

Научная статья

УДК 622 + 004.02 : [62-50 : 550.835.41]
DOI: 10.26730/1816-4528-2024-5-70-77

Баловнев Евгений Александрович*

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН

*E-mail: balovnev.evgeny.a@gmail.com

СИСТЕМНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ГОРНОЙ МАССЫ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ВЫПУСКА УГЛЯ ПОДКРОВЕЛЬНОЙ ТОЛЩИ



Информация о статье

Поступила:

31 октября 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 ноября 2024 г.

Принята к печати:

22 ноября 2024 г.

Опубликована:

11 декабря 2024 г.

Ключевые слова:

горная масса; управляемый выпуск; технологический процесс; выпуск на забойный конвейер; механизированная крепь; секция крепи; параметры выпускаемой горной массы; гамма-метод; моделирование; IDEF0

Аннотация.

Технология управляемого выпуска угля подкровельной толщи из мощных пластов обеспечивает площадный, либо волновой режим его реализации из нескольких рядом стоящих секций крепи, что делает её наиболее перспективной с точки зрения обеспечения полноты извлечения полезного ископаемого. Применение механизированных очистных комплексов, реализующих выпуск позволяет значительно сократить время отработки мощных пластов и, как следствие, снизить вероятность их самовозгорания. Работа посвящена проведению системного анализа части технологического процесса выпуска, связанного с прохождением горной массы через выпускное окно секции и её перемещением перед погрузкой на конвейер. Объектами исследования являлись технологическая операция выпуска угля подкровельной толщи в технологический выпуск на забойный конвейер, а также процесс определения качественного состава горной массы для своевременного отсеивания пустой породы в потоке горной массы. В работе представлены результаты применения методологии функционального графического моделирования для каждого объекта исследования. Использован метод системно-функционального моделирования, позволяющий структурировать, систематизировать и определять требования и функции при анализе, в том числе, технологических процессов. Проведение анализа обусловлено необходимостью автоматизированного контроля параметров горной массы, обеспечивающего возможность управления технологическим процессом и качеством добываемого полезного ископаемого для снижения степени разубоживания выпускаемой горной массы на конвейер. Выявлены механизмы в нотации системно-функционального моделирования, благодаря которым возможно создавать различные сценарии прохождения горной массы через выпускное окно для определения зависимостей влияния конструктивных элементов секции крепи и скорости движения потока горной массы на глубину чувствительности применяемого гамма-метода. Также определена роль автоматизированной системы определения границы уголь-порода в технологическом процессе добычи, ее взаимосвязь и влияние на другие процессы выпуска.

Для цитирования: Баловнев Е.А. Системно-функциональное моделирование непрерывного контроля параметров горной массы в технологическом процессе выпуска угля подкровельной толщи // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 5 (175). С. 70-77. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-5-70-77, EDN: RCMWUL

Введение

В связи с исчерпанием легкодоступных пластовых месторождений повышается актуальность отработки мощных пластов с использованием перспективных технологий с выпуском угля подкровельной и межслоевой толщи. Данные технологии повышают уровень безопасности проведения гор-

ных работ, при этом снижая количество рабочих в забое. Кроме того, технологии отработки с выпуском угля подкровельной толщи направлены на обеспечение полноты его выемки и снижение потерь полезного ископаемого. Известны комплексы с выпуском угля подкровельной толщи для отработки мощных пластов, в которых горная масса

(ГМ) добывается отдельно на завальный (задний) или забойный (передний) конвейеры. Данные комплексы позволяют значительно сократить время отработки мощных пластов, и, как следствие, снизить вероятность самовозгорания пластов [1, 2]. Технология выпуска угля подкровельной и межслоевой толщи экономически выгодна, поскольку комбайн срезает только нижнюю часть пласта, а верхние части угля разрушаются под действием силы тяжести [3, 4].

Широко используется технология отработки на завальный конвейер, однако ее основными недостатками, перед добычей на забойный конвейер, являются сложность обеспечения управляемого выпуска из нескольких рядом стоящих секций крепи, следовательно, невозможность обеспечения площадного либо волнового выпуска, которые являются наиболее перспективными с точки зрения обеспечения его полноты [5-7]. В ФИЦ УУХ СО РАН разрабатывается крепь с управляемым выпуском на забойный конвейер, а также система управления элементами секции [8-10]. Данная система позволит в автоматическом режиме регистрировать изменение качественного состава ГМ, благодаря чему появится возможность своевременно управлять выпуском для обеспечения его полноты, а также снижение степени разубоживания выпущенной горной массы.

Существующие варианты управления выпуском основываются либо на опыте горнорабочего по акустическим параметрам движущейся контактирующей ГМ с ограждением секции, либо на расчётном параметре временного интервала выпуска [11]. Однако, данные варианты не позволяют снизить время присутствия человека в забое, а также не обеспечивают полноту извлечения пласта, по причине чего могут возникать эндогенные пожары. Ожидаемым результатом работы системы является

автоматизация процесса выпуска на основе обратной связи в виде параметров выпускаемой ГМ и генерации управляющих воздействий в виде закрытия и открытия заслонки в выпускном окне, в зависимости от того, что проходит через него: уголь или пустая порода. Ранее по результатам анализа свойств выпускаемой ГМ была обоснована перспективность применения гамма-метода для обеспечения работы системы управления шиберной заслонкой и своевременного отсечения пустой породы [12].

Однако интеграция средств контроля естественной радиоактивности потребовала проведения системного анализа части технологического процесса выпуска, связанного с прохождением ГМ через выпускное окно секции и её погрузкой на конвейер. Для решения задачи использован метод системно-функционального моделирования IDEF0, поскольку он позволяет структурировать, систематизировать и определять требования и функции при анализе, в том числе, технологических процессов [13].

В методологии функционального графического моделирования IDEF0 информация, необходимая для получения результата, является входным параметром и расположена слева от функционального элемента. Условия, оказывающие влияние на выполнение элемента, представляют собой управляющее воздействие и находятся сверху. Различные ресурсы для достижения результата обозначаются механизмами и расположены снизу. Результат выполнения функционального элемента будет являться выходным параметром, а его расположение находится справа от элемента.

Обобщенная схема процесса выпуска угля подкровельной толщи показана на рисунке 1.

Для всех функциональных элементов представленной схемы «Горнорабочий» выступает в роли механизма, а «Горно-шахтные условия» – управ-

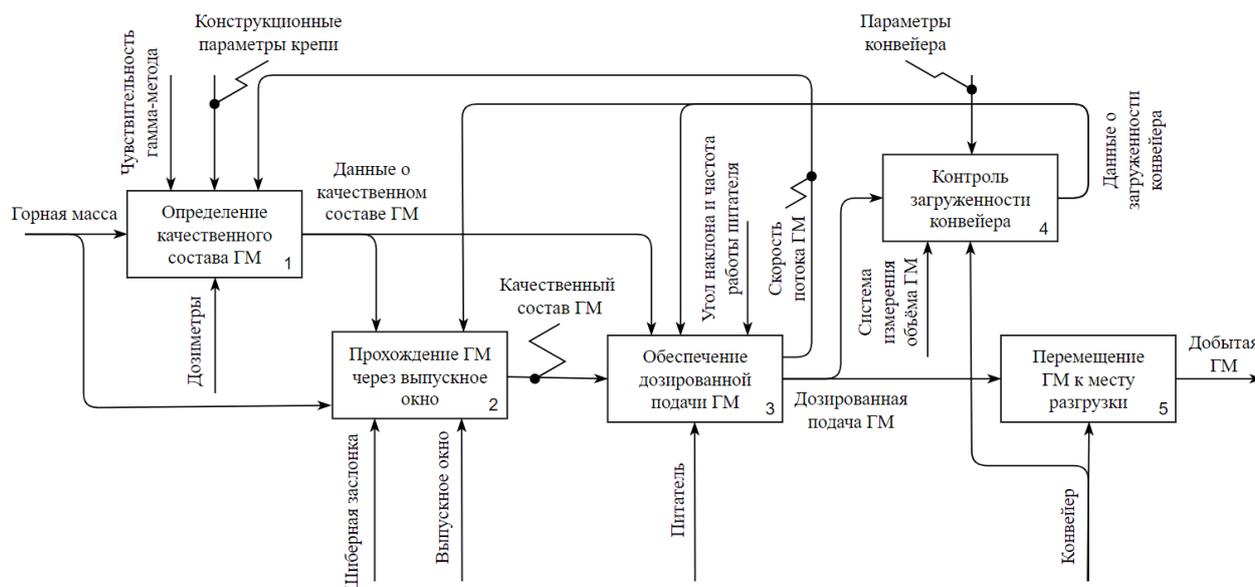


Рис. 1. Процесс выпуска угля подкровельной толщи по стандарту системно-функционального моделирования IDEF0

Fig. 1. The process of releasing coal under the roof layer according to the standard of system-functional modeling IDEF0

ляющего воздействия. Для упрощения восприятия они не отображены на схеме.

Первым функциональным элементом является процесс «Определение качественного состава ГМ». Входной параметр данного элемента – «Горная масса». «Дозиметры» являются механизмами, а «Чувствительность гамма-метода» и «Конструкционные параметры крепи» представляют управляющие воздействия. Выходной параметр этого элемента – «Данные о качественном составе ГМ». На данном этапе определяется, что именно проходит через выпускное окно: уголь или пустая порода. При обнаружении изменения в составе ГМ имеется возможность автоматически приостановить выпуск путём закрытия шиберной заслонки, что даст возможность регистрации более точных данных о качественном составе ГМ.

«Прохождение ГМ через выпускное окно» является вторым функциональным элементом схемы процесса выпуска угля подкровельной толщи. Так же, как и у первого элемента, входным параметром обозначена «Горная масса». Исполнительными механизмами служат «Шиберная заслонка» и «Выпускное окно», в то время как управляющим воздействием является выходной параметр первого элемента. «Качественный состав ГМ» – выходной параметр второго элемента. Таким образом, управление шиберной заслонкой позволяет контролировать поток поступающей ГМ посредством открытия, частичного или полного закрытия окна в процессе выпуска. Критерии для замедления или остановки выпуска определяются в зависимости от текущих данных о составе ГМ и загруженности конвейера. К примеру, точность данных о естественной радиоактивности значительно зависит от времени анализа ГМ [14], таким образом, частично перекрывая вы-

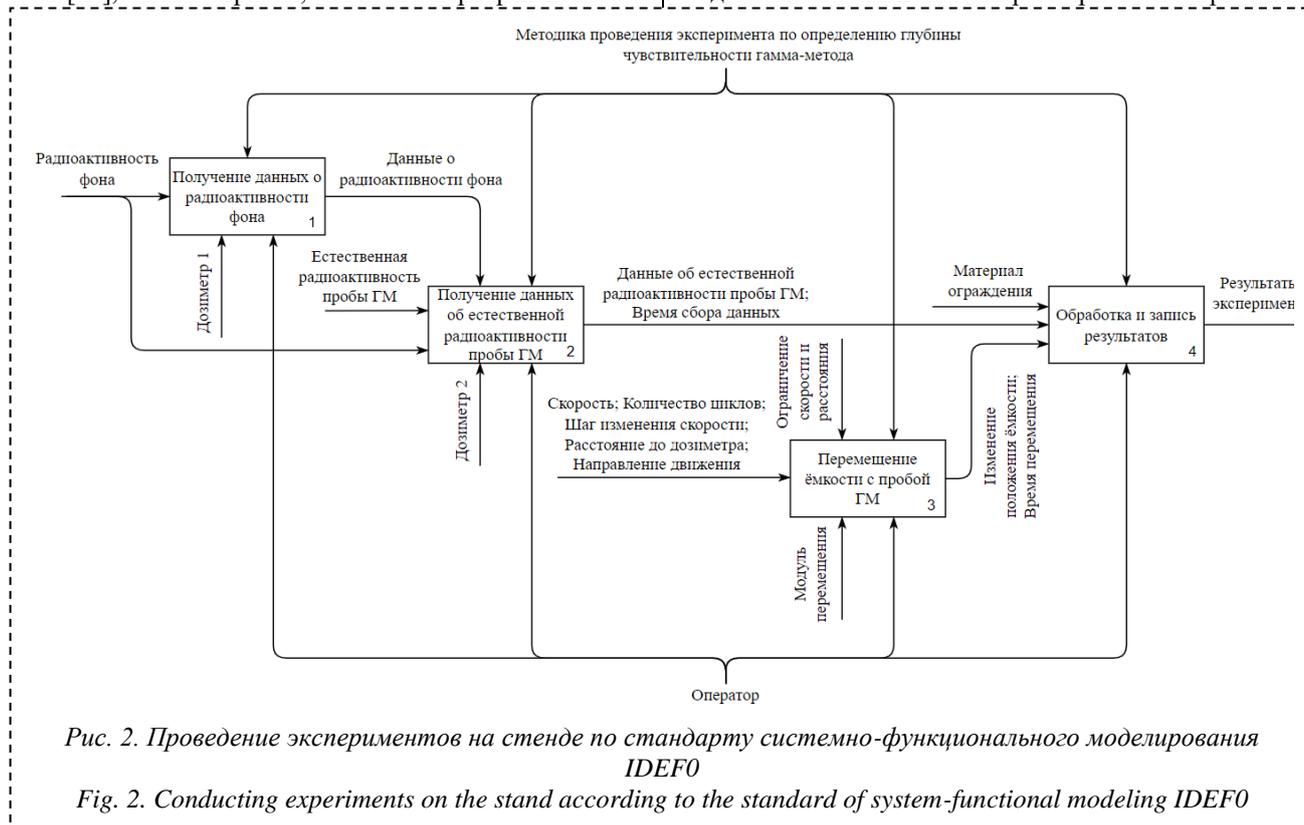
пускное окно можно добиться замедления процесса выпуска и повышения точности определения состава ГМ.

Первые два функциональных элемента выполняются параллельно, так как качество проходимой ГМ определяется непосредственно перед попаданием и во время её прохождения через выпускное окно.

Третий функциональный элемент, выполняющийся последовательно после первых двух, обозначен как «Обеспечение дозированной подачи ГМ». Механизмом элемента является «Питатель». Наряду с «Углом наклона и частотой работы питателя» управляющим воздействием является выходной параметр первого элемента. Данный элемент имеет два выходных параметра: «Дозированная подача ГМ» и «Скорость потока ГМ». Второй параметр является управляющим воздействием для первого функционального элемента. Как и в случае с шиберной заслонкой, питатель имеет возможность управления скоростью потока ГМ, проходящей через выпускное окно. Таким образом, изменяя частоту работы питателя, также можно замедлить или ускорить процесс выпуска ГМ.

Затем, таким же образом, как и первые два элемента, параллельно выполняются четвертый и пятый. Обуславливается это тем, что мониторинг загруженности конвейера осуществляется во время транспортирования ГМ по питателю к конвейеру.

«Контроль загруженности конвейера» – четвертый функциональный элемент, входной параметр которого «Дозированная подача ГМ» является выходным параметром третьего элемента схемы. Механизмами этого элемента служат «Система измерения объёма» и «Конвейер». Управляющими воздействиями являются «Параметры конвейера». Вы-



ходной параметр данного элемента, а именно «Данные о загруженности конвейера», является управляющим воздействием для второго и третьего функционального элемента. На данном этапе происходит измерение объёма ГМ, переданной питателем. Этот объём сопоставляется с техническими возможностями конвейера и определяется рациональный режим работы выпуска [15-17].

Последний пятый функциональный элемент – «Перемещение ГМ к месту разгрузки». Как и у четвертого элемента, входной параметр является выходным параметром третьего элемента. «Конвейер» является механизмом, «Добытая ГМ» – выходным параметром этого элемента. Данный этап финальный в процессе управления выпуском, на нём происходит перемещение ГМ на поверхность.

Однако проблема отсутствия достаточных данных о глубине чувствительности гамма-метода в исследуемых условиях и необходимость их лабораторного уточнения для всех режимов работы питателя обосновывают необходимость воспроизведения процесса выпуска в контролируемых условиях. Таким образом, моделирование части технологического процесса выпуска в виде прохождения ГМ через чувствительную зону дозиметра в лабораторных условиях позволит уточнить значение глубины чувствительности метода (на основе используемого дозиметра), получить зависимости влияния защитного элемента конструкции на получаемые данные, а также исследовать влияние скорости движения ГМ на получаемый результат для точного моделирования режимов и отладки работы системы автоматизированного управления [12]. При этом, для воспроизведения в лабораторных условиях, процесс прохождения ГМ через чувствительную зону дозиметра с управлением и контролем основных параметров может быть аналогично описан по стандарту системно-функционального моделирования IDEF0.

Ожидаемый процесс проведения экспериментов на стенде представлен в виде четырёх функциональных элементов, каждый из которых имеет свои входные и выходные параметры, управляющие воздействием, а также механизмы (рисунок 2).

Для всех функциональных элементов «Оператор» является механизмом, а «Методика проведения эксперимента по определению глубины чувствительности гамма-метода» – управляющим воздействием. В данной схеме три функциональных элемента выполняются параллельно. Четвёртый элемент выполняется последовательно после первых трёх. Параллельность выполнения первого и второго элементов обуславливается тем, что для получения корректных данных об естественной радиоактивности исследуемой пробы ГМ нужно учитывать радиоактивность фона для последующего её вычитания из общей измеренной радиоактивности. В качестве исследуемого материала будет выступать ГМ, в состав которой будет входить уголь и пустая порода в различном соотношении. В процессе эксперимента будет определяться наличие пустой породы в угле, а также её процентное содержание. В свою очередь, параллельность второго

и третьего функциональных элементов объясняется тем, что при проведении эксперимента ёмкость с пробами ГМ должна перемещаться вдоль дозиметра непосредственно во время сбора.

«Получение данных о радиоактивности фона» является первым функциональным элементом. Его входным параметром выступает «Радиоактивность фона». Первый «Дозиметр 1» помимо «Оператора» так же представлен в виде механизма описываемого элемента. Выходной параметр представляет собой «Данные о радиоактивности фона». Существуют различные источники радиоактивности фона. Например, космические лучи, фон от окружающих предметов и строительных конструкций. Кроме того, на показатели данных об естественной радиоактивности пробы ГМ могут влиять электрические помехи, возникающие в измерительной системе [18]. Предполагается, что один из дозиметров будет выявлять именно эти помехи.

Второй функциональный элемент – «Получение данных об естественной радиоактивности пробы ГМ». Данный элемент имеет несколько входных параметров, а именно «Естественная радиоактивность пробы ГМ» и «Радиоактивность фона». В дополнение к методике управляющим воздействием будет служить выходной параметр первого элемента. Механизм элемента также включает в себя второй «Дозиметр 2». Выходные параметры второго функционального элемента представляют собой «Данные об естественной радиоактивности пробы ГМ» и «Время сбора данных».

Последним из параллельно работающих функциональных элементов является «Перемещение ёмкости с пробой ГМ». Его входные параметры обозначены как «Скорость», «Количество циклов», «Шаг изменения скорости», «Расстояние до дозиметра» и «Направление движения». Управляющие воздействия и механизмы в данном случае – «Ограничение скорости и расстояния» и «Модуль перемещения» соответственно. Выходные параметры данного элемента отображаются в виде «Изменения положения ёмкости» и «Времени перемещения». Возможность перемещения пробы ГМ вдоль дозиметра с различной скоростью является одним из важнейших функциональных параметров стенда, необходимых для определения зависимости получения данных об естественной радиоактивности ГМ от времени исследования.

Функциональный элемент «Обработка и запись результатов» является четвёртым и единственным элементом, выполняющимся последовательно, как уже было отмечено. Выходные параметры второго и третьего функционального элемента, а также «Материал ограждения» служат входными параметрами данного элемента. «Результаты эксперимента» обозначены как выходной параметр и являются логическим завершением этапов проведения экспериментов на стенде. Материал ограждения так же имеет особое значение в проведении эксперимента. Ограждение из различных материалов устанавливается между дозиметром и ГМ, что позволяет определять зависимость получения данных от их пропускаемой способности.

На основе полученных результатов анализа разработана конструкция стенда по исследованию глубины чувствительности гамма-метода анализа горных пород при выпуске угля, позволяющая проводить эксперименты по определению процентного содержания пустой породы в ГМ [19]. Полученные на стенде данные позволят установить глубину чувствительности метода, зависимость влияния защитного элемента и скорости движения ГМ на получаемый результат.

Заключение

В результате выполненной работы при использовании метода системно-функционального моделирования IDEF0, осуществлено представление части технологического процесса выпуска, связанного с прохождением ГМ через выпускное окно секции и её погрузкой на конвейер. Кроме того, представлен результат на основе того же метода в виде прохождения ГМ через чувствительную зону дозиметра в лабораторных условиях на стенде, что позволило определить механизмы, благодаря которым осуществляется выполнение каждого функционального элемента схемы, а также различные параметры, влияющие на процесс выпуска. В данном случае это материал ограждения и скорость перемещения ГМ относительно дозиметрического оборудования. Определено влияние различных функциональных элементов на другие элементы, что позволит корректно проводить эксперименты. Метод системно-функционального моделирования IDEF0 позволил структурировать, систематизировать и определить требования и функции части технологического процесса выемки угля подкровельной толщи.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2024-0025 «Разработка научных основ создания автономных и автоматизированных горных машин, оборудования, технических и управляющих систем на базе перспективных цифровых и роботизированных технологий» (рег. №1023033000581-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu C., Li H. Numerical simulation of realistic top coal caving intervals under different top coal thicknesses in longwall top coal caving working face // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11, P. 13254. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92624-y>
2. Wang H., Wang J., He M., Ma Z., Tian X., Liu P. A novel non-pillar coal mining technology in longwall top coal caving: a case study // *Energy Science & Engineering*. 2023. Vol. 11, issue 6. P. 1822–1841. doi: [doi:10.1002/ese3.1424](https://doi.org/10.1002/ese3.1424)
3. Khanal M., Adhikary D., Balusu R. Evaluation of mine scale longwall top coal caving parameters using continuum analysis // *Mining Science and Technology*. 2011. Vol. 21, issue 6. P. 787–796. doi: [10.1016/j.mstc.2011.06.027](https://doi.org/10.1016/j.mstc.2011.06.027)
4. Safety and high-recovery mechanisms and application research for initial mining of thick-coal-seam

with complex structure and thick-hard roof / Chang Z. [и др.] // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, P. 19638. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70085-3>

5. Особенности выпуска подкровельной (межслоевой) толщи угля механизированными крепями / В. И. Клишин, Ю. С. Фокин, Д. И. Кокоулин, Кубанычбек уулу Бакыт // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2005. № 6. С. 206–210.
6. Саламатин А. Г. Подземная разработка мощных пологих угольных пластов. М. : Недра, 1997. 407 с.
7. Клишин В. И. Обоснование технологий разработки мощных пологих и крутых угольных пластов с выпуском угля // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2013. № S6. С. 36–47.
8. Секция механизированной крепи очистного забоя с устройством регулируемого выпуска угля: пат. 210254 U1 Рос. Федерация. № 2021131401 / Клишин В. И., Анферов Б. А., Кузнецова Л. В. [и др.] ; заявл. 26.10.2021 : опубл. 04.04.2022, Бюл. № 10. 6 с.
9. Автоматизация управления технологическими процессами при отработке мощных пластов с выпуском угля подкровельной толщи / С. А. Кизилов, М. С. Никитенко, Б. Неоджи [и др.] // *Горная промышленность*. 2017. № 6 (136). С. 76.
10. Кизилов С. А., Никитенко М. С., Худынцев Е. А. Схема управления техническими средствами обеспечения регулируемого выпуска угля подкровельной толщи на забойный конвейер // *Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов*. 2018. № 4. С. 313–316.
11. Peng S. *Longwall Mining*, 3rd Edition (1st ed.). CRC Press, 2019. 562 p. doi: <https://doi.org/10.1201/9780429260049>.
12. Баловнев Е. А. Обоснование параметров стенда по исследованию глубины чувствительности гамма-метода анализа горных пород при выпуске угля // *Развитие – 2023: Сборник трудов конф. Кемерово : ФИЦ УУХ СО РАН*, 2023. С. 8–18.
13. P 50.1.028-2001 Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200028629> (дата обращения: 04.11.2024).
14. Радиоактивность углей и золы / Х. А. Исхаков, Е. Л. Счастливцев, Ю. А. Кондратенко, М. Л. Лесина // *Кокс и химия*. 2010. № 5. С. 41–45.
15. Устройство для измерения объема сыпучего материала разной фракции: пат. 216036 U1 Рос. Федерация. № 2022112782 / Кизилов С. А., Никитенко М. С., Худоногов Д. Ю. [и др.] ; заявл. 12.05.2022 : опубл. 13.01.2023, Бюл. № 2. 6 с.
16. Черкасов П. В., Никитенко М. С., Кизилов С. А. Обоснование параметров стенда для измерения объема выпускаемой горной массы с использованием машинного зрения и проецирования сетки лазерных линий // *Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов*. 2024. № 10. С. 120–126.
17. Программа самокалибровки системы машинного зрения: ПрЭВМ 2024668340 Рос. Федера-

ция. № 2024666012 / Никитенко М. С., Худоногов Д. Ю., Кизилев С. А. [и др.] ; заявл. 12.07.2024 : опубл. 06.08.2024, Бюл. № 8. 1 с.

18. Низкофононовая радиометрия / А. К. Лаврухина, В. А. Алексеев, В. Д. Горин, А. И. Ивлиев. М.: Наука, 1992. 259 с.

19. Устройство для регистрации естественного гамма-излучения сыпучих веществ: пат. 214630 U1 Рос. Федерация. № 2022109522 / Кизилев С. А., Никитенко М. С., Худоногов Д. Ю. [и др.] ; заявл. 11.04.2022 : опубл. 08.11.2022, Бюл. № 31. 6 с.

© 2024 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Баловнев Евгений Александрович, инженер, ФИЦ УУХ СО РАН, (650000, Россия, г. Кемерово, пр-т Ленинградский, 10), balovnev.evgeny.a@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Баловнев Евгений Александрович – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, анализ данных, подведение итогов, написание текста, обзор актуальной литературы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-5-70-77

Evgeniy A. Balovnev*

Federal Research Centre of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of Russian Academy of Science

*E-mail: balovnev.evgeny.a@gmail.com

SYSTEM-FUNCTIONAL MODELING OF CONTINUOUS MONITORING OF ROCK MASS PARAMETERS IN THE TECHNOLOGICAL PROCESS LONGWALL TOP COAL CAVING



Article info

Received:

31 October 2024

Accepted for publication:

15 November 2024

Accepted:

22 November 2024

Published:

11 December 2024

Keywords: rock mass; roof support section; controlled release; coal release to the downhole conveyor; mechanised roof support; technological process; released rock mass parameters; gamma method; modelling; IDEF0.

Abstract.

The technology of longwall top coal provides an area or wave release from several roof support sections, therefore the technology is the most promising in terms of release completeness. These complexes can significantly reduce the mining time of thick seams and, as a result, reduce the possibility of spontaneous combustion. The work is devoted to carrying out a systematic analysis of a part of the technological release process associated with the passage of rock mass through the section outlet window and its loading onto the conveyor. The objects of the study were the technological process of longwall top coal caving with release on armored face conveyor, as well as the process of determining the qualitative composition of the rock mass. The paper presents the results of the application of the functional graphical modeling methodology for each object of this study. The author uses the method of system-functional modeling, since it allows structuring, systematizing and defining requirements and functions in the analysis, including technological processes. The analysis is conditioned by the need for automated control of the rock mass, which provides the ability to control the technological process and the quality of solid minerals to reduce the degree of dilution of the released mass onto the conveyor. Mechanisms have been identified in the notation of system-functional modeling, which is possible to create various scenarios for the passage of rock mass near the outlet window to determine the dependencies of the influence of support section structural elements and the velocity of the flow of rock mass on the gamma method sensitivity. In addition, the role of an automated system for determining the coal-rock boundary in the technological process of mining, its relationship and impact on other production processes are determined.

For citation: Balovnev E.A. System-functional modeling of continuous monitoring of rock mass parameters in the technological process longwall top coal caving. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2024; 5(175):70-77 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2024-5-70-77, EDN: RCMWUL

REFERENCES

1. Liu C., Li H. Numerical simulation of realistic top coal caving intervals under different top coal thicknesses in longwall top coal caving working face. *Scientific Reports*. 2021; 11:13254. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92624-y>
2. Wang H., Wang J., He M., Ma Z., Tian X., Liu P. A novel non-pillar coal mining technology in longwall top coal caving: a case study. *Energy Science & Engineering*. 2023; 11(6):1822-1841. (In Eng.) doi: [doi:10.1002/ese3.1424](https://doi.org/10.1002/ese3.1424)
3. Khanal M., Adhikary D., Balusu R. Evaluation of mine scale longwall top coal caving parameters using continuum analysis. *Mining Science and Technology*. 2011; 21(6):787-796. (In Eng.) doi: [10.1016/j.mstc.2011.06.027](https://doi.org/10.1016/j.mstc.2011.06.027)
4. Chang Z., Wang X., Qin D. [et al.] Safety and high-recovery mechanisms and application research for initial mining of thick-coal-seam with complex structure and thick-hard roof. *Scientific Reports*. 2024; 14:19638 (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70085-3>
5. Features of the production of underlay (inter-layer) coal seam with mechanized supports / V.I. Klishin, Yu.S. Fokin, D.I. Kokoulin, Kubanychbek uulu Bakyt // *Mining information and analytical bulletin*. 2005; 6:206–210. (In Russ.)
6. Salamatin A.G. Underground mining of thick coal seams. M. : Nedra; 1997. 407 p. (In Russ.)
7. Klishin V.I. Substantiation of technologies for the development of thick shallow and steep coal seams with coal production // *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2013; S6:36–47. (In Russ.)
8. Section of the mechanized support of the cleaning face with a device for controlled release: pat. 210254 U1 Russian Federation. No. 2021131401 / Klishin V.I., Anferov B.A., Kuznetsova L.V. [et al.] ; application 26.10.2021 : publ. 04.04.2022, Bul. No. 106 p. (In Russ.)
9. Kizilov S.A., Nikitenko M.S., Neodzhi B., Nikolaev P.I., Kuznetsov I.S. Automation of technological process control during the thick seam top coal caving // *Mining industry*. 2017; 6(136):76. (In Russ.)
10. Kizilov S.A., Nikitenko M.S., Khudyntsev E.A. Control scheme of technical devices ensuring the longwall top coal caving // *High-tech technologies for the development and use of mineral resources*. 2018; 4:313-316. (In Russ.)
11. Peng S. Longwall Mining, 3rd Edition (1st ed.). CRC Press; 2019. 562 p. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1201/9780429260049>.
12. Balovnev E.A. Substantiation of the parameters of the stand for the study of the depth of sensitivity of the gamma method of rock analysis during coal mining // *Razvitie – 2023: Proceedings of the conference*. 2023; 8–18. (In Russ.)
13. P 50.1.028-2001 Information technologies for product life cycle support. Methodology of functional modeling. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200028629> (accessed 04.11.2024). (In Russ.)
14. Radioactivity of coals and ashes / H.A. Iskhakov, E.L. Shchastyantsev, Yu.A. Kondratenko, M.L. Lesina // *Coke and Chemistry*. 2010; 5:41-45. (In Russ.)
15. Device for measuring the volume of bulk material of different fractions: pat. 216036 U1 Russian Federation. No. 2022112782 / Kizilov S.A., Nikitenko M.S., Khudonogov D.Yu. [et al.] ; application 12.05.2022 : publ. 13.01.2023, Bul. No. 2. 6 p. (In Russ.)
16. Cherkasov P.V., Nikitenko M.S., Kizilov S.A. Substantiation of the parameters of the stand for measuring the volume of produced rock mass using machine vision and projection of a grid of laser lines // *High-tech technologies for the development and use of mineral resources*. 2024; 10:120–126. (In Russ.)
17. The program of self-calibration of the machine vision system: PC 2024668340 Russian The Federation. No. 2024666012 / Nikitenko M.S., Khudonov D.Yu., Kizilov S.A. [et al.] ; application 12.07.2024 : publ. 06.08.2024, Bul. No. 8. 1 p. (In Russ.)
18. Low-background radiometry / A.K. Lavrukina, V.A. Alekseev, V.D. Gorin, A.I. Ivliev. M. : Nauka; 1992. 259 p. (In Russ.)
19. Device for recording natural gamma radiation of bulk substances: pat. 214630 U1 Russian Federation. No. 2022109522 / Kizilov S.A., Nikitenko M.S., Khudonogov D.Yu. [et al.] ; application 11.04.2022 : publ. 08.11.2022, Bul. No. 31.6 p. (In Russ.)

© 2024 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Evgeniy A. Balovnev, engineer, FRC CCC SB RAS (650000, Russia, Kemerovo, Leningradsky av., 10), balovnev.evgeny.a@gmail.com

Contribution of the authors:

Evgeniy A. Balovnev – setting the research problem, conceptualisation of the study, data analysis, summarising, writing, review of current literature.

Authors have read and approved the final manuscript.

