

УДК 519.876.5, 622.33.013.3

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ

© В. В. Окольнішников¹, А. А. Ордин², С. В. Рудометов¹

¹ Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 6

² Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
630091, г. Новосибирск, Красный просп., 54
E-mail: okoln@mail.ru

Представлены структура и цифровая модель очистного забоя угольной шахты. Цифровая модель содержит параметры угольного пласта, технические параметры используемых горных машин, экономические показатели. Цифровая модель может быть применена для поддержки принятия решений по увеличению производительности очистного забоя угольной шахты, оценки эффекта новой техники или новой технологии. Приведён пример использования цифровой модели для определения зависимости финансовых показателей функционирования очистного забоя от длины лавы и технологических схем добычи угля.

Ключевые слова: цифровой двойник, цифровая модель, угольная шахта, очистной забой, имитационное моделирование.

DOI: 10.15372/AUT20210612

Введение. В настоящее время во многих угольных шахтах существуют проблемы обоснованного принятия решений по повышению производительности, улучшению планирования добычи угля, использованию новых горных машин и новых перспективных технологий добычи угля. Возникла задача совместного проектирования, контроля технического состояния и управления подсистемами угольной шахты. Для решения этого расширенного комплекса задач требуются новые информационные технологии, реализованные в рамках концепции «Индустрия 4.0». Одной из наиболее перспективных является технология цифровых двойников (Digital twin) [1, 2].

Цифровой двойник является виртуальным представлением физической системы и связан с ней на протяжении всего жизненного цикла [3].

В настоящее время имеются многочисленные исследования, раскрывающие суть этого определения. Публикации посвящены классификации цифровых двойников, структуре и их реализации, использованию цифровых двойников в разных отраслях, обзору литературы по цифровым двойникам и др.

Классификация основывается на следующих типах цифровых двойников: прототипах (Digital Twin Prototype), экземплярах (Digital Twin Instance), агрегатах (Digital Twin Aggregate) и средах (Digital Twin Environment) [3, 4, 5].

Цифровой двойник «прототип» — виртуальное описание прототипа физического объекта, содержащее всю информацию, необходимую для создания физического двойника. Цифровой двойник «экземпляр» — конкретный физический объект, который остаётся связанным с этим физическим объектом на протяжении всего срока его работы. Цифровой двойник «агрегат» — взаимосвязанное множество всех экземпляров цифровых двойников. Цифровой двойник «среда» — программная среда для работы с цифровыми двойниками.

Цифровые двойники разделяются на цифровые двойники продукта, процесса, системы [6]. Цифровой двойник продукта представляет собой виртуальную модель конкретного

продукта, например некоторого изделия. Цифровой двойник процесса имитирует производственные процессы. В рамках данной работы будет рассматриваться технологический процесс подземной добычи угля в длинном очистном забое угольной шахты. Цифровой двойник системы представляет собой виртуальную модель всей системы, например угольной шахты.

В [7] представлена концептуальная структура цифрового двойника, состоящая из трёх основных частей: физического продукта, виртуального продукта и связи между физическим и виртуальным продуктом.

В [8] концептуальная структура цифрового двойника расширена. Цифровой двойник должен включать в себя пять частей: физическую часть, виртуальную часть, соединение, данные и сервисную часть. При этом подчёркивается, что каждая часть цифрового двойника одинаково важна. В описанной далее реализации используется эта концепция.

В [9] на основании систематического обзора литературы рассмотрены 87 приложений цифровых двойников в разных областях и предложена схема классификации для описания идентифицированных приложений. Отмечено, что цифровые двойники используются в различных отраслях промышленности и перечислены промышленные отрасли, в которых они применяются (упорядочены по количеству в скобках): обрабатывающая промышленность (54), авиакосмическая промышленность (5), энергетика (4), автомобильная промышленность (3), морская промышленность (3), нефтяная промышленность (2), сельское хозяйство (2), здравоохранение (2), государственный сектор (1) и горнодобывающая промышленность (1). Десять приложений цифровых двойников не были отнесены к конкретной отрасли, так как они находятся на стыке этих отраслей.

В России также имеются успешные приложения цифровых двойников, например цифровая платформа CML-BenchTM [10], и приложения в энергетике [11, 12].

В последнее время появились публикации о приложениях цифровых двойников и в горнодобывающей промышленности, например для гидрофицированной крепи [13], подъёмного ствола шахты [14], разработки цифровой шахты Белфаст (Южная Африка) [15] и цифровизации шахты СКРУ-1 (Группа «Уралкалий») [16]. Информация о разработке цифрового двойника очистного забоя угольной шахты отсутствует, что обосновывает проведение данной работы.

Разные авторы приводят различные определения цифрового двойника, наиболее полно этот перечень представлен в работе [9]. Используя определения цифрового двойника в любом контексте, можно определить общее понимание цифровых двойников как цифровых двойников физических объектов. В рамках этих определений термины «цифровая модель», «цифровая тень» и «цифровой двойник» часто используются как синонимы [17], здесь же предложена их классификация. Однако эти термины различаются уровнем интеграции данных между физическим и цифровым аналогами.

Цифровая модель — это цифровое представление существующего или планируемого физического объекта, которое не использует какую-либо форму автоматического обмена данными между физическим и цифровым объектами. Цифровое представление может содержать более или менее исчерпывающее описание физического объекта. Эти модели могут включать как имитационные модели (ИМ), так и другие модели физического объекта или технологического процесса. Цифровые данные существующих физических систем используются для разработки таких моделей, но весь обмен данными осуществляется вручную.

Цифровая тень — цифровое представление физического объекта, которое использует автоматизированный односторонний поток данных между состоянием существующего физического и цифрового объектов. Изменение состояния физического объекта приводит к изменению состояния цифрового объекта, но не наоборот.

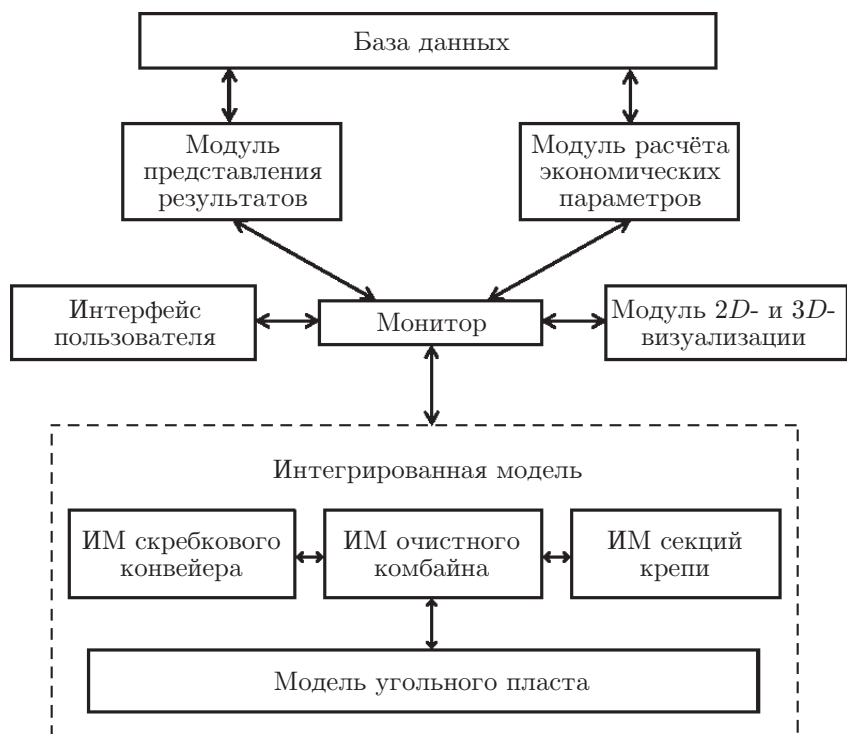


Рис. 1. Структура цифровой модели очистного забоя угольной шахты

Цифровой двойник — цифровое представление физического объекта, которое использует двусторонний обмен данными между физическим и цифровым объектами. В такой комбинации цифровой объект может действовать как управляющий экземпляр физического объекта. В зависимости от степени интегрированности изменение состояния физического объекта приводит к изменению состояния цифрового объекта, и наоборот.

Чтобы виртуальная часть цифрового двойника была чем-то большим, чем цифровая модель, она должна получать данные о внешней среде в реальном времени. В отличие от конвейерной, вентиляционной и других подсистем угольной шахты, для которых требуется получение измеряемых параметров внешней среды, например температуры, содержания метана и др., внешней средой очистного забоя является угольный пласт, горно-геологические и геомеханические параметры которого в точке нахождения очистного комбайна затруднительно измерить в реальном времени. Поэтому невозможно реализовать цифровой двойник очистного забоя в классическом виде. Более подходящим решением является цифровая модель, использующая данные соответствующей геологической модели [18], что и повлияло на постановку задачи представленной работы.

Постановка задачи. Целью предлагаемого исследования является разработка структуры цифровой модели очистного забоя угольной шахты, реализация цифровой модели с учётом специфики технологического процесса подземной добычи угля в длинном очистном забое (Longwall), демонстрация практических результатов, полученных с использованием цифровой модели.

Структура цифровой модели очистного забоя угольной шахты представлена на рис. 1, основными компонентами которой являются: горно-геологическая база данных, интегрированная модель функционирования очистного забоя и комплекс программных модулей, обеспечивающих сервисные функции и взаимодействие основных компонентов цифровой модели между собой и пользователем.

Горно-геологическая база данных включает в себя следующую информацию:

- географические координаты подземных выработок;
- географические координаты геолого-разведочных скважин и геологические данные, полученные при их бурении;
- парк горных машин и их технические параметры;
- технологические схемы выемки угля;
- технические данные, определяемые регламентом выполнения работ и требованиями техники безопасности;
- экономические данные и др.

Данные, полученные при бурении геолого-разведочных скважин, — основной источник информации о состоянии угольного пласта, которые тем или иным способом экстраполируются на весь угольный пласт. Основными данными для каждой геолого-разведочной скважины являются: мощность угольного пласта, угол его наклона, сопротивляемость резанию, метаноносность и др. (всего 20 параметров).

В настоящее время в базе данных имеется информация о 135 типах очистных комбайнов, 74 типах скребковых конвейеров и 150 типах механизированных крепей. Под типом понимаются либо разные производители, либо один производитель с различными значениями технических параметров горных машин. Пользователь может расширить базу данных, включив новую существующую горную машину или гипотетическую перспективную горную машину. Для этого требуется с помощью реализованного интерфейса заполнить значения соответствующих технических параметров.

Основными параметрами очистных комбайнов являются: вес комбайна, мощность электродвигателей, ширина захвата, диаметр шнека, максимальная скорость подачи, количество резцов и др. (всего 36 параметров).

Главными параметрами скребковых конвейеров являются: мощность конвейера, максимальная длина конвейера, ширина рештака, высота рештака, максимальная скорость конвейера и др. (всего 11 параметров).

Основными параметрами механизированных крепей являются: ширина секции крепи, скорость передвижки секции крепи, количество одновременно передвигаемых секций крепи за единицу времени и др. (всего 9 параметров).

Блок экономических данных в базе включает: стоимость горных машин, нормы амортизации на горные машины, оптовую цену угля и др. (всего 17 параметров).

Интегрированная модель функционирования очистного забоя — это имитационная модель, включающая взаимосвязанные модели горных машин и модель угольного пласта. Главным компонентом интегрированной модели является ИМ очистного комбайна, которая позволяет вычислять скорость его движения и, следовательно, производительность (количество отбитого угля в единицу времени). В работе [19] выведена формула теоретической производительности очистного комбайна при движении на прямолинейном участке лавы. Производительность зависит от двух факторов. Первый — это технические параметры очистного комбайна, которые являются постоянными и берутся из базы данных. Второй — это параметры угольного пласта, которые переменны при длине лавы в сотни метров. Например, изменение сопротивляемости угля резанию сильно влияет на скорость и соответственно производительность очистного комбайна.

По действующим нормативным документам, методикам и инструкциям расчёта производительности очистных забоев при вычислении теоретической скорости и производительности очистного комбайна используются постоянные (усреднённые) значения параметров угольного пласта. Новизной предлагаемого подхода является распределённое вычисление значений параметров угольного пласта на основе данных геолого-разведочных скважин.

При имитации движения очистного комбайна в рабочем режиме в каждый момент модельного времени ИМ очистного комбайна вызывает модель угольного пласта, пере-

давая ей свои координаты и получая обновлённые значения его параметров. При расчёте переменных значений параметров угольного пласта применяется метод обратных расстояний IDW (Inverse Distance Weighting) [20], использующий значения параметров угольного пласта в геолого-разведочных скважинах. Перечень этих параметров и метод обратных расстояний подробно изложены в работе [21].

На фактическую производительность очистного комбайна влияет маневровое движение очистного комбайна на концах лавы, взаимодействие с лавным скребковым конвейером, дебит метана. Особенностью ИМ является детальная имитация движения очистного комбайна как на прямолинейном участке, так и на концах лавы, реализация различных технологических схем выемки угля (односторонняя, челноковая, уступная).

Имитационная модель скребкового конвейера представлена как последовательность движущихся рештаков. Объём рештака и скорость движения определяются параметрами из базы данных. Если производительность очистного комбайна превышает производительность скребкового конвейера, то происходит просып, и скорость очистного комбайна искусственно снижается. По мере выемки угля очистным комбайном секции крепей и лавный скребковый конвейер продвигаются внутрь лавы. Движение очистного комбайна (в том числе и на концах лавы), а также передвижка скребкового конвейера и механических крепей наблюдаются с помощью модуля 2D- и 3D-визуализации, что на ранних этапах разработки модели использовалось для отладки и консультаций с горными инженерами. В настоящее время визуализация применяется для демонстрации работы модели и документирования. Движение всех горных машин в соответствии со скоростями и расстояниями реализуется в модели с задержками в модельном времени. В ИМ очистного комбайна осуществлена приостановка комбайна при достижении концентрации метана на исходящей струе воздуха 1 % по правилам техники безопасности.

Монитор в структуре цифровой модели является техническим модулем, обеспечивающим взаимодействие основных компонентов цифровой модели между собой и пользователем, а также выполняет преобразование форматов данных между компонентами цифровой модели. Модуль представления результатов позволяет сохранять указанные пользователем результаты модельного эксперимента в базе данных и выдавать в интегральной форме (таблицы, графики) результаты модельного эксперимента или сравнительные результаты нескольких модельных экспериментов.

В предлагаемом исследовании все случайные процессы в модели были отключены для того, чтобы сравнивать результаты моделирования различных технологических схем выемки угля для различных длин лавы в идентичных условиях. Таким образом, статистическая погрешность моделирования отсутствует. По сравнению с реальной системой в такой реализации модели отсутствует возможное наличие породных прослоек в угольном пласте.

Реализация цифровой модели. Интегрированная модель очистного забоя угольной шахты разработана с использованием системы имитационного моделирования MTSS (Manufacturing and Transportation Simulation System) [22, 23], реализованной на языке Java в среде Eclipse. Система MTSS является визуально-интерактивной процессно-ориентированной системой дискретного имитационного моделирования, предназначенной для моделирования технических систем и технологических процессов. С использованием системы MTSS были реализованы ИМ различных подсистем угольной шахты: конвейерной, водоотлива и электроснабжения [24]. Модели подсистем угольной шахты применялись как автономно, так и в составе программно-аппаратного имитационного комплекса для тестирования АСУ технологических процессов шахт и рудников [25]. Программные имитаторы и комплексы полунатурного моделирования для разработки и тестирования алгоритмов и программ управления реализуются и в других отраслях [26, 27].

Цифровая модель очистного забоя угольной шахты может быть применена к решению следующих задач:

- обоснованной оценке производительности очистного забоя, включая финансовые показатели;
- оценке эффекта использования новой техники или новой технологии;
- поддержке принятия решений при модернизации существующих и проектировании новых очистных забоев.

Для их решения пользователь должен с помощью реализованного интерфейса задать параметры модели и режимы выполнения модели, запустить модель на исполнение, наблюдать за процессом выполнения модели, используя 2D- и 3D-визуализацию, а также запустить полный прогон с возможным отключением визуализации для ускорения процесса моделирования.

При задании параметров модели пользователь должен указать число и координаты геолого-разведочных скважин, а также значения горно-геологических и геомеханических характеристик угольного пласта в этих скважинах. В базе данных имеется информация о геолого-разведочных скважинах для нескольких шахт Кузбасса. При выборе шахты эти данные автоматически загружаются в параметры модели.

Далее пользователь задаёт состав горных машин (очистной комбайн, лавный скребковый конвейер, механизированную крепь) и указывает их технические параметры. Пользователь может задать параметры гипотетических перспективных горных машин или выбрать из базы данных горные машины, имеющиеся на шахтах Кузбасса. При выборе некоторой горной машины все её технические параметры автоматически загружаются в параметры модели.

После этого пользователь задаёт линейные размеры забоя, например длину лавы, и выбирает технологическую схему работы очистного комбайна. Длина лавы существенно влияет на производительность очистного забоя. Чем больше длина лавы, тем меньше потерь времени на концевые операции. При достижении очистным комбайном границы лавы выполняется технологический процесс передвижки конвейера и подготовка комбайна к движению в противоположном направлении с зарубкой в следующий слой угольного пласта (так называемый косой заезд).

С увеличением длины лавы растут капитальные и эксплуатационные затраты, но уменьшается количество конвейерных и вентиляционных штреков в панели шахты и соответствующие расходы на их проведение. Таким образом, возникает оптимизационная задача расчёта рациональной длины лавы по условию максимума прибыли за период отработки панели шахты.

Также на производительность очистного забоя влияет выбранная технологическая схема работы очистного комбайна. Имеются три наиболее используемые технологические схемы выемки угля очистным комбайном:

- односторонняя схема — комбайн производит выемку угля при прямом ходе, а в обратном направлении — зачистку почвы, выполняя один косой заезд;
- челночная схема — комбайн вынимает уголь при движении в обоих направлениях, выполняя косой заезд два раза (на каждом конце лавы);
- уступная схема — комбайн вынимает верхний слой угля при движении в прямом направлении и нижний слой угля при движении в противоположном, выполняя один косой заезд.

Сравнение производительности различных технологических схем работы очистного комбайна, выполненное в этой работе, может быть использовано для принятия решений при модернизации забоев или при проектировании новых очистных забоев.

Далее пользователь задаёт логическое условие окончания моделирования. В частности, таким условием может быть значение модельного времени, при достижении которого

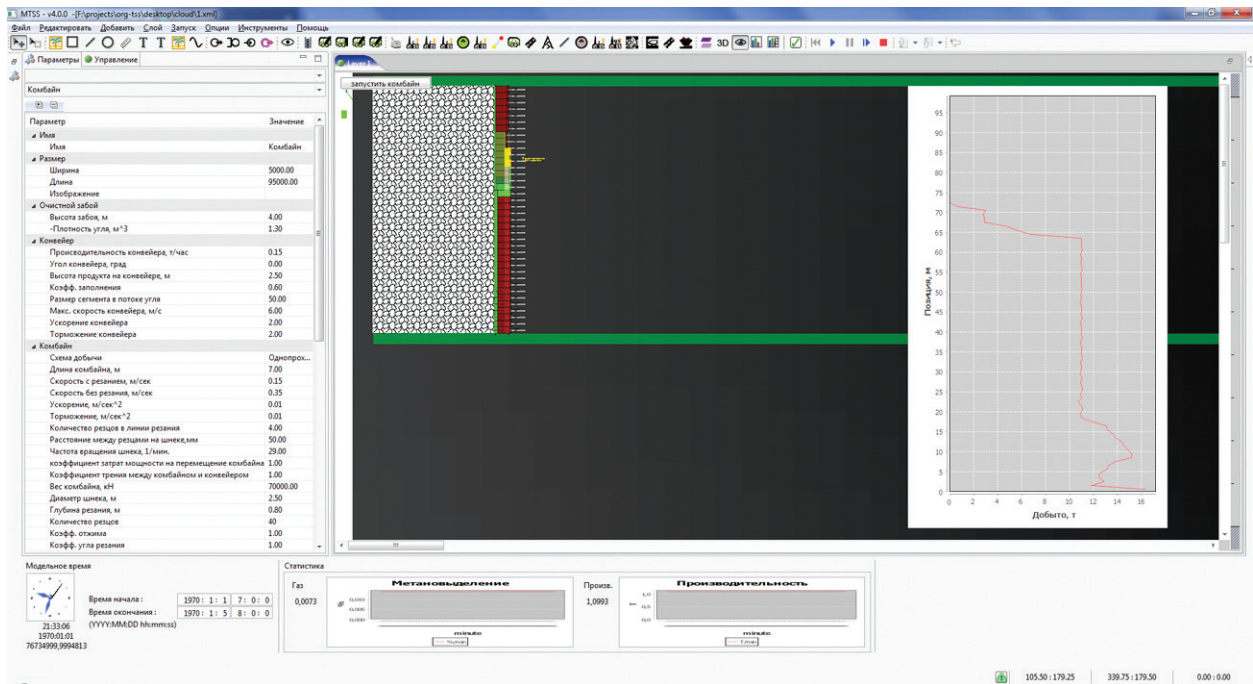


Рис. 2. 2D-визуализация выполнения цифровой модели очистного забоя угольной шахты

го выполнение модели заканчивается. Пользователь задаёт режимы исполнения модели, формы представления выходных данных модели и запускает её на исполнение. В модели реализованы следующие режимы исполнения: 2D-визуализация, 3D-визуализация, без визуализации. При исполнении модели вычисляются значения выходных параметров. Эти значения могут динамически выводиться в численном виде или в виде графиков.

На рис. 2 представлено главное окно цифровой модели, выполняющейся в режиме 2D-визуализации. В левой части главного окна выведены список всех параметров модели и их значения. На рис. 3 представлена 3D-визуализация выполнения цифровой модели.

Результаты моделирования. В качестве примера использования цифровой модели очистного забоя угольной шахты выбрана шахта им. В. Д. Ялевского Прокопьевского района Кемеровской области (лава 5005). Для этой шахты имеются доступные значения географических координат геолого-разведочных скважин и геологических данных, полученных при их бурении, что и повлияло на выбор этой шахты. В цифровой модели использовались геологические данные трёх геолого-разведочных скважин.

В цифровой модели использовались технические параметры горных машин, эксплуатируемых в лаве 5005: очистной комбайн SL-900 (мощность электродвигателей 2104 кВт, глубина захвата 0,8 м, диаметр шнека 2,5 м), лавный скребковый конвейер SH PF 6/1142 (мощность конвейера 2250 кВт, ширина рештака 1,14 м, высота рештака 0,35 м), механизированная крепь DBT 220/480 (ширина секции крепи 1,75 м, скорость передвижки секции крепи 23 м/мин.).

В цифровой модели имеются параметры, задающие регламент работы очистного забоя. В рассматриваемом примере моделировалось функционирование очистного забоя за год. Использовались следующие реальные параметры: число рабочих дней в году 351, суточные очистные работы проводились в 2,25 рабочие смены (добыча угля) по 8 часов и одну техническую смену (профилактическое обслуживание горных машин) длительностью 6 часов.

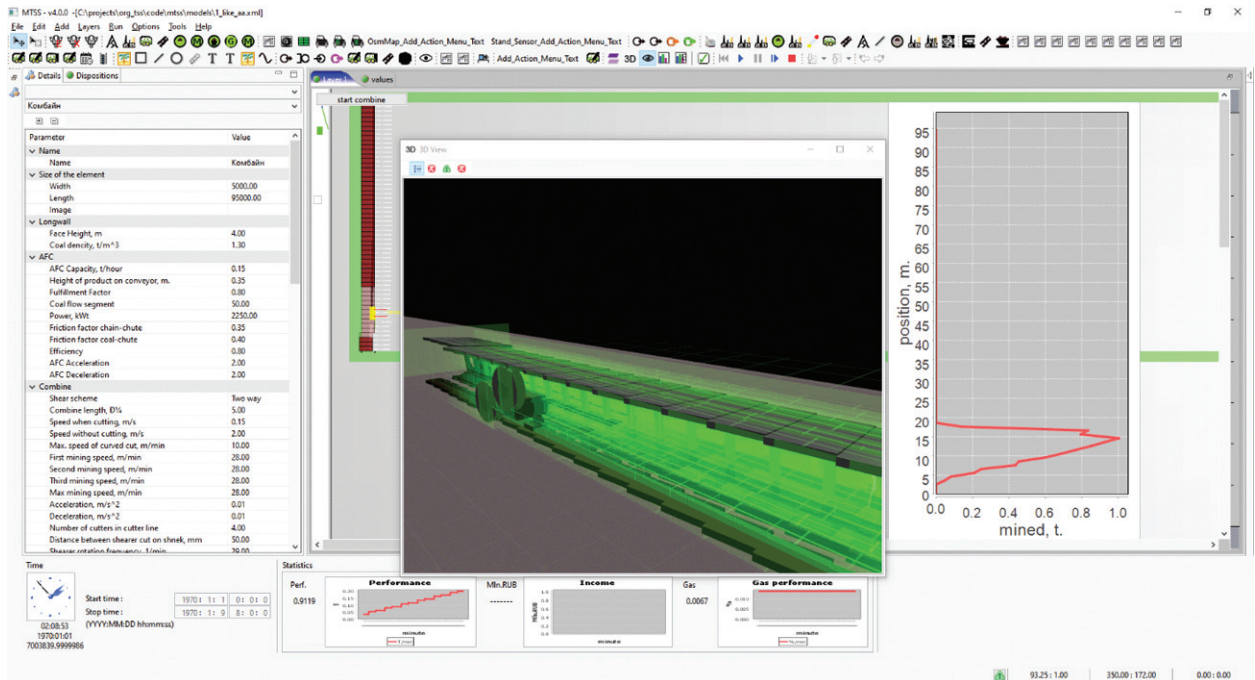


Рис. 3. 3D-визуализация выполнения цифровой модели очистного забоя угольной шахты

Целью моделирования являлось определение годовой прибыли P эксплуатации очистного забоя в зависимости от длины лавы L , вычисляемой по следующей формуле:

$$P(L) = QA(L) - H_0K_0 - (H_kK_k + H_cK_c)L,$$

где Q — оптовая цена 1 т угля (руб./т); $A(L)$ — годовая производительность очистного забоя (т); H_0 , H_k , H_c — нормы амортизации соответственно для очистного комбайна, механизированной крепи и лавного скребкового конвейера; K_0 — капитальные затраты на приобретение очистного комбайна (руб.); K_k , K_c — удельные капитальные вложения на приобретение соответственно механизированной крепи и лавного скребкового конвейера (руб./м).

Количество добытого за год угля, полученное при моделировании, по порядку совпадает с данными в [28]. Для вычисления чистой дисконтированной прибыли следует учитывать затраты на материалы, энергоресурсы и заработную плату. Соответствующие параметры включены в модель. Но значения этих параметров оказались недоступными и в этом примере не использовались.

Здесь указаны лишь некоторые параметры цифровой модели. Значения параметров частично взяты из [28], частично предоставлены Институтом горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН и ЗАО «Гипроуголь». Значения параметров соответствуют реальным за 2018–2019 гг.

На рис. 4 представлены результаты моделирования зависимости годовой прибыли шахты от функционирования очистного забоя: длины лавы и технологической схемы добычи угля. Сплошная кривая соответствует уступной технологической схеме (Bench), штриховая кривая — односторонней технологической схеме (One way) и штрихпунктирная — челночной технологической схеме (Two way).

Из рисунка видно, что наибольшую прибыль можно извлечь с использованием челночной технологической схемы и длины лавы в диапазоне 345–395 м. Дальнейшее увеличение длины лавы влияет на увеличение прибыли незначительно.

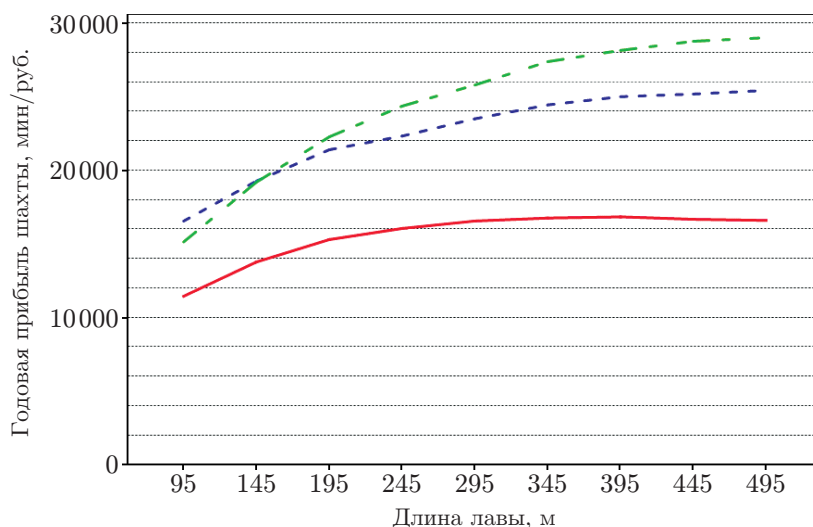


Рис. 4. Зависимость годовой прибыли очистного забоя от длины лавы и технологической схемы добычи угля

Заключение. В данной работе предложена структура цифровой модели очистного забоя угольной шахты и в соответствии со структурой выполнена реализация цифровой модели. Цифровая модель включает параметры угольного пласта, технические параметры горных машин, экономические параметры и др., позволяет решать оптимизационные задачи по увеличению производительности очистного забоя угольной шахты. Цифровая модель апробирована на реальных данных шахты им. В. Д. Ялевского Кузнецкого угольного бассейна. Результаты моделирования могут быть использованы для поддержки принятия решений по модернизации существующих и проектированию новых очистных забоев на шахтах Кузбасса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Qi Q., Tao F. Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison // IEEE Access. 2018. 6. P. 3585–3593. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2793265.
2. Uhlemann T. H. J., Lehmann C., Steinhilper R. The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for industry 4.0 // Procedia CIRP. 2017. 61. P. 335–340.
3. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Eds. F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, and A. Alves. Cham: Springer International Publishing, 2017. P. 85–113.
4. Потапов В. П., Шокин Ю. И., Юрченко А. В. Цифровые двойники как технология создания нового поколения систем экологического мониторинга горнопромышленных комплексов // Тр. XVII Междунар. конференции «Распределенные информационно-вычислительные ресурсы. Цифровые двойники и большие данные» (DICR-2019). Новосибирск, 3-6 декабря 2019. С. 9–16.
5. Jones D., Snider C., Nassehi A. et al. Characterising the digital twin: A systematic literature review // CIRP Journ. Manuf. Sci. Technol. 2020. 29. Pt A. P. 36–52.
6. Кокорев Д. С., Юрин А. А. Цифровые двойники: понятие, типы и преимущества для бизнеса // Colloquium-Journal. 2019. № 10 (34). С. 101–104.
7. Grieves M. Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication // White Paper. 2014. 1. P. 1–7.

8. **Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Y. C.** Digital twin in industry: State-of-the-art // *IEEE Trans. Ind. Informatics*. 2019. **15**, N 4. P. 2405–2415. DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.
9. **Enders M. R., Hoßbach N.** Dimensions of digital twin applications — A literature review // *Proc. of the 25th Americas Conference on Information Systems, Association for Information Systems*. Cancun, Mexico, 15-17 Aug., 2019. P. 1–10.
10. **Боровков А. И., Рябов Ю. А.** Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки // *Сб. тр. науч.-практич. конференции «Цифровая трансформация экономики и промышленности»*. Санкт-Петербург, 20-22 июня 2019. С. 234–245.
11. **Массель Л. В., Массель А. Г., Копайгородский А. Н.** Эволюция технологий исследований энергетики и применения их результатов: от математических моделей и компьютерных программ к цифровым двойникам и цифровым образам // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2019. № 4 (16). С. 5–19.
12. **Andryushkevich S. K., Kovalyov S. P., Nefedov E.** Composition and application of power system digital twins based on ontological modeling // *Proc. of the 17th IEEE Int. Conf. on Industrial Informatics (INDIN 2019)*. Helsinki-Espoo, Finland, 22-25 July, 2019. P. 1–6.
13. **Xie J., Wang X., Yang Z., Hao S.** Virtual monitoring method for hydraulic supports based on digital twin theory // *Mining Technology*. 2019. **128**, N 2. P. 77–87. DOI: 10.1080/25726668.2019.1569367.
14. **Kalinowski P., Dlugosz O., Kaminski P.** Digital twin of the mining shaft and hoisting system as an opportunity to improve the management processes of shaft infrastructure diagnostics and monitoring // *IntechOpen*. 2021. P. 1–15. DOI: 10.5772/intechopen.96193.
15. **Delivering** a digital twin to South Africa. URL: <https://www.exxaro.com/media-centre/2018/delivering-a-digital-twin-to-south-africa> (дата обращения 08.07.2021).
16. **Пономарёва Ю.** Развитие цифровых технологий в «Уралкалии». URL: <https://news.myseldon.com/ru/news/index/204295860> (дата обращения: 03.07.2021).
17. **Kritzinger W., Karner M., Traar G. et al.** Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification // *IFAC-PapersOnLine*. 2018. **51**, N 11. P. 1016–1022. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
18. **Hodgkinson J. H., Elmoultie M.** Cousins, siblings and twins: A review of the geological model's place in the digital mine // *Resources*. 2020. **9**, N 24. P. 1–14. DOI: 10.3390/resources9030024.
19. **Окольнишников В. В., Ордин А. А., Рудометов С. В.** Моделирование технологических процессов подземной добычи угля // *Автометрия*. 2019. **55**, № 4. С. 79–85. DOI: 10.15372/AUT20190409.
20. **Дэвис Дж.** Статистический анализ данных в геологии. М.: Недра, 1990. 319 с.
21. **Ордин А. А., Окольнишников В. В., Рудометов С. В., Метельков А. А.** Оценка производительности очистного комбайна при изменяющихся горно-геологических и геомеханических характеристиках угольного пласта // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2019. **55**, № 4. С. 79–85. DOI: 10.15372/AUT20190409.
22. **Рудомётов С. В.** Визуально-интерактивная система имитационного моделирования технологических систем // *Вестн. СибГУТИ*. 2011. № 3. С. 14–26.
23. **Okolnishnikov V. V., Rudometov S. V.** A system for computer simulation of technological processes // *St. Petersburg State Polytechnic University Journal Computer Science. Telecommunications and Control Systems*. 2014. **181**, N 1. P. 62–68.
24. **Okolnishnikov V., Rudometov S., Zhuravlev S.** Simulating the various subsystems of a coal mine // *Eng. Technol. & Appl. Sci. Research*. 2016. **6**, N 3. P. 993–999.

25. **Журавлев С. С.** Программно-аппаратный комплекс для тестирования программ управления АСУ ТП шахт и рудников // Вычислительные технологии. 2013. **18**. С. 150–155.
26. **Лях Т. В., Зюбин В. Е., Гаранина Н. О.** Автоматическая верификация алгоритмов управления в киберфизических системах на программных имитаторах // Автометрия. 2019. **55**, № 2. С. 103–113. DOI: 10.15372/AUT20190211.
27. **Белоконь С. А., Золотухин Ю. Н., Филиппов М. Н.** Архитектура комплекса полунатурного моделирования систем управления летательными аппаратами // Автометрия. 2017. **53**, № 4. С. 44–50. DOI: 10.15372/AUT20170405.
28. **Мешков А. А., Волков М. А., Ордин А. А. и др.** О рекордной длине и производительности очистного забоя шахты имени В. Д. Ялевского // Уголь. 2018. № 7. С. 4–8.

Поступила в редакцию 08.09.2021

После доработки 19.10.2021

Принята к публикации 20.10.2021
