 443,5 млн т (+1,2 млн т по сравнению с 2021 г.), из которых 102,9 млн т (-10,3 млн т к 2021 г.) были добыты подземным способом [5, 6]. Россия входит в пятерку крупнейших экспортеров угля в мире, что также диктует жесткие требования к уровню применяемых технологий не только в части экономической эффективности. Уголь, как и любой другой товар, при производстве которого допущены аварии и несчастные случаи, загрязнение

На основе анализа современного состояния и мировых трендов развития горных технологий рассмотрены основные направления подземной угледобычи на шахтах России. Показано, что наибольшие перспективы имеют системы разработки длинными забоями, обеспечивающими лучшие технико-экономические показатели эффективности и безопасности производства. Проанализированы способы подготовки выемочных участков, основные параметры и область применения. Рассмотрены особенности базовых технологий угледобычи (очистные работы, проходка выработок, перемонтаж очистных механизированных комплексов) на шахтах России и США, возможности их модернизации в краткосрочной перспективе. Отмечена важность научного сопровождения развития горных работ на шахтах и обеспечения непрерывного профессионального развития персонала в качестве необходимых условий обеспечения эффективности и безопасности горных работ.

Ключевые слова: уголь, шахта, технология, системы разработки, очистная выемка, проходка выработок, перемонтаж оборудования, безопасность, автоматизация

DOI: 10.17580/gzh.2023.09.01

окружающей среды свыше установленных нормативов, не будет востребован современными потребителями.

Объект и методы исследований

Объектом исследований являются технологии подземной добычи угля. Поскольку более 90 % общего объема угля добывается в 10 ведущих угледобывающих странах (включая Россию), анализ состояния и трендов развития технологий в этих странах дает возможность сформировать общее представление об отрасли. Наибольший интерес представляет угольная отрасль США, достигшая лучших показателей эффективности, а также Китая, обеспечивающая более 50 % мировой угледобычи. При подготовке статьи использованы материалы докладов автора совместно с докторами технических наук К. С. Коликовым и В. В. Соболевым на заседаниях рабочей группы Минэнерго России по вопросам деятельности угольных шахт с высоким риском аварийности в 2022 и 2023 гг.

Системы разработки

Развитие технологий подземной угледобычи является необходимым условием обеспечения конкурентоспособности компаний на фоне усложнения горно-геологических условий, роста глубины ведения горных работ и связанным с этим ростом природной метаноносности пластов, опасности динамических явлений, усложнения условий поддержания выработок и др. Среди применяемых систем разработки угольных

пластов наивысшие технико-экономические показатели обеспечивают системы разработки длинными забоями (лавами), на их долю приходится порядка 80 % общего объема подземной угледобычи. Системы разработки длинными забоями являются преобладающими на угольных шахтах России, Китая, Австралии, Польши, Казахстана и др., обеспечивают примерно половину подземной угледобычи в США. Несмотря на целый ряд достоинств систем разработки короткими забоями (гибкость технологии, меньшая стоимость оборудования и др.), с увеличением глубины ведения горных работ применение систем разработки длинными забоями становится практически безальтернативным. Вместе с тем системы разработки короткими забоями представляют интерес при освоении участков шахтных полей, где раскройка на выемочные участки требуемых для эффективного использования очистных механизированных комплексов (ОМК) невозможна или затруднительна. На шахтах России отмечается наличие больших объемов запасов в таких условиях [7].

В длинных комплексно-механизированных забоях (КМЗ) добычу угля осуществляют с использованием ОКМ и применением способа управления кровлей, как правило, полного обрушения. Полную закладку в качестве способа управления кровлей на шахтах России и США не применяют вследствие дополнительных затрат на содержание закладочного хозяйства и возведения закладки, что не позволяет таким шахтам оставаться конкурентоспособными. Очистные механизированные комплексы, работающие с полной закладкой, применяют на отдельных шахтах Китая при отработке запасов под охраняемыми объектами на поверхности. При использовании в качестве закладочных материалов породы терриконов и (или) отходов обогащения угля, золы ТЭЦ и др. процесс закладки можно рассматривать как процесс утилизации отходов производства и потребления угля, т. е. как элемент технологии замкнутого цикла.

В **таблице** на основе данных [5, 6, 8–11] представлена характеристика подземной угледобычи России и США в 2021 г. Как видно, производительность КМЗ на шахтах США почти в 3 раза превышает соответствующие показатели шахт России. Такой разрыв объясняется не только более благоприятными условиями на шахтах США, но и применяемыми пространственно-планировочными решениями, средствами механизации горных работ, особенностями базовых технологий угледобычи (очистная выемка, проходка, монтаж-демонтаж). Последняя авария с массовой гибелью людей (более 5 человек) на шахтах США произошла 13 лет назад [11].

В качестве условий обеспечения высокой производительности КМЗ и безопасности горных работ на угольных шахтах США С. Пенг [12] отмечает:

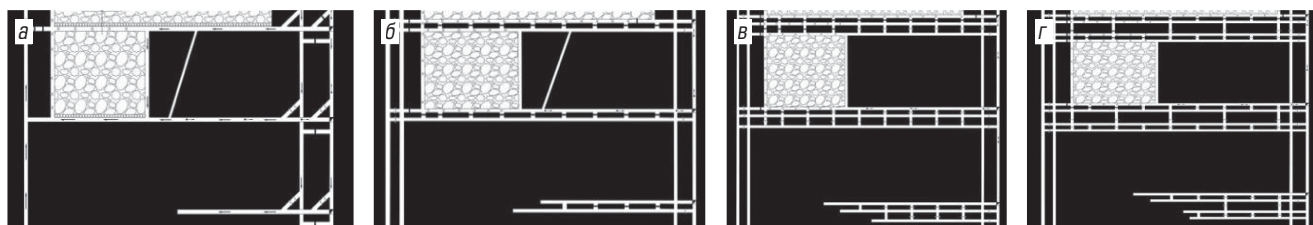
- благоприятные горно-геологические условия отработки: угол падения пласта не более 9°; пласт, выдержанный по мощности на глубине не более 640 м с прочной почвой, легкообрушаемой кровлей; низкую метанообильность выемочных участков;

Характеристики КМЗ на шахтах России и США в 2021 г.

Показатель	Россия	США
Число действующих шахт, ед.	53	33
Объем подземной угледобычи, млн т	113	142,7
Численность персонала, человек	38 263	13 185
Число КМЗ, ед.	52	37
Нагрузка на КМЗ: средняя, т/сут максимальная, млн т/год	5 297 1,5–1,8; 4,4	14 000 4,2; 7,2
Глубина ведения работ, м: средняя максимальная	425 1100	332 600
Мощность обрабатываемых пластов, м: полная вынимаемая	0,9–10,0	1,12–5,40 2,12–3,90
Длина, м: лавы выемочного столба	176–400 1000–4700	255–474 3927–7800
Подготовка выемочных участков	Бесцеликсовая, спаренными выработками	Тремя выработками, четырьмя выработками, спаренными выработками
Скорость, м/сут: подвигания очистных забоев проходки выработок	До 30 4–25	До 40 30–111
Продолжительность перемонтажа ОКМ, сут	60–90	14–21
Аварии с массовой гибелью людей (более 5 человек), год	2005, 2007, 2010, 2013, 2016, 2021	1992, 2001, 2006, 2007, 2010

- многотрековую подготовку выемочных участков с параметрами целиксов, исключаящими взаимовлияние смежных выемочных участков;
- высокопроизводительное надежное оборудование с сервисным обслуживанием от производителя;
- своевременное воспроизводство фронта очистных работ;
- эффективные технологии перемонтажа оборудования КМЗ: для лавы, длиной 366 м, перемонтаж может быть выполнен за 5–7 сут (как правило, комбайн и лавный конвейер предварительно смонтированы в новой монтажной камере);
- высококвалифицированный управленческий, инженерный и рабочий персонал;
- программы стимулирования эффективной и безопасной работы.

На шахтах США подготовка выемочных участков осуществляется в большинстве случаев тремя выработками с каждой стороны выемочного столба (см. **рисунок, в**), таким образом были подготовлены 29 из 37 выемочных участков в 2021 г.



Способы подготовки выемочных участков:

а – бесцеликовая; б – спаренными выработками; в – тремя выработками; г – четырьмя выработками

Бесцеликовая подготовка (см. рисунок, а) запрещена действующими правилами, а для подготовки спаренными выработками (см. рисунок, б) требуется специальное разрешение горного надзора (2 выемочных участка в 2021 г.). При отработке тонких газоносных пластов иногда применяют подготовку выемочных участков четырьмя выработками (см. рисунок, г) – 6 выемочных участков в 2021 г.

Каждый из способов подготовки имеет свои достоинства и недостатки, область применения. С увеличением числа выработок для подготовки выемочных участков расширяются технологические возможности схем, но вместе с тем увеличивается удельная протяженность проводимых и поддерживаемых выработок, а также эксплуатационные потери угля в целиках. На шахтах России наибольшее распространение имеют бесцеликовая подготовка и спаренными выработками (см. рисунок, а, б соответственно). В компании «СУЭК-Кузбасс» рассматривается применение подготовки тремя выработками.

С увеличением глубины ведения горных работ необходимая для обеспечения устойчивости выработок ширина целиков между штреками увеличивается, что приводит к росту эксплуатационных потерь угля, особенно при отработке мощных пластов. В Китае при отработке мощных пологих пластов системами с обрушением и выпуском подкровельной толщи угля, при подготовке выемочных участков спаренными выработками эксплуатационные потери достигают 30 %. Это послужило стимулом для исследований и последующего внедрения бесцеликовых схем подготовки с охраной выработок за лавой на границе с выработанным пространством охраняемыми сооружениями из заполненных бетоном стальных труб (ЗБСТ) [13]. Несмотря на большие затраты на изготовление, доставку, установку и заполнение бетоном ЗБСТ, шахтные исследования показали возможность обеспечения безремонтного поддержания выработки за лавой и получение экономического эффекта за счет существенного увеличения коэффициента извлечения угля и снижения удельной протяженности проводимых выработок.

Очистные работы

Как уже отмечалось, применение надежного энергооборуженного оборудования является необходимым условием обеспечения высокой производительности очистных забоев.

Среди ведущих мировых производителей оборудования ОМК для подземной угледобычи можно выделить компании США, Польши, Китая, поставляющие на рынок мощное и надежное оборудование, что дает возможность обрабатывать выемочные участки больших размеров. Современное оборудование ОМК позволяет максимально упростить раскройку шахтных полей и нарезать выемочные участки практически от одной до другой границы шахтного поля, что упрощает схемы транспортирования и вентиляции, позволяет обеспечить максимальный уровень концентрации горных работ. Так, в компании АО «СУЭК-Кузбасс» за период 2005–2019 гг. средняя длина лав увеличилась с 226 до 290 м (+28 %), длина выемочных столбов с 1,6 до 2,6 км (+62 %) [14]. При этом на шахте им. В. Д. Ялевского обрабатывают выемочные участки длиной 4,7 км с лавой длиной 400 м. Аналогичные максимальные показатели на шахтах США составляют 7,8 км и 474 м соответственно (см. таблицу).

По данным [8] в 34 КМЗ на шахтах США в 2021 г. работали комбайны Joy 7LS, в 3 – комбайны Cat EL с установленной мощностью двигателей 1245–1736 кВт, работающие главным образом с напряжением 4160 В. Ширина захвата комбайнов 1,07 м (70 % КМЗ), скорость подачи комбайнов – до 45 м/мин. В 23 КМЗ применяли лавные конвейеры производства Cat, в 9 – Joy, в остальных – других производителей. Ширина става конвейеров 864–1346 мм, диаметр цепи 38–50 мм, скорость 1,29–1,89 м/с, приводы 3×735 (3×1397; 3×1618) кВт производительностью до 7000 т/ч. Во всех КМЗ применяли двухстоечные секции крепи, в основном производства Joy и Cat (по 16 КМЗ), ширина секций 1,75 и 2 м, средняя несущая способность 1050 т (максимальная – 1328 т). Продолжительность передвижки секции составляет 6–8 с.

Среди изменений последних лет в отношении оборудования ОМК отмечается [8], что угледобывающим компаниям приходится адаптироваться к тому, что ведущие производители оборудования перестают выпускать лавокомплекты целиком, и для оснащения одного КМЗ приходится приобретать оборудование разных производителей. Так, например, компания Joy больше не производит секции механизированной крепи для очистных забоев, и на американском рынке появились секции польской компании Fatig. Для угольных компаний России

такая ситуация не является новой, лишь незначительное число КМЗ оснащены лавокомплектами одного производителя.

Стоимость лавокомплекта современного оборудования составляет 60–100 млн долл. США и более, потери от простоев оборудования могут составлять 500–2000 долл/ч [12]. В связи с этим при проектировании необходим качественный прогноз горно-геологических условий разработки, включая газоносность пластов, напряженно-деформированное состояние (НДС) массива, наличие тектонически напряженных и тектонически разгруженных зон [15, 16]. Кроме того, при организации производства необходимо исключать простои из-за несвоевременного воспроизводства фронта очистных работ, превышения сроков перемонтажа оборудования и др. Вместе с тем, как показывает отечественный и зарубежный опыт [17], эффективность использования современного оборудования на подземных работах не превышает 30 %, т. е. существенно повысить технико-экономические показатели подземной угледобычи можно за счет повышения эффективности использования возможностей современного оборудования.

Проходка горных выработок

Для своевременного воспроизводства фронта очистных работ на 1 м подвигания очистного забоя проходка выработок должна составлять 1,3–1,7 м; 2,5–2,8 м; 4–4,4 м; 5,5–5,9 м при подготовке выемочных участков бесцеликтовой, двумя, тремя или четырьмя выработками соответственно (см. рисунок). На шахтах США выработки проводят прямоугольной формы шириной 5,49 – 6,10 м и высотой, равной, как правило, мощности пласта. Применяется анкерное крепление выработок. Поскольку на шахтах США протяженные одиночные выработки практически не проводят, при проходке параллельных двух и более выработок применяют методы place-change и in-place. При применении метода place-change параллельные выработки проводят одним комбайном, работающим поочередно в забое каждой выработки. При методе in-place в каждом забое параллельных выработок работает отдельный комбайн. В комплект оборудования для проходки выработок, помимо комбайна, могут входить анкероустановщик, самоходные вагоны или гибкие конвейеры-поезда (FCT – flexible conveyor-train) длиной до 175 м. Скорость проведения выработок составляет 40–116 м/сут, при этом извлекаемый при проходке уголь может составлять существенную часть добываемого на шахте угля.

На шахтах России выработки проводят прямоугольной или арочной формы поперечного сечения, применяют анкерные, рамные или комбинированные типы крепи в зависимости от горно-геологических и горнотехнических условий отработки пластов. При этом отставание работ по воспроизводству фронта очистных работ является проблемой для целого ряда шахт и одной из причин простоев ОМК. Так, на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс», на которых в период 2013–2018 гг. были установлены рекорды производительности КМЗ (1 млн т – 1,6 млн

т/мес); при длине лав 300 и 400 м в рекордные месяцы подвигание очистных забоев составляло 547–700 м/мес. То есть при работе с такой производительностью КМЗ проходка выработок должна составлять при подготовке выемочных участков спаренными выработками 1380–1750 м/мес, а при переходе на подготовку тремя выработками 2200–2800 м/мес, что является трудновыполнимой задачей, требующей отдельного детального рассмотрения.

Анализ динамики скорости проходки выработок и скорости подвигания очистного забоя на шахте им. В. Д. Ялевского АО «СУЭК-Кузбасс» за период 2016–2019 гг. [18] показал, что даже применение современных проходческих комбайнов фронтального действия, обеспечивающих лишь в отдельные месяцы скорость проходки 600 м/мес и более, не позволяет обеспечить своевременное воспроизводство фронта очистных работ.

В качестве общих задач по повышению скорости проходки выработок на шахтах России можно отметить необходимость повышения эффективности использования современного оборудования за счет организации работ, применения комбайнов фронтального и избирательного действия при проведении протяженных и коротких выработок соответственно, совмещения операций проходческого цикла и др. В качестве одного из направлений рассматривается возможность поэтапного крепления выработок с возведением в забое минимального числа анкеров и завершения крепления до паспортных значений уже за пределами призабойной зоны.

Отдельной задачей является обеспечение безремонтного поддержания выработок, особенно при бесцеликтовой подготовке выемочных участков пластов на больших глубинах. Как показывает опыт работы шахт Печорского и Донецкого бассейнов, несмотря на применение рамной крепи, крепи усиления в зоне влияния очистного забоя, а также охранных сооружений на границе с выработанным пространством, во время эксплуатации выработки возникает необходимость перекрепления и (или) подрывки почвы, а объемы подрывки могут достигать 4–8 м³/м длины выработки.

Перемонтаж оборудования ОМК

Перемонтаж оборудования ОМК, т. е. демонтаж в демонтажной камере отработанного выемочного участка и монтаж в монтажной камере подготовленного к выемке участка является дорогостоящим процессом, который должен ограничиваться как по срокам, так и по числу перемонтажей в год. На период перемонтажа оборудование ОМК не работает на добыче угля, что снижает коэффициент использования оборудования и приносит убытки компании. Как показано в таблице, продолжительность перемонтажа ОМК на шахтах США составляет 14–21 сут, на шахтах России 60–90 сут, что не может считаться приемлемым показателем.

Опыт предприятий США показывает [12], что на шахтах, отработывающих пласты длинными забоями, обычно, имеется один комплект механизированной крепи, два очистных

комбайна, два лавных конвейера и подлавных перегружателя. В монтажной камере нового участка лавный конвейер и комбайн монтируют заранее, а из отработанного участка перемонтируют только секции механизированной крепи. Для перевозки оборудования используют колесные аккумуляторные погрузчики грузоподъемностью до 45 т, для монтажа-демонтажа оборудования в лаве – машины *Petito Mule* (кран на гусеничном ходу). Для обеспечения устойчивости демонтажных камер их формирование ведут очистным комбайном с креплением кровли анкерами и специальной сеткой из полимерных материалов.

Как показывает опыт работ по ремонту ОМК в шахтах России, наиболее частой причиной превышения плановых сроков ремонтных работ является неудовлетворительное состояние кровли демонтажных камер [17]. Вследствие этого требуется дополнительное время и ресурсы на ликвидацию последствий вывалов кровли и приведение камеры в устойчивое состояние. Среди рассматриваемых мер по сокращению сроков ремонта, помимо оптимизации организации работ, в работе [19] предложено также заблаговременное формирование искусственной кровли демонтажных камер.

Безопасность горных работ

Ключевым требованием к технологиям является обеспечение безопасности горных работ. С увеличением глубины ведения горных работ возрастает природная газоносность угольных пластов, опасность формирования газодинамических явлений, усложняются процессы поддержания выработок. В реестре опасных производственных объектов России находятся 92 шахты [10], в 2022 г. уголь добывали на 50 шахтах [6]. Шахты отработывают пласты, опасные по внезапным выбросам угля, породы и газа (30 шахт); опасные по горным ударам (33 шахты); склонные к самовозгоранию (32 шахты). На ряде шахт несколько опасностей проявляются одновременно (на 16 шахтах одновременно 4 опасности). Развитие горных работ на таких шахтах требует учета совместного влияния факторов. Большая часть подземной угледобычи поступает из шахт III категории по газу и сверхкатегорных, отработывающих пласты, опасные по взрывам пыли. При средней глубине ведения работ на шахтах России 425 м, например на шахтах, отработывающих Воркутское месторождение, глубина ведения работ составляет 800–1100 м.

В России накоплен большой практический опыт отработки пластов в сложных горно-геологических условиях, разработаны соответствующие нормативные документы, проводят прикладные научные исследования по эффективной и безопасной отработке пластов, в том числе и при одновременном воздействии различных опасных факторов (опасность по газу и горным ударам; опасность по горным ударам и по самовозгоранию и др.) [16, 20–24]. Вместе с тем, несмотря на системное снижение общих показателей травматизма, периодически повторяющиеся аварии с массовой гибелью людей на шахтах

России свидетельствуют о крайней актуальности вопросов безопасности. Начиная с 2013 г. Правилами безопасности [25] в качестве мер противоаварийной защиты угольным шахтам предписано иметь многофункциональные системы безопасности, т. е. комплекс систем и средств, обеспечивающий организацию и осуществление мониторинга и контроля технологических и производственных процессов, шахтную атмосферу и состояние массива, систему позиционирования персонала в нормальных и аварийных условиях.

Современная концепция безопасности – концепция приемлемого риска, предполагает оценку риска аварий на всех стадиях жизненного цикла горных предприятий. Существуют различные подходы к определению приемлемого риска [26]. В 2016 г. после аварии на шахте «Северная» была создана рабочая группа Минэнерго России по вопросам деятельности угольных шахт с высоким риском аварийности. Была разработана методика [27] и выполнена оценка рисков различных видов аварий на действующих шахтах России. Работа группы возобновлена в 2022 г., была модернизирована и вновь утверждена методика оценки рисков аварий [28], где в качестве одного из факторов опасности рассматривается человеческий.

В ходе работы группы проведена оценка рисков аварий, которая показала, что воздействие опасных факторов на действующих шахтах может быть компенсировано соблюдением требований нормативных документов, ответственным отношением к вопросам безопасности со стороны руководства и работников. Шахты, требующие немедленного прекращения горных работ вследствие недопустимых рисков аварий, установлены не были. Относительно необходимых условий обеспечения безопасности горных работ члены рабочей группы отметили качество прогноза горно-геологических условий разработки (включая газоносность угленосной толщи, НДС массива и др.), качество проектов отработки пластов, научное сопровождение развития горных работ, а также обеспечение подготовки и непрерывного профессионального развития персонала.

Рост глубины ведения горных работ, увеличение мощности современного оборудования, интенсивности воздействия на массив обуславливают необходимость проведения геодинамического районирования, оценки НДС массива на стадии проектирования, а также организация мониторинга НДС в процессе ведения горных работ [29]. Вопросы научного сопровождения развития горных работ и пример организации взаимодействия горнорудной компании с научным центром рассмотрены в работе [30].

В условиях увеличения глубины природной газоносности пластов повышается газообильность выемочных участков, поэтому наряду с применяемыми способами управления газовой выделением особую актуальность приобретает разработка внедрение технологий заблаговременной дегазационной подготовки пластов (ЗДП). Такая практика распространена на шахтах США и получает все большее распространение на шахтах

Китай. Применяют различные схемы ЗДП, включая использование скважин направленного бурения длиной до 3,5 км.

Для шахт России вопросами управления газовыделением, дегазации угленосной толщи занимались разные исследователи и научные коллективы [31–33]. Несмотря на достигнутые успехи, вопросы повышения эффективности ЗДП, а также утилизации метана остаются актуальными. Также принципиальным в плане безопасности подземной угледобычи остаются вопросы разработки технологий, исключающих или минимизирующих нахождение людей под землей.

Перспективы безлюдной выемки

Разработка технологии безлюдной добычи полезных ископаемых (Autonomous Mining) является проблемой и предметом исследований для горной науки в течение многих лет. Применительно к подземной угледобыче рассматриваются технологии без постоянного присутствия людей в очистных забоях и полностью безлюдные технологии, в которых присутствие людей под землей не предусмотрено в принципе. Среди технологий первой группы следует отметить технологии с применением автоматизированных (роботизированных) комплексов и агрегатов с передвижной крепью, а также автоматизированных (роботизированных) проходческо-добычных комбайнов. Ко второй группе относятся скважинные технологии, предполагающие изменение агрегатного состояния полезного ископаемого в процессе добычи. Применительно к разработке угольных месторождений это физико-химические геотехнологии: подземная газификация угля (ПГУ), гидрогенизация, а также скважинная гидродобыча (СГД) [34].

Физико-химические геотехнологии добычи угля в настоящее время имеют ограниченную область применения (ПГУ, СГД) и не могут конкурировать с традиционными технологиями добычи. Для развития физико-химических геотехнологий и выведения их на рынок требуются масштабные фундаментальные и прикладные исследования. В плане возможностей реализации, области применения, эффективности и безопасности горных работ наибольшие перспективы имеют автоматизированные комплексы и агрегаты с передвижной крепью, т. е. технологии добычи без постоянного присутствия людей в очистных забоях.

Автоматизация отдельных элементов механизированных комплексов (комбайн, лавный конвейер, механизированная крепь) по данным [12, 35], началась с 1977 года (электродвигательное управление крепью) и развивалась разными темпами для разных видов оборудования. Комплексную автоматизацию с возможностью управления ОМК из выработки или с поверхности реализуют с 2014 г. В современных КМЗ устанавливают до 7000 датчиков, которые обеспечивают мониторинг и контроль технологического процесса (датчики на комбайне, крепи, конвейере, системе пылеподавления, видеокамеры), а также состояния оборудования (напряжение, уровень масла, давление, вибрация, температура и др.). Видеокамеры

в очистном забое, на сопряжениях и в местах перегрузки угля позволяют в режиме реального времени видеть то, что происходит на участке; получают развитие видеоналитика.

Среди производителей оборудования ОМК наибольшее развитие вопросы автоматизации получили у компаний Caterpillar и Komatsu. Компания Cat, начиная с 2020 г., поставляет ОМК с автономным управлением, обеспечивающим автономную выемку без коррекции в течение определенного времени. По запросу заказчика возможна поставка системы визуализации, обеспечивающей прямую трансляцию данных из забоя, машинное обучение и др., т. е. формирование цифрового двойника КМЗ.

Активно развивается автоматизация и цифровизация подземной угледобычи на шахтах в Китае [36]. Число «умных» очистных забоев возросло с 494 в 2020 г. до 813 в 2021 г. За этот период число шахт производительностью 10 млн т в год и более возросло с 52 до 72, а показатель смертельного травматизма уменьшился с 0,059 до 0,044 чел./млн т добычи. Угольные шахты оснащают сетями передачи информации стандарта 5G, что позволяет передавать в диспетчерскую большие объемы информации из любой точки шахты. Во всех угольных компаниях России в разной степени внедрены цифровые инновации. В качестве одного из наиболее удачных примеров можно привести единый диспетчерско-аналитический центр АО «СУЭК-Кузбасс».

В условиях принятых в отношении России санкций для отечественных угледобывающих компаний существенно ограничен доступ к оборудованию ведущих мировых производителей. В таких условиях необходимо принятие соответствующей стратегии развития отрасли, обеспечивающей ее суверенитет [37]. В качестве возможных вариантов можно рассматривать переориентацию закупок оборудования на Китай и другие дружественные страны и (или) организацию параллельного импорта, и (или) развитие отечественного горного машиностроения, автоматизации и роботизации горного производства.

Заключение

В результате исследования сформированы следующие выводы и рекомендации.

- Главными условиями обеспечения эффективности и безопасности горных работ на угольных шахтах являются: достоверный прогноз горно-геологических условий (в том числе НДС массива, газоносность пластов и вмещающих пород, геодинамическое районирование); высокое качество проектов отработки пластов; современная техника и технологии ведения работ; высококвалифицированный управленческий, инженерный и рабочий персонал, культура безопасности и программы стимулирования безопасной работы.

- Наивысшие показатели производительности и безопасности подземной угледобычи в отечественной и мировой практике достигнуты при применении систем разработки длинными забоями с использованием современных ОМК.

- Существующие системы дистанционного и ручного управления технологическими процессами при применении ОМК в сочетании с системами мониторинга и контроля технологических процессов, оборудования, шахтной атмосферы, состояния массива, персонала позволяют не допускать аварий. На первом плане для предупреждения аварий необходимо учитывать человеческий фактор.

- Автоматизация и роботизация ОМК в плане имеющегося научного задела, возможностей реализации, области применения, эффективности и безопасности горных работ имеет наибольшие перспективы для обеспечения выемки угля без постоянного присутствия людей в очистных забоях.

- Физико-химические геотехнологии добычи угля в настоящее время имеют ограниченную область применения и не могут конкурировать с традиционными технологиями добычи. Для развития физико-химических геотехнологий и выведения их на рынок требуются масштабные фундаментальные и прикладные исследования.

- Для обеспечения технологического развития отрасли необходимо формирование (актуализация) общепромышленного перечня перспективных исследований и разработок,

отраслевого заказа на НИР и НИОКР с указанием целей, задач, сроков и планируемых результатов, источников финансирования. В перечень тем должна быть включена разработка отраслевого альбома технологических схем отработки пластов с последующей передачей альбома в компании, проектные институты и образовательные организации, реализующие программы подготовки в области подземной угледобычи.

- Для обеспечения требуемого уровня компетенций персонала в условиях повышения сложности и наукоемкости применяемых технологий необходимы разработка и реализация ведущими университетами и научными центрами программ повышения квалификации и (или) профессиональной переподготовки; обеспечение непрерывного профессионального развития по вопросам безопасности для всех категорий работников, включая руководителей.

Библиографический список

См. англ. блок. 

GORNYY ZHURNAL», 2023, № 9, pp. 4–11
DOI: 10.17580/gzh.2023.09.01

Promising technology trends in underground coal mining in Russia

Information about author

O. I. Kazanin¹, Dean of the Mining Faculty, Doctor of Engineering Sciences, Kazanin_OI@pers.spmi.ru

¹Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

In the article, based on the analysis of the current state and global trends in the development of mining technologies, the main directions of technological advancement in underground coal mining in Russia are considered. It is shown that longwall mining systems providing the best technical and economic indicators of production safety and efficiency have the greatest prospects. The methods of longwall panel development, their main parameters and the scope of application are analyzed. The features of the basic technologies involved in coal mining (longwalling, heading, teardown) in Russia and in the USA, as well as the possibilities of their modernization in the short term are considered. A significant reserve of productivity growth of longwalling and heading lies in the increased efficiency of using the potential of modern equipment. The analysis of the approaches to mining safety is carried out. The necessity of monitoring the risks of various accidents during the entire life cycle of a mine is emphasized. It is shown that in the complicated geological conditions in coal mining, automation and robotization, as well as transition to unmanned technologies become increasingly in demand. The analysis of the production automation in mines in the USA and in China is carried out, and the potential of this approach in coal mines of Russia is evaluated. The scientific supervision of mining operations and the maintenance of personnel training and professional development are highlighted as the necessary conditions of mining safety and efficiency.

Keywords: coal, mine, technology, mining system, longwall operation, heading, teardown, safety, automation.

References

1. Plakitkin Yu. A., Plakitkina L. S., Dyachenko K. I. Major trends shaping development of coal industry in the world and in Russia under conditions of low-carbon energy

economy: Major trends. Part I. Coal sector development ratio and rates under the influence of major coal market countries. *Gornyy Zhurnal*. 2022. No. 7. pp. 10–16.

2. Plakitkin Yu. A., Plakitkina L. S., Dyachenko K. I. Major trends shaping development of coal industry in the world and in Russia under conditions of low-carbon energy economy. Part II. Low-carbon development as a factor of decline in coal demand and its implications for coal-fired power generation prospects. *Gornyy Zhurnal*. 2022. No. 8. pp. 17–23.

3. Yanovskiy A. B. Coal: The battle for the future. *Ugol*. 2020. No. 8. pp. 9–14.

4. Coal 2022. Analysis and forecast to 2025. International Energy Agency, 2022. 137 p.

5. Petrenko I. E. Russia's coal industry performance for January – December, 2021. *Ugol*. 2022. No. 3. pp. 9–24.

6. Petrenko I. E. Russia's coal industry performance for January – December, 2022. *Ugol*. 2023. No. 3. pp. 21–33.

7. Klishin V. I., Rogova T. B., Shaklein S. V., Pisarenko M. V. Strategic objectives for technological development of the coal industry. *Ugol*. 2023. No. 3. pp. 52–59.

8. Fisor S. Production rebounds with fewer faces producing more tons. OEMs adapt service to meet increasing demand. *Coal Age*. 2022. January/February. pp. 16–23.

9. Fisor S. Longwall production loses a little steam. Through the use of new technology, operators hope to leave difficult geology in the gob. *Coal Age*. 2023. January/February. pp. 18–25.

10. Annual report about the activity of the Federal service for ecological, technological and nuclear inspection in 2021. Moscow : NTTs PB, 2022. 407 p.

11. NIOSH Mine and Mine Worker Charts. Centers for Disease Control and Prevention. Available at: <https://wwwn.cdc.gov/niosh-mining/MMWC> (accessed: 09.08.2023).

12. Peng S. S. Longwall mining. 3rd ed. Leiden : CRC Press/Balkema, 2019. 562 p.

13. Zi-Lu Liu, Zhan-Guo Ma, Kazanin O. I., Peng Gong, Ye Li et al. Deformation control technology of gob-side entry retaining with large volume CFST roadway side support in top-coal caving longwall and stability analysis: A case study. *Applied Science*. 2023. Vol. 13, Iss. 15. 8610. DOI: 10.3390/app13158610

14. Artemev V. B. "SUEK" JSC in 2018—Advanced technologies and innovations in the service of production. *Ugol*. 2019. No. 3. pp. 4–12.

15. Yutyaev E. P. Present-day challenges and prospects of flat gas containing coal beds underground mining technology. *Ugol*. 2017. No. 5. pp. 30–36.

16. Yutyaev E. P. Underground longwall mining of gently dipping gas-bearing coal seams. Moscow : Gornaya kniga, 2017. 288 p.

17. Kazanin O. I., Sidorenko A. A., Meshkov A. A. Organizational and technological principles of realization of the modern high productive longwall equipment capacity. *Ugol*. 2019. No. 12. pp. 4–13. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-12-4-13
18. Sidorenko A. A., Dmitriev P. N., Aparin A. G. Preparation of extraction areas for the intensive underground coal mining: tasks and solutions. *Ratsionalnoe osvoenie nedr*. 2021. No. 6. pp. 36–44.
19. Karpov G. N., Kovalskiy E. R., Nosov A. A. Longwall recovery room erecting method for flat coal seam mining. *GIAB*. 2022. No. 6-1. pp. 54–67. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_54
20. Sidorenko A. A., Dmitriev P. N., Alekseev V. Yu., Sidorenko S. A. Improvement of technological schemes of mining of coal seams prone to spontaneous combustion and rock bumps. *Journal of Mining Institute*. 2023. DOI: 10.31897/PMI.2023.37
21. Zubov V. P., Phuc L. Q. Development of resource-saving technology for excavation of flat-lying coal seams with tight roof rocks (on the example of the Quang Ninh coal basin mines). *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 257. pp. 795–806. DOI: 10.31897/PMI.2022.72
22. Kovalskii E. R., Gromtsev K. V. Development of the technology of stowing the developed space during mining. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 254. pp. 202–209. DOI: 10.31897/PMI.2022.36
23. Zubov V. P., Golubev D. D. Prospects for the use of modern technological solutions in the flat-lying coal seams development, taking into account the danger of the formation of the places of its spontaneous combustion. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 250. pp. 534–541. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.6
24. Romanchenko S. B., Naganovskiy Yu. K., Kornev A. V. Innovative ways to control dust and explosion safety of mine workings. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 252. pp. 927–936. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.14
25. Federal Rules and Regulations in industrial safety: Coal Mine Safety Regulations. 5th enlarged and revised edition. Moscow : NTTs PB, 2017. Series 05. Documents for Safety, Permitting and Supervisory Actions in Coal Industry. Iss. 40. 198 p.
26. Kabanov E. I. Allowable occupational injury risk assessment in coal mining industry. *GIAB*. 2022. No. 5. pp. 167–180. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_0_167
27. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/456073585?marker=7D20K3> (accessed: 10.08.2023).
28. Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_456410/2ff7a8c72de3994f30496a0ccbb1ddafdadfd518/ (accessed: 15.08.2023).
29. Shabarov A. N., Kuranov A. D. Basic development trends in mining sector in complicating geotechnical conditions. *Gornyi Zhurnal*. 2023. No. 5. pp. 5–10.
30. Abrashitov A. Yu., Shabarov A. N., Korchak P. A., Kuranov A. D. Dealing with geodynamic safety challenges in cooperation with a mining company: A case-study. *Gornyi Zhurnal*. 2023. No. 5. pp. 40–48.
31. Ruban A. D., Artemev V. B., Zaburdyayev V. S., Zakharov V. N., Loginov A. K. et al. Preparation and mining of coal seams with high gas content : Reference aid. Moscow : Gornaya kniga, 2010. 500 p.
32. Shuvalov Yu. V., Korshunov G. I., Montikov A. V., Istomin R. S., Sufiyarov A. M. et al. GAS Dynamics and geomechanics of coal massive at high speed of facing. *GIAB*. 2011. No. 6. pp. 80–88.
33. Slastunov S. V., Yutyaev E. P., Mazanik E. V., Lupiy M. G. Substantiation of technological solutions for the management of gas-allocation on the excavation site at coal preparation coal beds for intensive and safe development. *GIAB*. 2014. Special issue 3. Industrial safety. pp. 20–28.
34. Arens V. Zh., Boguslavskiy E. I., Gridin O. M., Kreynin E. V., Nebera V. P. et al. Physical and chemical geotechnology : Textbook. Moscow : Gornaya kniga, 2021. 816 p.
35. Peng S. S., Feng Du, Jingyi Cheng, Yang Li. Automation in U.S. longwall coal mining: A state-of-the-art review. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019. Vol. 29, Iss. 2. pp. 151–159.
36. Guofa Wang, Huaiwei Ren, Guorui Zhao, Desheng Zhang, Zhiguo Wen et al. Research and practice of intelligent coal mine technology systems in China. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2022. Vol. 9. 24. DOI: 10.1007/s40789-022-00491-3
37. Zhdaneev O. V. Technological sovereignty of the Russian Federation fuel and energy complex. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 258. pp. 1061–1078. DOI: 10.31897/PMI.2022.107

