ISSN 1999-4125 (Print) **ISSN 2949-0642 (Online)**

Научная статья
УДК 622 + 004.942
DOI: 10.26730/1999-4125-2025-6-182-190

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ИНТЕГРАЦИИ ПОТОКОВ ДАННЫХ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ И ФИЗИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕХАНИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА С УПРАВЛЯЕМЫМ ВЫПУСКОМ

Черкасов Павел Вадимович[1,2*], Баловнев Евгений Александрович[1], Стародубов Алексей Николаевич[1,2]

[1] Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН
[2] Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

[*] для корреспонденции: cherkasov.pavel.v@gmail.com

Информация о статье
Поступила:
25 сентября 2025 г.

Одобрена после рецензирования:
15 ноября 2025 г.

Принята к публикации:
02 декабря 2025 г.

Опубликована:
22 декабря 2025 г.

Ключевые слова:
горная масса, выпуск угля подкровельной толщи, система управления, цифровой двойник, цифровая модель, алгоритм управления, система машинного зрения, состав горной массы, гамма-излучение

Аннотация.
Одним из основных приоритетов развития угольной промышленности является внедрение технологий, позволяющих минимизировать присутствие персонала в забое, что особенно актуально при отработке мощных пластов с трудноизвлекаемыми запасами подкровельной толщи. В условиях перехода к роботизированному производству и реализации концепции «Индустрия 4.0» создание таких автономных систем становится стратегической задачей. Работа посвящена разработке алгоритма интеграции данных для системы управления механизированным комплексом с управляемым выпуском, обеспечивающей автоматизацию процесса выпуска угля на забойный конвейер. Объектом исследования является процесс согласованного управления элементами секций механизированной крепи на основе информации от подсистем мониторинга производительности питателя и контроля состава горной массы. В статье представлены принципы работы алгоритма, основанного на анализе входных данных от цифровой модели и физических датчиков, включая систему машинного зрения для расчета объема горной массы и гамма-метод для идентификации породы. Описана структурная схема взаимодействия между виртуальным и физическим пространствами, обеспечивающая автоматизированное управление выпуском. Кроме того, в работе детализирована логика принятия решений алгоритмом, который корректирует режимы работы питателя и шиберного заслона при отклонении контролируемых параметров от заданных оптимальных значений. Таким образом, разработанный алгоритм позволяет реализовать рациональный режим управляемого выпуска, минимизируя степень разубоживания угля и перегрузку конвейера. Предложенное решение формализует процесс управления и создает основу для реализации цифрового двойника роботизированного очистного комплекса, что способствует повышению безопасности и эффективности подземной добычи.

Для цитирования: Черкасов П.В., Баловнев Е.А., Стародубов А.Н. Разработка алгоритма интеграции потоков данных цифровой модели и физического оборудования механизированного комплекса с управляемым выпуском // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 6 (172). С. 182-190. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-6-182-190, EDN: ZVMTEV

Введение

В соответствии с Программой развития угольной промышленности России до 2035 года [1] ключевым приоритетом является внедрение технологий, позволяющих добывать уголь без постоянного нахождения людей в забоях. Данная задача решается за счет комплексной механизации и внедрения цифровых систем управления. При существующих ограничениях легкодоступных пластовых месторождений становится актуальной разработка трудноизвлекаемых запасов подкровельной толщи из мощных пластов [2, 3]. Для отработки таких месторождений в ФИЦ УУХ СО РАН разработана конструкция механизированной крепи, обеспечивающая выпуск угля на забойный конвейер при обеспечении полноты выпуска [4], в том числе в сложных горно-геологических условиях [5, 6]. Также предложена система управления элементами секции [7], направленная на повышение степени автоматизации технологии и снижение времени присутствия персонала в забое. Преимуществами секций крепи новой конструкции является отсутствие второго конвейера и перегружателя, а также значительное уменьшение размеров подготовительной выработки. Ступенчатый питатель и шиберный заслон являются техническими средствами, способными обеспечить управляемый выпуск. Однако данные технические средства должны быть объединены в общую систему управления крепью [8] и работать с определенной степенью автономности.

Свойства горной массы (ГМ) представляют собой измеримые параметры, на основе которых можно организовать автоматическое управление загрузкой забойного конвейера [9, 10]. При этом система должна анализировать как количественные показатели ГМ на выпускном лотке питателя [10], так и ее качественные характеристики вблизи выпускного окна секции крепи [9]. Поскольку автоматическое отслеживание производительности питателя и определение приближения разубоженной породы позволяет раскрыть преимущества управляемого выпуска перед гравитационным [11], ранее предложен подход с использованием системы машинного зрения (СМЗ) для оценки производительности питателя, а также метод анализа состава ГМ посредством регистрации естественного гамма-излучения угля и породы [2]. В результате снизятся потери угля и уменьшится риск эндогенных пожаров в лаве [11]. Параметры, полученные в результате описанных далее подходов, являются расчетными параметрами физического оборудования некоторой конфигурации в составе автоматизированной системы управления механизированным комплексом с управляемым выпуском.

Одной из наиболее перспективных технологий становится машинное зрение, обеспечивающее обработку фото- и видеоданных, выделение областей интереса (ROI) и их последующий анализ. Вместе с тем методы на основе машинного зрения активно внедряются в горнодобывающую промышленность [12, 13] как при открытой, так и при подземной разработке месторождений. Подобные системы способствуют повышению точности, безопасности и эффективности технологических операций [14, 15]. Сотрудниками ФИЦ УУХ СО РАН предложен подход для расчета производительности качающегося питателя, осуществляющего подачу ГМ из выпускного окна секции на забойный конвейер при отработке мощных пластов [5, 6]. Подход основан на использовании СМЗ, дополненной подсветкой контрастных структурированных лазерных линий (маркеров) в зоне ROI. Данный подход направлен на решение ряда актуальных научно-технических задач в области горнодобывающей промышленности, таких как мониторинг и управление технологическими процессами в сложных эксплуатационных условиях, в частности, в условиях ограниченной видимости. В общем виде последовательность операций для расчета текущей производительности качающегося питателя СМЗ включает сканирование деформированной лазерной сетки камерой, расчет высоты слоя ГМ в точках пересечения маркеров, построение карты высот и вычисление объема порции, сбрасываемой на конвейер. Благодаря этой подсистеме появляется возможность согласовать режимы работы секций крепей, обеспечив выемку пласта на полную мощность без перегрузки конвейера. Таким образом, реализуется рациональный режим управляемого выпуска угля.

Поскольку современные подходы к управлению выпуском основываются либо на субъективной оценке горнорабочего, анализирующего акустические параметры движения ГМ при контакте с ограждением секции, либо на использовании временных интервалов выпуска [16] без обратной связи, ранее разработан альтернативный способ определения изменения в составе ГМ. Для автоматической оценки качества материала в выпускном окне предложено применять гамма-метод [2]. Это обусловлено радиоактивными свойствами угля и породы из-за содержания в их составе природных радионуклидов (уран-238, торий-232, калий-40) [17]. Интенсивность гамма-излучения от угля и пустой породы статистически отличается, что позволяет регистрировать изменение состава ГМ в

реальном времени. При выходе уровня излучения за ожидаемый диапазон система автоматически закрывает шиберный заслон, минимизируя попадание породы на конвейер. Анализ проводится непосредственно в зоне выпускного окна, где конструкция секции обеспечивает защиту измерительной аппаратуры [2, 9]. Разрабатываемая система идентификации угля и пустой породы обеспечивает автоматическую регистрацию изменения состава ГМ в реальном времени. Благодаря этому становится возможным оперативное управление процессом выпуска, что позволяет повысить эффективность добычи полезного ископаемого при снижении уровня его разубоживания.

Применение описанных подходов в условиях отработки мощных угольных пластов лавным комплексом должно обеспечить автоматическое определение наличия ГМ на питателе, измерение текущей производительности питателя, определение момента поступления пустой породы в выпускное окно, своевременную остановку процесса выпуска, а также снижение степени разубоживания выпущенной ГМ.

Несмотря на относительно недавнее появление концепции цифровых двойников [18, 19], их применение представляется перспективным для исследования динамически изменяющихся горнотехнических систем, в частности для исследования параметров согласованной работы секций на основе вышеописанных подходов (далее – режимов работы секций). Цифровые аналоги способны с достаточной достоверностью воспроизводить моделируемые процессы, что важно в условиях методологических ограничений физического моделирования [20], таких как сложность учета всего спектра реальных условий и масштабирования результатов. Кроме того, эффективность горнодобывающих компаний сильно зависит от внешних факторов: геологических особенностей пластов, климатических условий, технических и технологических ограничений оборудования [9, 10, 21]. Вместе с тем современные технологии сбора и обработки больших данных открывают новые возможности для прогнозирования и моделирования физических процессов в реальном времени [21]. Этот переход к цифровой экономике, поддерживаемый международной концепцией «Индустрия 4.0» [22] и российским национальным проектом «Цифровая экономика», способствует активному развитию цифровых моделей в горной отрасли.

Согласно ГОСТ Р 57700.37–2021, цифровая модель (ЦМ) представляет собой систему математических и компьютерных моделей, а также электронных документов, описывающих структуру, функциональность и поведение изделия или процесса на различных стадиях его жизненного цикла. Для моделирования взаимодействия множества элементов в такой ЦМ целесообразно применять метод дискретных элементов (DEM), который учитывает стохастическую природу движения сыпучих материалов под действием гравитации [20]. В отличие от континуальных подходов [23], реализуемых через метод конечных элементов или модели на основе теории подвижных клеточных автоматов [24], DEM требует значительно меньше вычислительных ресурсов, при этом сохраняя точность результатов. Таким образом с учетом граничных условий моделируемого объекта и возможностей среды Rocky DEM была разработана и апробирована на адекватность ЦМ механизированного комплекса с управляемым выпуском (Рис. 1), параметры которой возможно исследовать в режиме реального времени.

Посредством имитационного моделирования ранее обоснованы параметры элементов оборудования, обеспечивающие оптимальное наполнение конвейера без перегрузов. Кроме того, ЦМ может использоваться как средство оценки эффекта использования и изменения конструктивных и режимных параметров выпуска угля подкровельной толщи. На основе

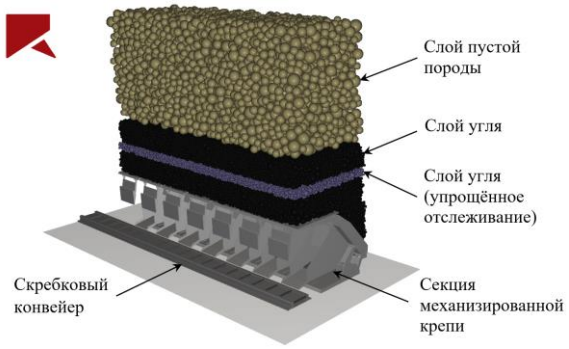

Рис. 1. Цифровая модель механизированного комплекса с управляемым выпуском в Rocky DEM
Fig. 1. Digital model of a mechanized complex with controlled output in Rocky DEM

этих данных могут быть разработаны рекомендации для принятия обоснованных решений по продолжению выпуска и корректировке режимов работы элементов секции крепи, и в результате исследования ЦМ потребность в нецифровых (физических) экспериментах значительно сокращается.

На основе изложенного эффективность выпуска угля подкровельной толщи зависит от согласованной работы как подсистемы измерения текущей производительности питателя и подсистемы оценки состава выпускаемой ГМ, так и от параметров рациональных режимов работы элементов секций крепей в лаве, полученных на разработанной ЦМ. Система, состоящая из ЦМ изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями по определению ГОСТ Р 57700.37–2021 является цифровым двойником.

В свою очередь, задачей работы является разработка алгоритма интеграции потока данных рационального режима выпуска ЦМ и физического оборудования механизированного комплекса, в частности качающегося питателя и шиберного заслона.

Результаты и обсуждение.

Структурная схема разрабатываемого алгоритма (Рис. 2) отражает принцип взаимодействия между виртуальным и физическим пространствами [25] потоков данных двух подсистем, ЦМ и непосредственно управляющего алгоритма, на основе которого впоследствии может быть разработан интерфейс взаимодействия ЦМ и автоматизированной системы.

Далее структурная схема была декомпозирована в виде алгоритма (Рис. 3) с указанием структур данных, управляющих конструкций и условий выполнения. Такой подход позволил перейти от концептуального представления взаимодействия потока данных ЦМ и физического оборудования к практическому, снижая неоднозначности интерпретации.

Вначале (1) происходит запуск алгоритма. Первым этапом работы алгоритма является получение входных данных от ЦМ. На данном этапе происходит запись в систему различных значений параметров элементов оборудования. Первыми вносятся начальное положение шибера, угла заслона и частота работы питателя (2). Далее – значение оптимального объема ГМ для каждой секции крепи в режиме (3). Переменная Z, отвечающая за накопление ошибок при открытии угла заслона обнуляется (4), назначается номер первой секции крепи в режиме (5). Последнее действие в первом основном этапе – это внесение рациональных режимов работы писателей (6) на основе проведенных ранее серий экспериментов на ЦМ. После этого дается сигнал секциям о режиме работы питателя (7). Далее секции начинают свою работу, пока не получат сигнал от подсистемы контроля качества ГМ (8), обеспечивающей автоматическую регистрацию изменения состава ГМ в реальном времени. В

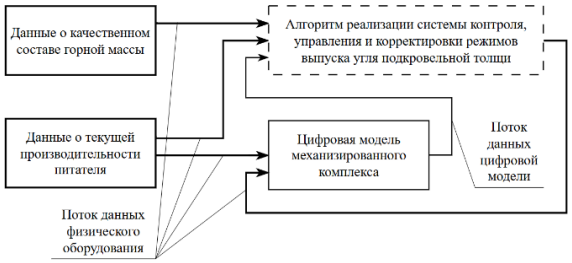

Рис. 2. Структурная схема взаимодействия данных между виртуальным и физическим пространствами в системе управления выпуском
Fig. 2. Data interaction structure between virtual and physical spaces in the output control system

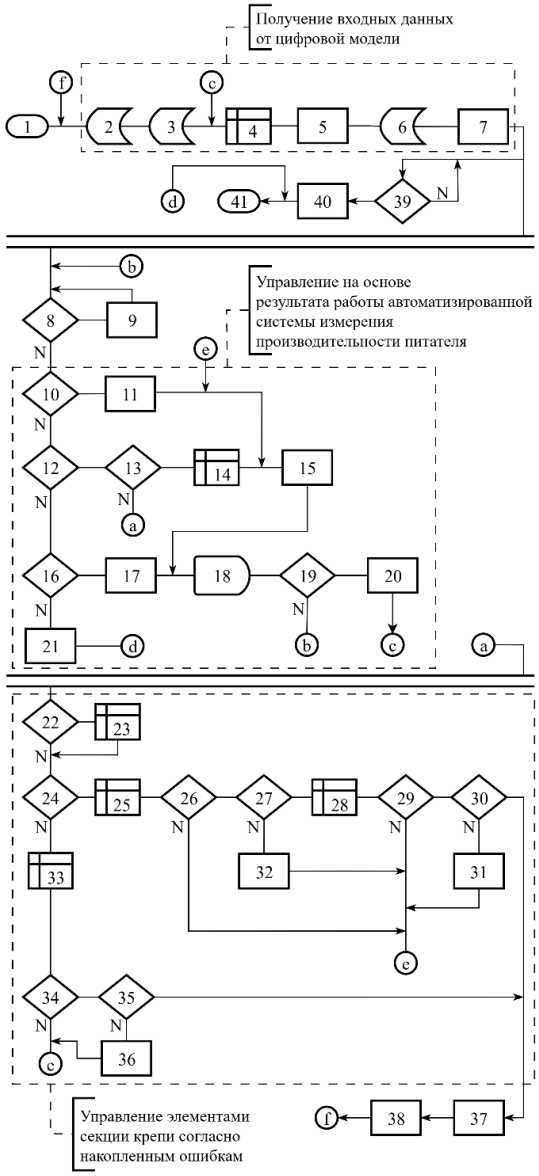

Рис. 3. Алгоритм интеграции потоков данных цифровой модели и физического оборудования механизированного комплекса с управляемым выпуском
Fig. 3. Data stream integration algorithm for the digital model and physical equipment of the controlled-output mechanized complex

случае получения этого сигнала происходит остановка питателя, выдвижение шибера и инициализация перехода на следующий режим (9).

Далее начинается второй основной этап алгоритма – управление на основе результата работы автоматизированной системы измерения производительности питателя. Если получен этот сигнал (10), то питатель включается согласно новому режиму (11) и продолжается режим выпуска (15), а именно ожидание согласно частоте работы питателя (18) и проверка на получение сигнала о передвижке лавы (19). В случае получения сигнала о передвижке лавы – возврат угла наклона согласно режиму (20) и переход в блок 4 (c), а в случае неполучения сигнала – переход в блок 8 (b). Если сигнал о переходе на следующий режим не поступал (10), то осуществляется опрос подсистемы измерения текущей производительности питателя на предмет наличия ГМ на выпускном лотке (12), а также проверяется оптимальность производительности питателя согласно данным ЦМ (13) и происходит обнуление счетчиков переменных, регистрирующих ошибку производительности в меньшую сторону I и в большую сторону Y (14), после чего продолжается режим выпуска (15). Если ГМ на выпускном лотке отсутствует (12), проверяется, закрыто ли выпускное окно (16), и изменяется положение шибера и заслона согласно режиму (17), далее – ожидание согласно частоте работы питателя (18). В случае открытого выпускного окна (16) оператору отправляется сообщение об ошибке и питатель принудительно останавливается в блоке 41 (d).

Если производительность питателя не оптимальна (13), то происходит переход в третий основной этап – управление элементами секции крепи согласно накопленным ошибкам (a). На данном этапе проверяются переменные I и Y: больше ли они нуля (22), если они обе больше, то происходит их обнуление (23). После этого проверяется производительность питателя (24), если она меньше оптимальной, происходит увеличение счетчика переменной I на 1 (25), и если она становится кратна 3 (26), проводится проверка на степень открытия шибера (27). В случае полного открытия увеличивается счетчик переменной Z на 1 (28) и также проверяется на кратность 3 (29). Если переменная Z кратна 3 и угол открыт максимально (30), то вносятся корректировки в режим работы питателя (37) и передаются данные о параметрах элементов секции в ЦМ (38), далее переход в блок 2 (f). В случае, когда угол заслона открыт не максимально или шибер открыт не полностью, происходит увеличение угла открытия (31) или увеличение открытия шибера (32) соответственно и переход в блок 15 (e), также этот переход осуществляется, если переменные I и Z не кратны 3. Однако, если производительность питателя больше оптимальной, то увеличивается переменная Y на 1 (33) и проверяется ее кратность 3 (34). При переменной, кратной 3, проверяется: закрыт ли шибер полностью (35), и если закрыт, то вносятся корректировки в режим (37), в ином случае уменьшается открытие шибера (36). Далее осуществляется переход в блок 15 (e), как и в случае, если Y не кратна 3.

В секции механизированной крепи имеется возможность управления шибером в обе стороны (открывать и закрывать), а угол открытия заслона возможно только увеличивать. Угол возвращается назад при передвижке лавы. Чтобы произошло смена положения шибера, 3 раза должна произойти ошибка на лотке питателя в одну и ту же сторону, и так же 3 раза должна произойти ошибка для изменения положения угла заслона.

Параллельно описанному выше алгоритму осуществляется ожидание от оператора сигнала остановки (39), и если он получен, то выполнение алгоритма прекращается, останавливается питатель и выдвигается шибер (40, 41).

Заключение

В результате проведенного исследования разработан и описан алгоритм интеграции потоков данных между цифровой моделью и физическим оборудованием механизированного комплекса с управляемым выпуском. Алгоритм обеспечивает автоматическое регулирование производительности питателей и состава горной массы на основе сигналов от соответствующих подсистем, снижая степень разубоживания угля и перегруз участков конвейера. Каждая секция механизированной крепи в составе очистного комплекса работает согласно приведенному алгоритму, в том числе секции, непосредственно не задействованные в режиме выпуска. Предложенное решение позволяет реализовать рациональный режим управляемого выпуска, обеспечивая безопасность и повышая эффективность отработки мощных пластов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2024-0024 «Разработка эффективных технологий добычи угля роботизированными горнодобывающими комплексами без постоянного присутствия людей в зонах ведения горных работ, систем управления и методов оценки технического состояния и диагностики их ресурса и обоснование обеспечения

воспроизводства минерально-сырьевой базы. 2024-2025 гг.» (рег. № 124041100072-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение «Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 года» от 13 июня 2020 г. № 1582-р // Российская газета.

2. Balovnev E. A., Cherkasov P. V. Analysis of approaches to measuring the rock mass volume and composition for automated control system for longwall top coal caving // E3S Web of Conferences. 2025. Vol. 623. P. 02021. DOI: 10.1051/e3sconf/202562302021.

3. Разумов Е. А., Венгер В. Г., Зеляева Е. А. [и др.] Опыт механизированной отработки мощных пологих пластов на угольных шахтах Кузбасса и рекомендации по отработке весьма мощных пологих пластов // Уголь. 2021. № 6(1143). С. 4-10. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-6-4-10. EDN HXPXVO.

4. Клишин В. И., Худынцев Е. А. Создание механизированных комплексов с выпуском для подземной разработки мощных угольных пластов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. № 6(154). С. 96-106. DOI: 10.26730/1999- 4125-2022-6-96-106.

5. Кизилов С. А., Никитенко М. С., Неоджи Б. [и др.] Автоматизация управления технологическими процессами при отработке мощных пластов с выпуском угля подкровельной толщи // Горная промышленность. 2017. № 6(136). С. 76. EDN: YLQRRK.

6. 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. EDN: XTCOFN.

7. 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. EDN: TYZBEO.

8. Nikitenko M. S., Kizilov S. A., Nikolaev P. I. [и др.] Technical devices of powered roof support for the top coal caving as automation objects // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. P. 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/354/1/012014. EDN: YBQWJN.

9. 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.

10. Черкасов П. В. Технологический процесс выпуска угля подкровельной толщи в нотации системно-функционального подхода // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 1 (177). С. 85-92. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-1-85-92. EDN: XHJRAC.

11. Клишин В. И., Фокин Ю. С., Кокоулин Д. И. [и др.] Особенности выпуска подкровельной (межслоевой) толщи угля механизированными крепями // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 6. С. 206-210. EDN: IIYWTX.

12. Huang M. Q., Ninic J., Zhang Q. B. BIM, machine learning and computer vision techniques in underground construction: Current status and future perspectives // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 108. P. 103677. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103677. EDN: MVKAZC.

13. Ali D., Frimpong S. Artificial intelligence, machine learning and process automation: existing knowledge frontier and way forward for mining sector // Artificial Intelligence Review. 2020. Vol. 53. Pp. 6025-6042. DOI: 10.1007/s10462-020-09841-6. EDN: DEZQGD.

14. Новиков А. В., Паневников К. В., Писарев И. В. Многофункциональная система безопасности угольных шахт – визуализация событий (горнотехнических процессов) с рабочего места шахтера // Горная промышленность. 2021. № 5. С. 65-69. DOI: 10.30686/16099192-2021-5-65-69.

15. Du Y., Zhang H., Liang L. [и др.] Applications of Machine Vision in Coal Mine Fully Mechanized Tunneling Faces: A Review // IEEE Access. 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3317048.

16. Peng S. Longwall Mining, 3rd Edition (1st ed.). CRC Press, 2019. 562 p. DOI: 10.1201/9780429260049.

17. Лаврухина А. К., Алексеев В. А., Горин В. Д. [и др.] Низкофоновая радиометрия. М. : Наука, 1992. 259 с.

18. Saddik A. E. Digital twins: the convergence of multimedia technologies // IEEE MultiMedia. 2018. Vol. 25. Issue 2. Pp. 87-92.

19. Yan X., Yanming S., Xiaolong L. [и др.] A digital-twin assisted fault diagnosis using deep transfer learning // IEEE Access. 2019. Vol. 7. Pp. 19990–19999. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2890566.

20. Лаптев В. В. Численное моделирование потока раздробленной горной массы в процессе выпуска руды с использованием программы ROCKY DEM // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2019. Т. 22. № 1. С. 149-157. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-1-149-157.

21. Копанская А. А. Исследование технологии «цифровых двойников» в горной отрасли // Экономические и управленческие технологии XXI века: теория и практика, подготовка специалистов : Материалы методической и научно-практической конф. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2020. С. 74–78. EDN: MEYSYQ.

22. Kagermann H., Wahlster W., Helbig J. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0 // Final report of the Industrie 4.0. Working Group. 2013. Vol. 8.

23. Johnson K. L. Contact Mechanics. Cambridge : Cambridge University Press, 1989.

24. Псахье С. Г., Смолин А. Ю., Коростелев С. Ю. [и др.] Метод подвижных клеточных автоматов и его применение при моделировании на разных масштабах. Механика – от дискретного к сплошному. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2008.

25. Царев М. В., Андреев Ю. С. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64. № 7. С. 517–531. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531. EDN: QOKQJW.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Черкасов Павел Вадимович, инженер, ФИЦ УУХ СО РАН (650000, Россия, г. Кемерово, пр-т Ленинградский, 10), аспирант, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: cherkasov.pavel.v@gmail.com

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

Стародубов Алексей Николаевич, заведующий лабораторией, ФИЦ УУХ СО РАН (650000, Россия, г. Кемерово, пр-т Ленинградский, 10), кандидат технических наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7577-9210, e-mail: a.n.starodubov@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Черкасов Павел Вадимович – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, анализ данных, подведение итогов, написание текста, обзор актуальной литературы.

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

Стародубов Алексей Николаевич – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, анализ данных, подведение итогов, написание текста, обзор актуальной литературы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DIGITAL MODEL AND PHYSICAL EQUIPMENT DATA STREAMS INTEGRATION ALGORITHM DEVELOPMENT FOR A MECHANIZED COMPLEX WITH CONTROLLED OUTPUT

Pavel V. Cherkasov[1,2*], Evgeny A. Balovnev[1], Aleksey N. Starodubov[1,2]

[1] Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
[2] T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: pmv.tma@kuzstu.ru

Article info
Received:
25 September 2025

Accepted for publication:

Abstract.
One of the top priorities for the coal industry's development is the implementation of technologies that minimize personnel presence at the longwall face. This is particularly relevant when mining thick seams with hard-to-recover reserves in the roof strata. In the context of the transition to robotic production and the implementation of the "Industry 4.0" concept, the creation of such autonomous systems becomes a strategic objective. This work is devoted to the development of a data integration algorithm for the

15 November 2025

Accepted:
02 December 2025

Published:
22 December 2025

Keywords: *rock mass, high coal releasing, operation system, digital twin, digital model, control algorithm, machine vision system, rock mass consistence, gamma-ray*

control system of a mechanized complex with controlled output, designed to automate the process of coal discharge onto the face conveyor. The research focuses on the process of coordinated control of powered roof support sections based on information from monitoring subsystems for feeder performance and analysis of the mined material composition. The article presents the principles of the algorithm's operation, which is based on the analysis of input data from both a digital model and physical sensors. This sensor suite includes a machine vision system for calculating the volume of mined material and a gamma-ray method for identifying waste rock. The structural diagram of the interaction between the virtual and physical spaces, which enables automated output control, is described. Furthermore, the work details the algorithm's decision-making logic, which adjusts the operating modes of the feeder and the flap gate when monitored parameters deviate from specified optimal values. Thus, the developed algorithm enables the implementation of an optimal controlled output regime, minimizing coal dilution and conveyor overload. The proposed solution formalizes the control process and establishes a foundation for implementing a digital twin of a robotic longwall complex. This contributes to enhanced safety and efficiency in underground mining.

For citation: Cherkasov P.V., Balovnev E.A., Starodubov A.N. Digital model and physical equipment data streams integration algorithm development for a mechanized complex with controlled output. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 6(172):182-190. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-6-182-190, EDN: ZVMTEV

REFERENCES

1. Order "Program for the development of the Russian coal industry for the period up to 2035" dated June 13, 2020. № 1582-r // Rossiyskaya Gazeta.

2. Balovnev E.A., Cherkasov P.V. Analysis of approaches to measuring the rock mass volume and composition for automated control system for longwall top coal caving. *E3S Web of Conferences*. 2025; 623:02021. (In Eng.) DOI: 10.1051/e3sconf/202562302021.

3. Razumov E.A., Wenger V.G., Zelyaeva E.A., Pudov E.Yu., Kalinin S.I. The experience of mechanized mining of powerful shallow seams in Kuzbass coal mines and recommendations for the development of very powerful shallow seams. *Ugol*. 2021; 6(1143):4-10. (In Russ.) DOI: 10.18796/0041-5790- 2021-6-4-10. EDN: HXPXVO.

4. Klishin V.I., Khudyntsev E.A. Creation of mechanized complexes with release for underground mining of powerful coal seams. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2022; 6(154):96-106. (In Russ.) DOI: 10.26730/1999-4125-2022-6-96-106.

5. Kizilov S.A., Nikitenko M.S., Neogi B., Nikolaev P.I., Kuznetsov I.S. Technological process control automation during longwall top coal caving. *Mining industry*. 2017; 6(136):76. (In Russ.) EDN: YLQRRK.

6. 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.) EDN: XTCOFN.

7. 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.) EDN: TYZBEO.

8. Nikitenko M.S., Kizilov S.A., Nikolaev P.I., Kuznetsov I.S. Technical devices of powered roof support for the top coal caving as automation objects. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 012014. (In Eng.) DOI: 10.1088/1757-899X/354/1/012014. EDN: YBQWJN.

9. 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.) DOI: 10.26730/1816-4528-2024-5-70-77. EDN: RCMWUL.

10. Cherkasov P.V. Longwall top coal caving technological process in the notation of the system-functional approach. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2025; 1(177):85-92. (In Russ.) DOI: 10.26730/1816-4528-2025-1-85-92. EDN: XHJRAC.

11. Klishin V.I., Fokin Yu.S., Kokoulin D.I., Kubanychbek Uulu Bakyt Features of the release of sub-roof (interlayer) coal layer by mechanized supports. *Mining information and analytical bulletin*. 2005; 6:206-210. (In Russ.) EDN: IIYWTX.

12. Huang M.Q., Ninić J., Zhang Q.B. BIM, machine learning and computer vision techniques in underground construction: Current status and future perspectives. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021; 108:103677. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.tust.2020.103677. EDN: MVKAZC.

13. Ali D., Frimpong S. Artificial intelligence, machine learning and process automation: existing knowledge frontier and way forward for mining sector.

Artificial Intelligence Review. 2020; 53:6025-6042. (In Eng.) DOI: 10.1007/s10462-020-09841-6. EDN: DEZQGD.

14. Novikov A.V., Panevnikov K.V., Pisarev I.V. Multifunctional safety system for coal mines - visualization of events (mining processes) from the miner's workplace. *Mining industry*. 2021; 5:65-69. (In Russ.) DOI: 10.30686/16099192-2021-5-65-69.

15. Du Y., Zhang H., Liang L., Zhang J., Song B. Applications of Machine Vision in Coal Mine Fully Mechanized Tunneling Faces: A Review. *IEEE Access*. 2023. (In Eng.) DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3317048.

16. Peng S. Longwall Mining, 3rd Edition (1st ed.). CRC Press; 2019. 562 p. (In Eng.) DOI: 10.1201/9780429260049.

17. Lavrukhina A.K., Alekseev V.A., Gorin V.D., Ivliev A.I. Low-background radiometry. M. : Nauka; 1992. 259 p. (In Russ.)

18. Saddik A.E. Digital twins: the convergence of multimedia technologies. *IEEE MultiMedia*. 2018; 25(2):87-92. (In Eng.)

19. Yan X., Yanming S., Xiaolong L., Yonghua Z. A digital-twin assisted fault diagnosis using deep transfer learning. *IEEE Access*. 2019; 7:19990-19999. (In Eng.) DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2890566.

20. Laptev V.V. Numerical modeling of the flow of crushed rock mass during ore extraction using the ROCKY DEM program. *Bulletin of MSTU. Proceedings of Murmansk State Technical University*. 2019; 22(1):149-157. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-1-149-157.

21. Kopanskaya A.A. Research of the technology of "digital twins" in the mining industry. *Economic and management technologies of the 21st century: theory and practice, training of specialists:* Proceedings of the methodological and scientific-practical conf. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 2020; 74-78. (In Russ.) EDN: MEYSYQ.

22. Kagermann H., Wahlster W., Helbig J. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. *Final report of the Industrie 4.0. Working Group*. 2013; 8. (In Eng.)

23. Johnson K.L. Contact Mechanics. Cambridge : Cambridge University Press, 1989. (In Eng.)

24. Psakhie S.G., Smolin A.Yu., Korostelev S.Yu., Dmitriev A.I., Shilko E.V., Astafurov S.V. The method of movable cellular automata and its application in modeling at different scales. Mechanics – from discrete to continuous. Novosibirsk: Publishing house of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2008. (In Russ.)

25. Tsarev M.V., Andreev Yu.S. Digital twins in industry: history of development, classification, technologies, and use cases. *News of higher educational institutions. Instrument engineering*. 2021; 64(7):517-531. (In Russ.) DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531. EDN: QOKQJW.

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:
Pavel V. Cherkasov, Engineer, FRC CCC SB RAS (650000, Russia, Kemerovo, Leningradsky av., 10), postgraduate, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya str., 28), e-mail: cherkasov.pavel.v@gmail.com
Evgeny A. Balovnev, engineer, FRC CCC SB RAS (650000, Russia, Kemerovo, Leningradsky av., 10), postgraduate, e-mail: balovnev.evgeny.a@gmail.com
Aleksey N. Starodubov, Head of Laboratory of the Institute of Coal, FRC CCC SB RAS (650000, Russia, Kemerovo, Leningradsky av., 10), Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya str., 28), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7577-9210, e-mail: a.n.starodubov@gmail.com

Contribution of the authors:
Pavel V. Cherkasov – setting a research task, conceptualizing research, analyzing data, summarizing, writing a text, reviewing relevant literature.
Evgeniy A. Balovnev – setting a research task, conceptualizing research, analyzing data, summarizing, writing a text, reviewing relevant literature.
Aleksey N. Starodubov – setting a research task, conceptualizing research, analyzing data, summarizing, writing a text, reviewing relevant literature.

All authors have read and approved the final manuscript.