УДК 622.831.3

DOI: 10.25018/0236 1493 2021 8 0 5

КОМПЛЕКСНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ

А.А. Сидоренко¹, П.Н. Дмитриев¹, В.В. Ярошенко¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: sidorenkoaa@mail.ru

Аннотация: Применение в длинных очистных забоях угольных шахт современного высокопроизводительного оборудования создало условия для повышения концентрации горных работ за счет уменьшения числа очистных забоев и привело к упрощению технологической структуры большинства российских шахт при сохранении и даже повышении их производственной мощности. Однако применение структуры «шахта-лава», получившей наибольшее распространение при подземной разработке пологих угольных пластов, в ряде случаев приводит к снижению эффективности недропользования и повышению опасности горных работ. Целью исследований являлось обоснование рациональной технологической структуры шахты при интенсивной разработке пологих угольных пластов высокопроизводительными лавами. Научная новизна исследований заключается в обосновании комплексного подхода к выбору рациональной технологической структуры шахты, обеспечивающей создание условий для рационального экономически эффективного и безопасного недропользования при добыче угля подземным способом. Рассмотрены достоинства и недостатки технологической структуры «шахта-лава». Показаны возможности зашитной выемки пластов, как эффективного регионального способа управления состоянием массива горных пород при отработке свит пластов в условиях опасности динамических явлений. Определены параметры защищенных зон для условий отработки защитного пласта длинными очистными забоями. Рассмотрена возможность снятия ограничений производительности лав по газовому фактору при отработке свит газоносных угольных пластов путем опережающей отработки менее продуктивного пласта с эффективной дегазацией выработанного пространства и снижением метаноносности подработанной углепородной толши. Рассмотрена возможность применения различных вариантов технологической структуры и порядка разработки пластов для идеализированной горно-геологической ситуации. Определены области рационального применения различных технологических структур. Даны рекомендации по выбору рациональной технологической структуры шахты для различных горно-геологических условий.

Ключевые слова: подземная разработка, угольные пласты, технологическая структура, шахта-лава, рациональный порядок отработки, защитные пласты, геодинамическая безопасность, метаноносность пластов, управление метановыделением, технико-экономические показатели.

Для цитирования: Сидоренко А. А., Дмитриев П. Н., Ярошенко В. В. Комплексное обоснование технологической структуры угольной шахты // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 8. – С. 5–22. DOI: $10.25018/0236_1493_2021_8_0_5$.

Integrated justification of technological structure for coal mine

A.A. Sidorenko¹, P.N. Dmitriyev¹, V.V. Yaroshenko¹

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: sidorenkoaa@mail.ru

Abstract: Employment of up-to-date high-performance equipment in longwalls has created conditions for the increase in concentration of mining operations by means of reduction in number of longwalls, and has simplified the technological structure in the majority of coal mines in Russia at the preserved or even enhanced production capacity. At the same time, the longwall mine structure which is mostly used in underground mining of gently dipping coal seams can impair mining safety and efficiency. The aim of this study was to justify a sound technological structure of high-productive longwalls in mining gently dipping coal seams. The scientific novelty of the research consists in the integrated approach to selecting a rational technological structure of a mine to ensure safe and economically efficient underground coal mining. The advantages and disadvantages of a longwall mine are discussed. The capabilities of protective mining of coal seams as an effective regional ground control method in extraction of multiple coal seams under high risk of dynamic phenomena are described. The protected zone parameters for longwall mining of a protection seam are determined. It is discussed how it is possible to lift restrictions placed on longwall capacity by gas criterion in a group of gasbearing coal seams by means of advanced extraction of a less-productive seam with simultaneous efficient drainage of the mined-out void and reduction in methane content of undermined coal. Applicability of different variants of such technological structure and sequence of mining is considered in an idealized geological situation. The ranges of efficient use of different technological structures are identified. The recommendations on selection of a rational technological structure for mines operating in different geological conditions are given.

Key words: underground mining, coal seams, technological structure, longwall mine, rational mining sequence, protective seams, geodynamic safety, coal methane content, methane release control, engineering-and-economic performance.

For citation: Sidorenko A. A., Dmitriyev P. N., Yaroshenko V. V. Integrated justification of technological structure for coal mine. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(8):5-22. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236 1493 2021 8 0 5.

Введение

Ближайшие перспективы развития подземной угледобычи в России связаны прежде всего с отработкой запасов пологих угольных пластов в условиях отсутствия эффективных технологий разработки крутонаклонных и крутых пластов, способных конкурировать с высокопроизводительными механизированными комплексами длинных очистных забоев. Применение в угольных шахтах современного надежного энерговоору-

женного оборудования обеспечило условия для многократного повышения нагрузок на очистные забои и позволило сократить их количество без снижения общей производственной мощности предприятий и предопределило формирование современного технологического «стандарта» интенсивной разработки пластов длинными очистными забоями: отработка выемочных столбов с повышенными параметрами (увеличенные длина лавы и длина столба) осуществля-

ется с использованием многоштрековой подготовки выемочных столбов и креплением анкерами участковых выработок при оставлении межстолбовых целиков заданной податливости (устойчивости), обеспечивающих надежную аэрогазодинамическую изоляцию ранее отработанных выемочных участков и эффективное управление состоянием ответственных элементов массива (в первую очередь обеспечивается устойчивость выработок в зоне влияния очистных работ). Применение такого технологического «стандарта» обеспечивает экономическую эффективность и конкурентоспособность подземной угледобычи в условиях высокой изменчивости конъюнктуры рынка.

Несколько десятилетий технологическая структура «шахта-лава» считается одной из лучших в организации производства при подземной угледобыче [1-7]. Реальность такова, что многообразны горно-геологические условия, в которых применение технологической структуры «шахта-лава» нецелесообразно или даже опасно. К таким условиям, в первую очередь, следует отнести разработку свит сближенных угольных пластов, склонных к динамическим явлениям (ДЯ). Специального рассмотрения требует разработка сближенных пластов, при которой первоочередная отработка одного из пластов (чаще всего подработка) способна привести к резкому снижению эффективности отработки другого пласта свиты. Кроме того, при отработке свит газоносных угольных пластов отработка первого из пластов свиты почти всегда характеризуется наличием ограничений нагрузки на очистной забой по газовому фактору, что делает невозможной его отработку с рациональными параметрами, включая применение современного высокопроизводительного оборудования, не позволяя реализовать весь производственный потенциал предприятия. Разнообразие горно-геологических условий разработки пологих угольных пластов месторождений России и изменение их по мере отработки запасов шахтных полей, а также высокая доля балансовых запасов с низкой технологичностью извлечения определяют необходимость проведения обоснования рациональной технологической структуры шахты с последующей оптимизацией параметров применяемых технологических схем основных производственных процессов для обеспечения безопасности и гарантированной экономической эффективности подземных горных работ. Следует отметить, что вопросы оптимизации технологической структуры и параметров технологических схем с целью обеспечения жизнеспособности шахт наиболее остро стоят перед шахтами, ведущими отработку запасов энергетических углей, которые в условиях низких цен должны конкурировать с угольными разрезами, не имеющими ограничений по габаритам и мощности применяемого оборудования.

Целью исследований является обоснование рациональной технологической структуры шахт для экономически эффективной и безопасной подземной разработки пологих угольных пластов современными высокопроизводительными очистными комплексами.

Методика проведения исследований

При проведении исследований выполнялся анализ нормативно-методической документации, регламентирующей подземную угледобычу при разработке свит угольных пластов, опыта отработки свит сближенных угольных пластов в России и за рубежом, влияния подработки и надработки на эффективность и безопасность ведения горных работ при отработке сближенных газоносных пластов и пластов, склонных к динамиче-

ским явлениям, а также возможностей современных способов управления метановыделением.

Анализ эффективности технологической структуры «шахта–лава»

Повышение концентрации работ при сокращении числа очистных забоев, на шахтах, применяющих технологическую структуру «шахта—лава», позволяет уменьшить протяженность проводимых и поддерживаемых выработок, снизить затраты на транспорт, вентиляцию, водоотлив, сокращая, таким образом, общешахтные затраты, а также минимизировать капитальные затраты на приобретение дорогостоящего высокопроизводительного очистного оборудования, обеспечивая в конечном итоге повышение экономической эффективности подземной угледобычи.

В качестве основного недостатка структуры «шахта-лава» чаще всего указывают низкую устойчивость денежного потока и высокую чувствительность к различного рода длительным плановым, например, перемонтаж оборудования лавы, и неплановым (аварийным) простоям, продолжительность которых может достигать нескольких месяцев, в течение которых шахта не приносит дохода, потребляя в то же время значительные ресурсы для сохранения производственного потенциала. Кроме того, некоторые исследователи [8] подчеркивают, что большинство шахт, добывающих коксующийся уголь, входят в состав металлургических холдингов и являются звеном в технологической цепочке «руда – кокс – сталь». В таком случае длительное отсутствие добычи и поставок источника кокса - угля ставит под угрозу стабильность работы всей технологической цепочки и выполнение контрактных обязательств, со всеми вытекающими последствиями.

Необходимость устойчивой работы технологической системы «шахта-лава» с поддержанием запланированной производственной мощности и сохранением высоких технико-экономических показателей работы предприятия, определяемых производительностью единственного очистного забоя, обусловила на практике стремление к первоочередной отработке наиболее продуктивных мощных угольных пластов с отдалением во времени отработки пластов средней мощности и тонких, что связано не только с желанием обеспечить устойчивую работу предприятия, но и необходимостью применения другого комплекта очистного оборудования для отработки пластов, мощность которых существенно отличается от мощности пластов, находящихся в текущей разработке. Рациональный в принципе, такой подход неизбежно ведет к существенному снижению производственной мощности «шахты-лавы» после доработки запасов наиболее продуктивных пластов. Для поддержания уровня производственной мощности в подобных условиях необходима работа нескольких очистных забоев. Таким образом, структура «шахта-лава» для свит угольных пластов может эффективно применена в ограниченных пространственных и временных условиях.

Особенности отработки свит угольных пластов, склонных к динамическим явлениям

Наибольшая сложность в обеспечении эффективной и безопасной отработки запасов связана с разработкой свит угольных пластов, где первоочередная отработка одного из пластов способна оказать существенное влияние на условия ведения работ по другим пластам, а порядок отработки пластов предопределяет эффективность и безопасность отработки запасов. Вопросам влияния подработки и надработки на эффективность

и безопасность при отработке сближенных угольных пластов посвящено большое число научных работ, выполненных как в России, так и за рубежом [9-18]. Результатами таких исследований стала разработка целого ряда нормативно-методических документов [19-23].

Наиболее полно вопрос рационального порядка отработки сближенных пластов изучен для условий применения первоочередной отработки защитных пластов, которая является общепризнанным методом обеспечения безопасности при отработке пластов, опасных по динамическим явлениям. Для обеспечения наибольшей экономической эффективности применения метода защитных пластов разработан порядок отработки для условий ряда действующих шахт [23], применение которого обеспечивает безопасные условия в течение всего срока отработки пластов. Однако опережающая

отработка защитных пластов несовместима с современной концепцией повсеместного применения технологической структуры «шахта-лава», поскольку такой метод обеспечивает гарантированное защитное действие лишь в течение ограниченного периода времени — не более 5 лет. Именно таким ограничением обусловлено на практике, например, применение при отработке пластов, опасных по ДЯ в условиях Воркутского месторождения: не менее двух очистных забоев для обеспечения объемов и сроков отработки запасов выемочного участка по защитному пласту и создания безопасных условий ведения работ по защищаемому продуктивному пласту с его выемкой в пределах защищенной зоны (рис. 1, a) в течение срока гарантированной защиты.

Размеры защищенной зоны в кровлю (S_1) почву защитного пласта (S_2) определяют по формулам:

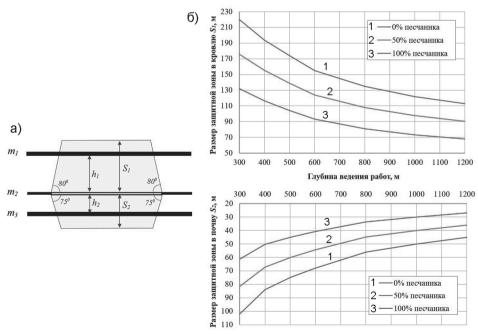


Рис. 1. Принципиальная схема построения защищенной зоны (a) и влияние глубины ведения работ и состава пород междупластья на ее размеры в кровлю S_1 и почву S_2 (б)

Fig. 1. Layout of protected zone construction (a) and influence exerted by mining depth and composition of the parting on the size of the protected zone propagation in the roof S_1 and floor S_2 (b)

$$S_1 = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot S_1', M$$
 (1)

$$S_2 = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot S_2'$$
, M (2)

где β_1 — коэффициент, учитывающий эффективную мощность угольного пласта; β_{3} — коэффициент, учитывающий содержание песчаника в породах междупластья; S_{1}' и S_{2}' — параметры, учитывающие размеры выработанного пространства и глубину отработки защитного пласта при подработке и надработке защищаемого пласта соответственно. Значения S_1' и S_2' принимают по данным Приложения N^0 8 «Схемы построения защищенных зон и зон повышенного горного давления», действующего нормативного документа [19]. Таким образом, при отработке защитного пласта очистными забоями с длиной 250 м и более защитное действие обеспечивается в пределах зоны, размеры которой могут составлять от 68 м до 220 м - в кровлю защитного пласта и от 27 м до 102 м в почву (рис. 1). Таким образом, дальность защитного действия определяется свойствами пород междупластья и глубиной ведения горных работ, уменьшаясь по мере роста прочности пород и глубины.

Нормативный документ [19] требует отрабатывать в свите в первую очередь неопасные по ДЯ защитные угольные пласты. Если все угольные пласты свиты являются угрожаемыми или опасными по динамическим явлениям (горные удары, внезапные выбросы угля и газа), разработка свиты начинается с менее опасного угольного пласта. Менее опасные по ДЯ угольные пласты свиты определяются в соответствии с Инструкцией по прогнозу ДЯ [20].

Нарушение принципов первоочередной защитной отработки защитных пластов, которое чаще всего вызвано желанием обеспечить высокопроизводительную работу шахты за счет первоочередной отработки более продуктивных и мощных пластов при работе таких

предприятий в режиме «шахта–лава», способно нанести серьезный экономический ущерб и существенно повысить опасность ведения подземных горных работ, что подтверждается опытом работы целого ряда угледобывающих шахт, как в России, так и за рубежом.

Особенности отработки свит газоносных угольных пластов

Отработка свит газоносных пластов. как правило, характеризуется наличием ограничений нагрузки на очистной забой по газовому фактору. Ограничения производительности «по газу» возникают даже на относительно небольших глубинах (300 – 400 м) при отработке пластов с газоносностью менее $10 \text{ м}^3/\text{т}$, что обусловлено повышением нагрузок на современные очистные забои, связанное с широким применение надежного энерговооруженного оборудования. Существующие ограничения не позволяют реализовать производственные возможности оборудования угольных шахт и снижают их конкурентоспособность, что особенно остро проявляется при отработке запасов энергетических углей с их низкой отпускной ценой.

С увеличением глубины ведения горных работ возрастает газоносность угольных пластов, что еще более ограничивает нагрузки на выемочные участки. Заблаговременная и предварительная дегазация разрабатываемого пласта и вмещающего углепородного массива, как правило, низко эффективна, причем затраты на такую дегазацию с глубиной растут, а эффективность их — снижается.

Снятие ограничений производительности выемочных участков по газовому фактору, по нашему мнению, возможно обеспечить путем опережающей отработки пластов (участков пластов) с удалением метана, поступающего в выработанное пространство из подрабаты-

ваемого и надрабатываемого массивов, что подтверждается опытом отработки пластов на больших глубинах в условиях Воркутского месторождения Печорского угольного бассейна.

Эффективность такого способа снижения газоносности массива подтверждается опытом работы шахт с рекордными нагрузками. Так, например, достигнутые рекордные нагрузки на лаву при отработке пласта 50 на шахте им. В.Д. Ялевского были обеспечены за счет снижения газоносности вмещающей толщи и снятия ограничений по газовому фактору благодаря первоочередной отработке 52 и дегазации углепородного массива в зонах влияния очистных работ (до 300 м в кровлю пласта 52 и до 50 м в почву). В условиях наличия ограничений при первоочередной отработке пласта 52 нагрузка на очистной забой не превышала 25 тыс. т в сутки, достигая 400-700 тыс. т/мес. В то же время последующее ведение очистных работ по пласту 50 - в зоне, дегазированной отработкой пласта 52, — характеризовалось нагрузками до 65 тыс. т в сутки с достижением месячной нагрузки 1,0-1,6 млн т/мес. Таким образом, первоочередная отработка пластов с удалением метана из выработанного пространства может быть рекомендована для частичного или полного снятия ограничений для высокоинтенсивной отработки свит газоносных пластов.

Особенности отработки сближенных угольных пластов

В соответствии с определением, данным в Горной энциклопедии [24], сближенные пласты — смежные в свите пласты, взаимоосложняющие разработку каждого из них. Сближенные пологие пласты разделяются на категории: неподрабатывающие, подрабатывающие. К сближенным подрабатывающим относят: пологие и наклонные пласты при мощности междупластий меньше 6 мощностей пласта, выемка которого может вызвать эффект подработки [24]. Подобные пласты отрабатывают последовательно или одновременно только в нисходящем порядке.

Представленные определения и параметры сближенных подрабатывающих пластов, по нашему мнению, не совсем корректно отражают суть взаимовлияния сближенных пластов в современных условиях. Во-первых, взаимоосложнение при отработке сближенных пластов наблюдается чрезвычайно редко, поскольку отработка первого из сближенных пластов ведется в условиях отсутствия какого-либо влияния. Во-вторых, эффект подработки проявляется при междупластьях, многократно превышающих указанную высоту (6 вынимаемых мощностей) зоны полных обрушений пород (рис. 2), что подтверждается действующими нормативными документами [18], определяющими дальность рас-

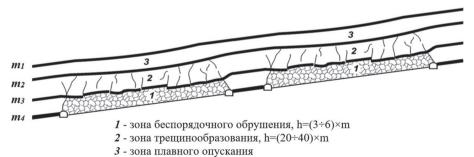


Рис. 2. Схема влияния опережающей отработки нижнего в свите пласта Fig. 2. Influence of advanced mining of the bottommost seam in a bed series

пространения зон повышенного горного давления и зон разгрузки.

В Горной энциклопедии [24] величина междупластья (6 мощностей пласта) приводится для горнотехнической ситуации, соответствующей отработке сближенных пластов без оставления межстолбовых угольных целиков, при которой наблюдается относительно равномерное оседание подработанного массива, так что применение в выработках рамной крепи в сочетании с мероприятиями по упрочнению дезинтегрированных пород в зоне интенсивной трещиноватости сделало бы выемку подработанного пласта технически возможной. Однако такой подход противоречит требованиям, предъявляемым к технологиям высокоинтенсивной отработки запасов, как в части отработки без целиков, так и в части применения рамной крепи на выемочных участках. Представленная на рис. 2 принципиальная схема отражает современные представления о формировании различных зон дезинтеграции пород над выработанным пространством отрабатываемых (отработанных) выемочных участков и позволяет отразить особенности оседания массива горных пород при отработке подрабатывающего пласта с оставлением неразрушаемых угольных целиков.

Следует отметить, что на современных шахтах, как правило, осуществляется первоочередная отработка более мощных и производительных пластов, что предопределяет увеличение зоны полных обрушений (несмотря на повышение коэффициента разрыхления обрушающихся пород) и увеличение влияния подработки и повышение неравномерности оседания подработанного массива. При этом зона полных обрушений не является границей влияния подработки, поскольку в зоне интенсивной трещиноватости ведение подготовительных и очистных работ затрудня-

ется снижением устойчивости пород, вследствие чего интенсивная отработка запасов с высокими технико-экономическими показателями практически невозможна. Дальность распространения зоны интенсивной трещиноватости определяется физико-механическими свойствами пород в зоне подработки и имеет различные значения даже в пределах одного выемочного участка.

Обсуждение результатов

Анализ российского и зарубежного опыта первоочередной отработки защитных пластов показывает чрезвычайную эффективность такого регионального способа управления состоянием массива горных пород [9–18, 22]. Уменьшение частоты применения этого способа в шахтах России в последние два десятилетия обусловлено закрытием в период реструктуризации большей части шахт, работавших в сложных горногеологических условиях (в том числе в условиях повышенной динамической опасности), и вводом в эксплуатацию в Кузнецком угольном бассейне целого ряда новых угледобывающих предприятий, осуществляющих угледобычу в благоприятных горно-геологических условиях на малых глубинах (до 400 м), где разрабатываемые пласты если и являются угрожаемыми по динамическим явлениям, то, как правило, не являются опасными, и динамических явлений при их отработке не зафиксировано. Именно работа в близких к идеальным условиях обеспечивает высокую эффективность применения технологической структуры «шахта-лава», а само ее широкое использование, по нашему мнению, обусловлено отсутствием у большинства предприятий достаточных инвестиций для приобретения второго комплекта дорогостоящего очистного оборудования перестройки всего шахтного комплекса для обеспечения интенсивной угледобычи. По мере повышения эффективности и инвестиционной привлекательности подземной угледобычи и появления денежных средств, необходимых для приобретения дополнительного комплекта высокопроизводительного очистного оборудования, а также при наличии возможности перестройки всех шахтных систем для повышения производственной мощности, все большее число шахт перестают работать в режиме «шахталава».

Выбор технологической структуры шахты, по нашему мнению, должен обеспечивать высокую экономическую эффективность и безопасность ведения горных работ, а также полноту извлечения полезного ископаемого, и осуществляться с учетом основных горно-геологических факторов, к числу которых следует отнести: опасность пластов по динамическим явлениям, мощность разрабатываемых пластов и мощность междупластья, газообильность выемочных участков. На рис. З представлена блоксхема алгоритма выбора технологической структуры шахты.

Разработка свит газоносных угольных пластов в условиях опасности по динамическим явлениям и возможной первоочередной отработки защитных пластов предопределяет необходимость применения иной технологической структуры с не менее чем двумя очистными забоями, что определено необходимостью работы по защищаемому пласту в условиях ограниченной продолжительности защитного действия (5 лет). Под сближенным залеганием в данном случае понимается возможность оказания защитного действия в зоне разгрузки на подрабатываемом (надрабатываемом) пласте в результате первоочередной отработки защитного пласта.

Ограничение нагрузки на очистные забои по газовому фактору является существенным ограничением производительности очистных забоев, ликвидация которого с использованием доступных технологий технически невозможна или экономически нецелесообразна. Снятие такого ограничения может быть обеспечено путем первоочередной отработки пласта (как правило, имеющего среди подрабатывающих наименьшую мощность) с целью эффективной дегазации подрабатываемого массива. Первоочередная отработка пласта в данном случае будет характеризоваться невысокими технико-экономическим показателями, а потому для реализации производственного потенциала шахты может быть рекомендовано или использование нескольких очистных забоев (не менее двух) или одновременная отработка двух пластов - с опережением работ по дегазирующему пласту.

В условиях отсутствия динамической опасности и ограничений нагрузки на очистной забой по газу необходимо ранжировать пласты по положению в свите и мощности. Вовлечение в первоочередную отработку более мощных и, как следствие, более продуктивных пластов может оказывать негативное воздействие на подрабатываемые пласты (особенно при традиционной схеме отработки с оставлением неразрушаемых межстолбовых целиков угля). Для исключения такого влияния может потребоваться первоочередная отработка менее продуктивных пластов, что при применении одного очистного забоя приведет к снижению производственной мощности шахты. Для исключения снижения производственной мощности возможно применение двух очистных забоев на менее продуктивном пласте или одновременная отработка двух сближенных пластов с обеспечением необходимого разнесения работ по сближенным пластам во времени и пространстве.

Отсутствие всех перечисленных ограничений и опасностей (ограничение

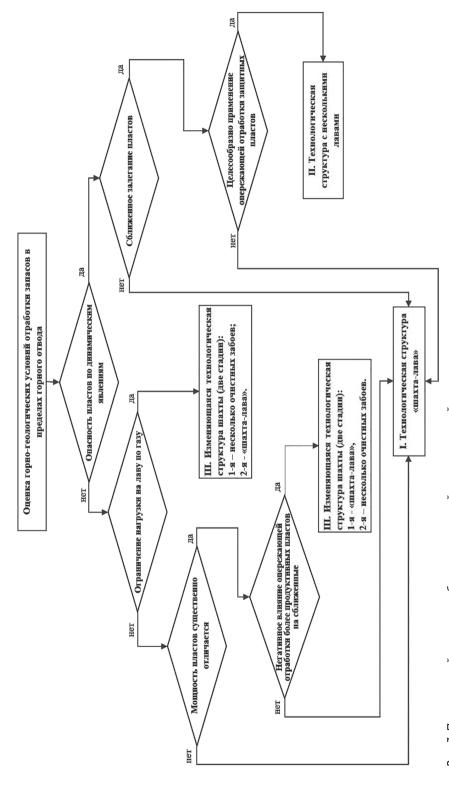


Рис. 3. Предлагаемый алгоритм выбора рациональной технологической структуры шахты

Fig. 3. Rational technological structure selection algorithm

нагрузки по газу, динамической опасности разработки пластов, негативное влияние подработки и т.д.) позволяет осуществлять первоочередную отработку более мошных и продуктивных пластов с использованием технологической структуры «шахта-лава. При отработке свит пластов наиболее полная реализация производственного потенциала шахты возможна при работе нескольких (не менее двух) очистных забоев, обеспечивающих поддержание производственной мощности на суммарно необходимом экономическом уровне. Как следствие, следует полагать необходимым смену технологической структуры шахты в течение срока ее эксплуатации от структуры «шахта-лава» к структуре с несколькими забоями.

Рассмотрим применение предлагаемого алгоритма (рис. 3) выбора технологической структуры шахты и эффекты от его использования на примере отработки свиты пологих пластов (рис. 4). На рис. 4 представлена схема свиты пластов, имеющих различную мощность. В условиях отсутствия динамической опасности ведения горных работ возможны различные варианты последовательности отработки пластов и технологических структур шахты, реализация которых приводит к различным технико-экономическим показателям работы добывающего предприятия. Для количественной оценки результатов реализации различных вариантов были приняты исходные данные, в том числе мощность разрабатываемых пластов, которые составили: $m_1 = 1,4$ м; $m_2 = 1,8$ м; $m_3 =$ = 4,0 м; $m_{_{A}}$ = 3,5 м. Принятая мощность пластов предопределила технически возможные нагрузки на очистной забой и производственную мощность шахты при различных вариантах ее технологической структуры.

В условиях отсутствия опасности динамических явлений последователь-

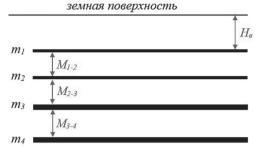


Рис. 4. Свита пологих (горизонтально залегающих) пластов, имеющих различную мощность Fig. 4. Series of gently dipping (horizontal) seams of different thickness

ная отрабоотка пластов (рис. 4) в нисходящем порядке при реализации технологической структуры «шахта-лава» работа угледобывающиего предприятия будет характеризоваться наибольшим сроком отработки запасов и существенными колебаниями производственной мощности (рис. 5, a). K достоинствам рассматриваемого варианта отработки пластов следует отнести: наиболее благоприятные условия ведения горных работ — постепенное увеличение глубины горных работ и газоносности пластов позволит осуществлять поэтапную адаптацию применяемых технологий к изменяющимся условиям, а нисходящий порядок будет способствовать поэтапной дегазации, обеспечивая более равномерную и существенно более низкую метанообильность выемочных участков, создавая условия для полного снятия ограничений по газовому фактору даже при работе лав с рекордными нагрузками. Однако такой вариант отработки запасов может быть признан экономически малопривлекательным с позиции реализации возможного потенциала угледобывающего предприятия и получения максимальной прибыли, поскольку предуматривает отнесение период работы шахты в режиме максимальной производительности (прибыли) на отдаленный период.

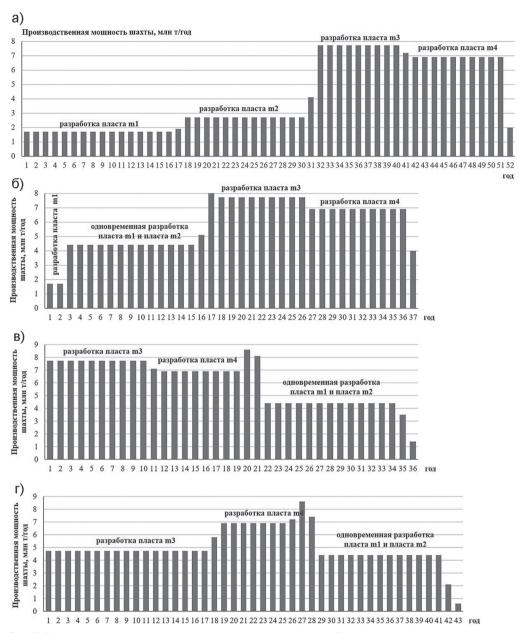


Рис. 5. Динамика изменения производственной мощности угледобывающего предприятия при различных вариантах порядка отработки пластов и технологической структуры шахты
Fig. 5. Dynamics of coal mine production capacity in different variants of mining sequence and technological structure of mine

Казалось бы, более эффективной будет являться первоочередная отработка более продуктивных пластов, позволяющая повысить интенсивность и обеспечить экономическую эффективность разработки запасов. Однако после отработки мощных пластов сохранение технологической структуры «шахта-лава» нецелесообразно, поскольку приведет к резкому снижению производственной мощности шахты при последующей отработке пластов средней мощности. Для исключения таких неизбежных последствий после отработки запасов мощных пластов следует обеспечить поэтапный (с отставанием в пространстве и во времени) переход на многозабойную структуру для наиболее полной реализации производственного потенциала шахты.

Первоочередная отработка более продуктивных пластов будет неизбежно сопряжена со снижением производительности лавы по первому разрабатываемому пласту при разработке газоносных угольных пластов, что приведет к существенному увеличению сроков его отработки (и, соответственно, увеличит срок службы шахты) и падению производственной мощности предприятия (рис. 5, в) и снижению экономических его показателей.

Для снятия ограничений нагрузки на очистной забой может быть рекомендовано применение технологической структуры с несколькими забоями с первоочередной отработкой менее продуктивных пластов m_1 и m_2 (рис. 5, ϵ), что позволит создать благоприятные условия для последующей отработки более продуктивных пластов m_3 и m_4 для реализации производственного потенциала шахты.

С учетом идеализированности рассмотренного примера и предлагаемых решений их рассмотрение является необходимым условием понимания предлагаемых принципов выбора и обоснования рациональной технологической структуры шахты. Решение задачи выбора рациональной структуры шахты для реальных условий должно учитывать изменение газоносности при отработке каждого пласта (в том числе с учетом порядка отработки выемочных участков в пределах пласта), что потребует учета возможности частичной отработки запасов продуктивных пластов в наиболее благоприятных условиях с последующим изменением технологической структуры предприятия для снятия ограничений по газовому фактору и/или обеспечения высокой производственной мощности при разработке менее продуктивных пластов.

Заключение

В результате выполненных исследований сформулированы рекомендации по выбору рациональной технологической структуры шахты, применение которой позволяет создать условия для реализации экономически эффективного и безопасного рационального недропользования при подземной разработке свит пологих угольных пластов длинными очистными забоями.

- 1. При разработке свит мощных пологих не опасных по динамическим явлениям пластов, отработка каждого из которых не оказывает значительного влияния на условия и эффективность последующей отработки других пластов в условиях отсутствия ограничений нагрузки на очистной забой по газу, наиболее высокой экономической эффективностью характеризуется применение технологической структуры «шахта-лава». Высокопроизводительная отработка мощных пластов обеспечивает минимальные изменения производственной мощности шахты и наиболее полную реализацию ее производственного потенциала в течение всего срока ее эксплуатации.
- 2. При отработке свит пологих, не сближенных, не опасных по динамическим явлениям пластов, имеющих существенно отличающуюся мощность, для наиболее полной реализации производственного потенциала может потребоваться изменение технологической структуры шахты переход от технологической структуры «шахта—лава», реализуемой в период отработки наи-

более продуктивных мощных пластов, к использованию двух или более очистных забоев после перехода к отработке пластов средней мощности или тонких с целью поддержания производственной мощности предприятия.

- 3. Отработка свит пологих сближенных, не опасных по динамическим явлениям угольных пластов, мощность которых существенно различается, потребует обоснования возможности применения технологической структуры «шахта-лава», что будет вызвано существенным изменением технико-экономических показателей шахты при нисходящем порядке отработки пластов с различной мощностью при работе одного очистного забоя и необходимостью недопущения существенного ухудшения условий отработки отдельных пластов из-за подработки при первоочередной отработке наиболее продуктивных мощных угольных пластов.
- 4. В условиях невозможности первоочередной отработки более продуктивных пластов для обеспечения устойчивого уровня производственной мощности рекомендуется применение двух очистных забоев: один на более продуктивном, а другой — на менее продуктивном пласте.
- 5. При возможности первоочередной отработки более продуктивных пластов без снижения технологичности балансовых запасов менее продуктивных пластов рекомендуется двухстадийная отработка запасов: 1-я стадия работа шахты в режиме «шахта-лава» при отработке более продуктивного пласта; 2-я стадия многозабойная (не менее двух лав) отработка менее продуктивных пластов.
- 6. Отработку свит пологих сближенных угольных пластов, опасных по динамическим явлениям, следует вести с применением опережающей выемки защитных пластов, что с учетом ограни-

- ченного действия защитной выемки предопределяет необходимость применения технологической структуры, предусматривающей работу не менее двух лав: одна лава обеспечивает опережающую отработку менее опасного по ДЯ защитного пласта, а вторая обеспечивает отработку запасов в защищенной зоне более опасного по ДЯ пласта в течение периода защитного действия.
- 7. Эффективная интенсивная разработка свит газоносных угольных пластов в условиях существенных ограничений нагрузки на лаву может быть обеспечена за счет заблаговременной дегазации углепородного массива, реализуемой путем первоочередной отработки защитного пласта с эффективной дегазацией выработанного пространства. С учетом ограничения производительности лавы, работающей по защитному пласту, к первоочередной отработке рекомендуется менее продуктивный пласт, а для обеспечения производственной мощности рекомендуется использование второго очистного забоя, работающего на более продуктивном дегазированном пласте.
- 8. Условия действующих угледобывающих предприятий России позволяют эффективно и безопасно применять технологическую структуру «шахта-лава» не более чем в 50% всех действующих шахт, поскольку из 57 действующих в России шахт (по состоянию на 01.01.2019 г.): 56% разрабатывают пласты, опасные по горным ударам, 69% ведут работы на глубинах более 300 м (44% — 300-500 м и 25% — более 500 м), а для основного угледобываюшего бассейна – Кузбасса – характерно залегание сближенных пластов в свитах. Другие технологические структуры (с несколькими очистными забоями или комбинированные) могут быть обоснованы с применением разработанных рекомендаций и предложенного алгоритма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Абрамов В. А., Агафонов В. В. Необходимость учета вскрытия «мини-шахты» в системе технологических структур «шахта-лава» при оптимизации схем вскрытия шахтных полей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 10. С. 5 8.
- 2. Постников В. И., Ткач В. Р., Агафонова А. Б., Митрошин Е. Н. Экономико-математическая модель оптимизации основных параметров технологических структур «шахта-лава» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 10. С. 233 238.
- 3. Калинин С. И., Роут Г. Н., Игнатов Ю. Н., Черданцев А. М. Обоснование суточной добычи угля из лавы длинной 400 м в условиях шахты «им.В.Д.Ялевского» // Вестник Кузбасского государственного политехнического университета. 2018. № 5. С. 27 34.
- 4. *Казанин О. И.* О проектировании подземной отработки свит пологих газоносных угольных пластов // Записки горного института. 2015. Т. 215. С. 38 45.
- 5. *Казанин О. И.*, *Дребенштедт К.* Горное образование в XXI веке: глобальные вызовы и перспективы // Записки Горного института. 2017. Т. 225. С. 369—375. DOI: 10.18454/PMI.2017.3.369.
- 6. *Писаренко М. В.* Оптимизация основных параметров шахт типа «шахта-лава» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 1. С. 48 51.
- 7. *Ефимов В. И.*, *Маликов А. А.*, *Рябов Г. Г.* Организационно-техно логические принципы использования высокопроизводительной технологии добычи угля на шахтах Ерунаковской угольной компании // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2014. № 3. С. 90–93.
- 8. *Твердов А. А., Жура А. В., Никишичев С. Б.* В забое без простоя. Эффективность использования дополнительного комплекта оборудования на угольных шахтах // Сибирский уголь. -2011. № 2. С. 22-25.
- 9. McArdle B. An assessment of multiple seam mine stress conditions using a numerical modelling approach. The university of Queensland, Australia, submitted PhD thesis for examination. 2016.
- 10. Suchowerska A. M. Geomechanics of single seam and multi-seam longwall coal mining. University of Newcastle, submitted PhD thesis for examination. 2014.
- 11. Wang X., Bai J., Li W., Chen B., Dao V. D. Evaluating the coal bump potential for gateroad design in multiple-seam longwall mining // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2015, vol. 115, pp. 755 760.
- 12. Yuan L. Control of coal and gas outbursts in Huainan mines in China. A review // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2016, vol. 8, no. 4, pp. 559 567.
- 13. Li Z. Defining outburst-free zones of a protected coal seam in multiple seam mining with seam gas content method, Master of Philosophy thesis, School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong. 2016.
- 14. Yao B., Ma Q., Wei J., Ma J., Cai D. Effect of protective coal seam mining and gas extraction on gas transport in a coal seam // International Journal of Mining Science and Technology. 2016, vol. 26, no. 4, pp. 637 643.
- 15. Kazanin O., Sidorenko A., Koteleva N., Belova D. An assessment of the impact of long-wall panel width on the height of complete groundwater drainage in underground thick coal seam mining // Test Engineering and Management. 2020, vol. 83, no. 5–6, pp. 5568 5572.
- 16. Gao R., Yu B., Xia H., Duan H. Reduction of stress acting on a thick, deep coal seam by protective-seam mining // Energies. 2017, vol. 10, no. 8. Article 1209. DOI: 10.3390/en10081209.
- 17. *Ilyushin Y. V.*, *Pervukhin D. A.*, *Afanaseva O. V.* Application of the theory of systems with distributed parameters for mineral complex facilities management // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019, vol. 14, no. 22, pp. 3852 3864.
- 18. *Golubev D. D.* Development of the technological schemes of the extraction of coal seams for modern mines / Topical Issues of Rational Use of Natural Resources. Proceedings of the International Forum-Contest of Young Researchers 2018. 2019, pp. 55 60.

- 19. *Руководство* по безопасности «Рекомендации по безопасному ведению горных работ на склонных к динамическим явлениям угольных пластах». Серия 05. Выпуск 53. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2017. 176 с.
- 20. Приказ Ростехнадзора от 15 августа 2016 г. № 339 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений».
- 21. Инструкция по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах. М.: Ростехнадзор, 2013. 147 с.
- 22. Указания по управлению горным давлением в очистных забоях под (над) целиками и краевыми частями при разработке свиты угольных пластов мощностью до 3,5 м с углом падения до 35°. Л., 1984. 62 с.
- 23. *Перспективные* схемы использования защитных пластов на шахтах Кузнецкого, Карагандинского и Печорского бассейнов. Л., 1983. 168 с.
- 24. *Горная* энциклопедия. Т. 4. Ортин Социосфера. М.: Советская энциклопедия. 1989. 623 с. **ш**аз

REFERENCES

- 1. Abramov V. A., Agafonov V. V. The need to take into account the opening of a «mini-mine» in the system of technological structures «mine-longwall» when optimizing the opening schemes of mine fields. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2012, no. 10, pp. 5 8. [In Russ].
- 2. Postnikov V. I., Tkach V. R., Agafonova A. B., Mitroshin E. N. Economic and mathematical model of optimization of the main parameters of technological structures «mine-longwall». *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2014, no. 10, pp. 233 238. [In Russ].
- 3. Kalinin S. I., Rout G. N., Ignatov Yu. N., Cherdantsev A. M. Justification of daily coal mining from longwall 400 m long in the conditions of the mine «named after V.D. Yalevsky». *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2018, no. 5, pp. 27 34. [In Russ].
- 4. Kazanin O. I. On the design of underground mining of gentle gas-bearing multiple coal seam. *Journal of Mining Institute*. 2015, vol. 215, pp. 38 45. [In Russ].
- 5. Kazanin O. I., Drebenshtedt K. Mining education in the 21st century: global challenges and prospects. *Journal of Mining Institute*. 2017, vol. 225, pp. 369 375. [In Russ]. DOI: 10.18454/PMI.2017.3.369.
- 6. Pisarenko M. V. Optimization of the main parameters of «mine-longwall» mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2011, no. 1, pp. 48-51. [In Russ].
- 7. Efimov V. I., Malikov A. A., Ryabov G. G. Organizational and technological principles of using high-performance technology of coal mining at the mines of the Erunakovsky coal company. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta*. *Nauki o zemle*. 2014, no. 3, pp. 90–93. [In Russ].
- 8. Tverdov A. A., Zhura A. V., Nikishichev S. B. Downhole without downtime. The efficiency of using an additional set of equipment in coal mines. *Sibirskiy ugol'*. 2011, no. 2, pp. 22 25. [In Russ].
- 9. McArdle B. An assessment of multiple seam mine stress conditions using a numerical modelling approach. The university of Queensland, Australia, submitted PhD thesis for examination. 2016.
- 10. Suchowerska A. M. *Geomechanics of single seam and multi-seam longwall coal mining.* University of Newcastle, submitted PhD thesis for examination. 2014.
- 11. Wang X., Bai J., Li W., Chen B., Dao V. D. Evaluating the coal bump potential for gateroad design in multiple-seam longwall mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2015, vol. 115, pp. 755–760.
- 12. Yuan L. Control of coal and gas outbursts in Huainan mines in China. A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2016, vol. 8, no. 4, pp. 559 567.

- 13. Li Z. Defining outburst-free zones of a protected coal seam in multiple seam mining with seam gas content method, Master of Philosophy thesis, School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong. 2016.
- 14. Yao B., Ma Q., Wei J., Ma J., Cai D. Effect of protective coal seam mining and gas extraction on gas transport in a coal seam. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2016, vol. 26, no. 4, pp. 637 643.
- 15. Kazanin O., Sidorenko A., Koteleva N., Belova D. An assessment of the impact of long-wall panel width on the height of complete groundwater drainage in underground thick coal seam mining. *Test Engineering and Management*. 2020, vol. 83, no. 5–6, pp. 5568 5572.
- 16. Gao R., Yu B., Xia H., Duan H. Reduction of stress acting on a thick, deep coal seam by protective-seam mining. *Energies*. 2017, vol. 10, no. 8. Article 1209. DOI: 10.3390/en10081209.
- 17. Ilyushin Y. V., Pervukhin D. A., Afanaseva O. V. Application of the theory of systems with distributed parameters for mineral complex facilities management. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019, vol. 14, no. 22, pp. 3852 3864.
- 18. Golubev D. D. Development of the technological schemes of the extraction of coal seams for modern mines. *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources. Proceedings of the International Forum-Contest of Young Researchers* 2018. 2019, pp. 55 60.
- 19. Rekomendatsii po bezopasnomu vedeniyu gornykh rabot na sklonnykh k dinamicheskim yavleniyam ugol'nykh plastakh Rukovodstvo po bezopasnosti [Recommendations for safe mining in dynamically prone coal seams. Safety Guide]. Series 05. Issue 53. Moscow, ZAO NTTS PB, 2017, 176 p. [In Russ].
- 20. Ob utverzhdenii federal'nykh norm i pravil v oblasti promyshlennoy bezopasnosti «Instruktsiya po prognozu dinamicheskikh yavleniy i monitoringu massiva gornykh porod pri otrabotke ugol'nykh mestorozhdeniy». Prikaz Rostekhnadzora ot 15 avgusta 2016 g, no. 339 [About the approval of federal norms and rules in the field of industrial safety «Instructions for the forecast of dynamic phenomena and monitoring of rock mass during the development of coal deposits». Order of Rostekhnadzor of August 15, 2016, no. 339]. [In Russ].
- 21. Instruktsiya po raschetu i primeneniyu ankernoi krepi na ugol'nykh shakhtakh [Instructions for the calculation and use of roof bolting in coal mines], Moscow, Rostekhnadzor, 2013, 147 p. [In Russ].
- 22. Ukazaniya po upravleniyu gornym davleniem v ochistnykh zaboyakh pod (nad) tselikami i kraevymi chastyami pri razrabotke svity ugol'nykh plastov moshchnost'yu do 3,5 m s uglom padeniya do 35° [Guidelines for managing rock pressure in working faces under (above) pillars and edge parts when mining of multiple seam with a thickness of up to 3.5 m with a dip angle of up to 35°], Lenigrad, 1984, 62 p. [In Russ].
- 23. Perspektivnye skhemy ispol'zovaniya zashchitnykh plastov na shakhtakh Kuznetskogo, karagandinskogo i Pechorskogo basseinov [Prospective schemes for the use of protective layers in the mines of the Kuznetsk, Karaganda and Pechora basins], Leningrad, 1983, 168 p. [In Russ].
- 24. Gornaya entsiklopediya [Mining encyclopedia], vol. 4. Ortin Sotsiosfera. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya, 1989, 623 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сидоренко Андрей Александрович 1 — канд. техн. наук, доцент, e-mail: sidorenkoaa@mail.ru,

Дмитриев Павел Николаевич¹ — канд. техн. наук, доцент,

e-mail: pdmitriev@spmi.ru,

Ярошенко Валерий Валерьевич¹ — канд. техн. наук, ассистент, e-mail: yaroshenko vv@pers.spmi.ru,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: Сидоренко A.A., e-mail: sidorenkoaa@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.A. Sidorenko¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: sidorenkoaa@mail.ru,

P.N. Dmitriyev¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: pdmitriev@spmi.ru,

V.V. Yaroshenko¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant,

e-mail: yaroshenko_vv@pers.spmi.ru,

Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: A.A. Sidorenko, e-mail: sidorenkoaa@mail.ru.

Получена редакцией 11.10.2020; получена после рецензии 13.11.2021; принята к печати 10.07.2021. Received by the editors 11.10.2020; received after the review 13.11.2021; accepted for printing 10.07.2021.



РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРЕДПРИЯТИЯ УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

(№ 1246/08-21 от 24.05.2021; 8 с.)

*Миллер Андрей Игорьевич*¹ — аспирант, *Ляхомский Александр Валентинович*¹ — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой, ¹ ГИ НИТУ «МИСиС».

Представлено исследование процесса электропотребления в условиях шахты «Северная» АО «Ургалуголь». Проведен энерготехнологический анализ электропотребления добычных работ. По экспериментальным данным о суточных объемах добычи угля, расходе электроэнергии и удельном электропотреблении определены статистические характеристики и распределения вероятностей указанных параметров. Установлены сменные энерготехнологические профили в виде корреляционных зависимостей удельного электропотребления от объемов работ. Выполнена проверка статистической значимости полученных статистических характеристик и произведена оценка качества установленных энерготехнологических профилей.

Ключевые слова: энергоэффективность, электропотребление, статистические характеристики, добычные работы, энерготехнологический профили, коэффициент корреляции, коэффициент детерминации.

ENERGY TECHNOLOGY ANALYSIS OF COAL INDUSTRY ENTERPRISES

A.I. Miller¹, Graduate Student,

A.V. Lyakhomskiy¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Chair,

¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,

119049. Moscow. Russia. e-mail: ud@msmu.ru.

The article presents a study of the process of power consumption in the conditions of the Severnaya mine of JSC «Urgalugol». The energy-technological analysis of the power consumption of mining operations is carried out. The statistical characteristics and probability distributions of these parameters are determined based on experimental data on daily coal production, electricity consumption, and specific power consumption. Replaceable energy-technological profiles in the form of correlation dependences of specific power consumption on the volume of work are established. The statistical significance of the obtained statistical characteristics was checked and the quality of the established energy technology profiles was evaluated.

Key words: energy efficiency, power consumption, statistical characteristics, mining operations, energy technology profiles, correlation coefficient, determination coefficient.