

/proektirovanie-i-stroitelstvo-mnogourovnevoy-avtostoyanki-v-komplekse-s-avtovok zalom, свободный. – Загл. с экрана.

14. Постнапряженный бетон в архитектуре и строительстве [Электронный ресурс] / Amusementlogic. – Электрон. дан. – Режим доступа : <https://amusementlogic.ru/2022/12/01/postnaprjazhennyj-beton-v-arhitekture-i-stroitelstve>, свободный. – Загл. с экрана.

15. Следящие Тест-Системы [Электронный ресурс] / ООО «Следящие Тест-Системы» Электрон. дан. – Режим доступа : <http://www.stshydro.ru/technologies/posttensioning>, свободный. – Загл. с экрана.

16. СП 5.03.01-2020. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск : Минстройархитектуры, 2020. – 237 с.

17. Технология постнапряженного армирования железобетонных конструкций / Д. И. Борисов [и др.] // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. – 2023. – Т. 2, № 1. – С. 12–21.

18. Расчет предварительно напряженных конструкций на ударную нагрузку / В. В. Лалин [и др.] // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15, Вып. 4. – С. 482–495.

19. Suncoast Post-Tension [Электронный ресурс] / Suncoast Post-Tension. – Электрон. дан. – Режим доступа : <https://suncoastpt.com>, свободный. – Загл. с экрана.

УДК 622.232.8:622.275(075.80)

Анализ существующих методик моделирования процессов добычи твердых полезных ископаемых

Савичев Д. С.¹, Сиренко Ю. Г., канд. техн. наук

Санкт-Петербургский горный университет

199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2

Email: ¹savichev17@mail.ru, ²sirenkojg@mail.ru

Аннотация. Современная горная промышленность сталкивается с большим количеством испытаний: переход на альтернативные источники энергии, экономические кризисы, санкции. Для того, чтобы своевременно и успешно решать появляющиеся задачи и противостоять современным вызовам в отрасли – необходимо постоянно развивать свои технологии. Одним из современных инструментов для улучшения планирования и организации работ является компьютерное моделирование. В данной работе был проведен анализ существующих методик моделирования горных работ, разобраны последние разработки в сфере моделирования и сделан прогноз развития компьютерного моделирования технологических процессов горных работ. За прошлый год одной из главных проблем для российской угольной промышленности было перенаправление экспорта с западного направления на восточное. Для реализации этого плана нужно подготовить большое число логистических маршрутов, ведь существующие не были рассчитаны на такой трафик. В данное время Россия обеспечена нужными объемами экспортируемого угля для увеличения поставок. По официальным прогнозам, развития промышленности существует два сценария, расписанных до две тысячи тридцатого года. По версии первого, негативного из двух, общая добыча угля в стране может

упасть на двенадцать с половиной процентов по сравнению с две тысячи двадцать первым годом, примерно на пятьдесят пять миллионов тонн, а количество экспортируемого угля на тридцать процентов. Позитивный же сценарий говорит о том, что Россия потеряет в добыче только три процента, а количество экспортируемого угля снизиться на одну целую и восемь десятых процента.

Ключевые слова: горное производство, имитационное моделирование, оптимизация технологических процессов.

Analysis of existing methodologies for modelling solid mineral extraction processes

*Savichev D. S., Sirenko Y. G.
Saint Petersburg Mining University*

Annotation. Modern mining faces many challenges: the transition to alternative energy sources, economic crises, sanctions. In order to solve the emerging tasks in a timely and successful manner and to face the modern challenges in the industry – it is necessary to constantly develop their technologies. Computer simulation is one of the modern tools for better planning and management. In this paper the analysis of existing methods of mining modeling was carried out, the latest developments in the field of modeling were reviewed, and a forecast of the development of computer modeling of mining processes was made. Over the past year, one of the main problems for the Russian coal industry has been the diversion of exports from the west to the east. To implement this plan, you need to prepare a large number of logistics routes, because the existing ones were not designed for such traffic. At present, Russia is provided with the necessary volumes of exported coal to increase supply. According to official forecasts, there are two scenarios of industrial development, painted up to two thousand and thirtieth. According to the first, negative of two, the country's total coal production could fall by 12.5 per cent compared with the two thousand and twenty-first year, by about fifty-five million tons, and the amount of coal exported by thirty percent. The positive scenario suggests that Russia will lose only 3 per cent of its production, while exports of coal will decline by one and eight tenths.

Keywords: mining production, simulation modeling, optimization of technological processes.

Введение. В условиях четвертой промышленной революции предприятия подвержены структурным изменениям. В связи с этим возникает необходимость в новой промышленной политике, которая затрагивает все связанные между собой отрасли, как производственные, так и экономические. Такая политика должна основываться на детальном и оперативном анализе производственных процессов, а также на анализе взаимосвязей между различными производственными процессами. Авторы работы «Приоритеты промышленной политики в рамках Индустрии 4.0» определяют данную политику как комплекс действий, направленных на стимулирование структурных изменений в промышленности и ориентирование промышленного развития в конкретных направлениях [1]. Главное влияние такая политика должна оказывать на инновации, торговлю, право интеллектуальной соб-

ственности и человеческий потенциал. Ни одна компания не может модернизироваться без людей, которые бы трудились над этим, что приводит к потребности надлежащего обеспечения человеческого капитала.

Держа во внимании все вышеперечисленные критерии можно сказать, что горная отрасль находится сейчас в переходном этапе. Сложившиеся макроэкономические условия работы предприятий минерального сектора, которые включают в себя большой диапазон дифференциации горно-геологических и горнотехнических условий, требуют оптимального выбора и обоснования проектных решений с использованием программных продуктов. Можно сказать, что при применении моделей горных работ удастся свести к минимуму вероятность принятия неверных решений в горнодобывающей отрасли.

Моделирование процессов в горном деле в XX веке. На территории России начиная с 60-х годов созданием моделей горного производства занимались такие предприятия, как: Гипроруда, НИИКМА, ИПКОН, НИГРИ, ИГД СО АН СССР, ИГД Кольского НЦ АН СССР. Прорывным явлением в области моделирования стала конференция «Имитационное моделирование в горном деле», проведенная в 1988 году, на которой было представлено порядка 30 работ, которые являлись расчетами на компьютерах систем уравнений. Яркими представителями моделей того времени являлись [2]:

1. Сеть конвейеров шахты «Распадская» (рис. 1). В работе моделировалась конвейерная сеть для случайных значений грузопотоков с целью подбора оптимальных характеристик бункеров перегружателей.

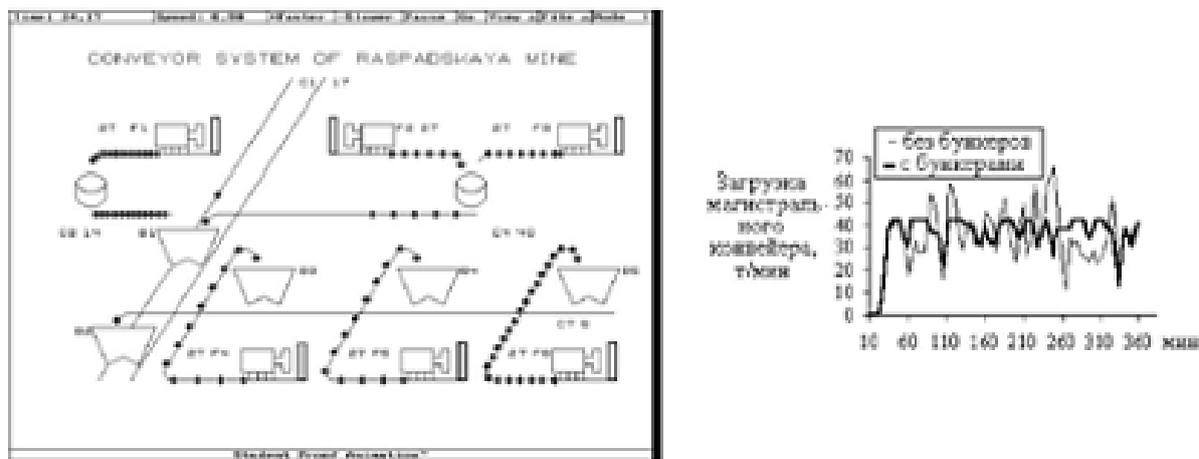


Рис. 1. Имитация работы транспортной сети шахты «Распадская»

Fig. 1. Simulation of the operation of the transport network of the Raspadskaya mine

2. Диспетчеризация конвейерно-локомотивного транспорта шахты «Комсомолец» (рис. 2). Данная модель позволила в реальном времени прогнозировать последствия решений, принимаемых горным диспетчером.

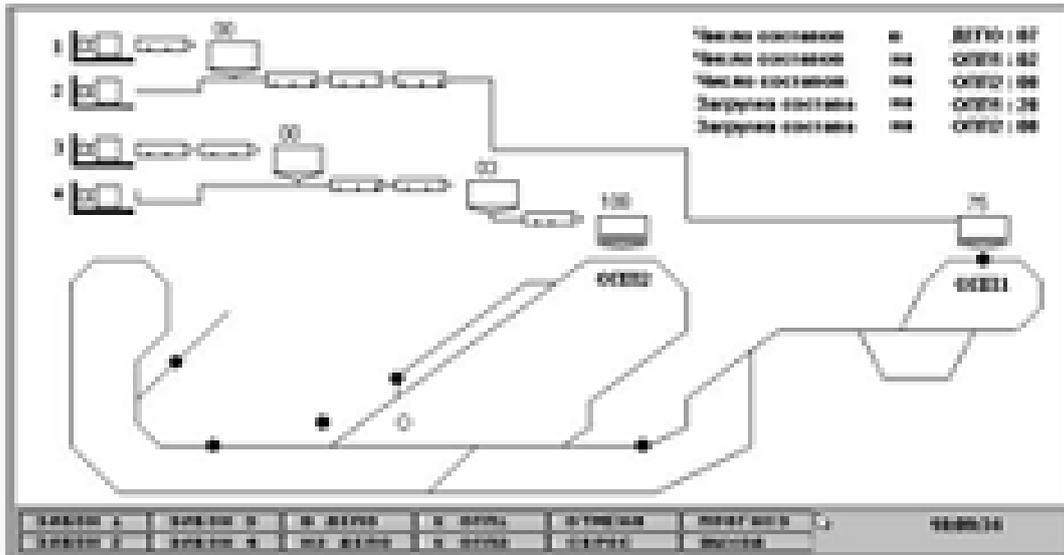


Рис. 1. Применение имитационного моделирования для диспетчеризации конвейерно-локомотивного транспорта шахты «Комсомолец»

Fig. 2. Application of simulation modeling for dispatching conveyor-locomotive transport of the Komsomolets mine

3. Взаимодействие экскаваторов и самосвалов на разрезе «Кедровский» (рис. 3). Модель позволяла оценить коэффициенты использования экскаваторов и самосвалов в транспортных узлах при случайной вариации длительности рейсов и процессов погрузки/разгрузки.

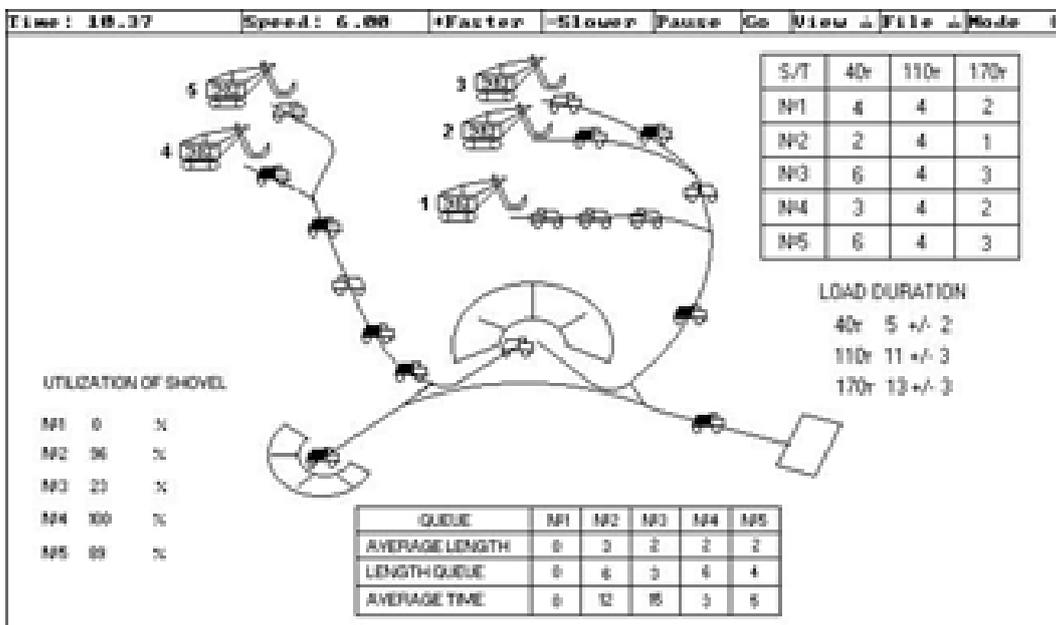


Рис. 2. Взаимодействие экскаваторов и самосвалов на разрезе «Кедровский»
Fig. 3. Interaction of excavators and dump trucks at the Kedrovsky open-pit mine

4. Имитация проходки выработки комбайном избирательного действия (рис. 4). Модель демонстрировала различные технологии проходки горных выработок, и позволяла оценивать длительность технологических операций, длину выработки и т. д.

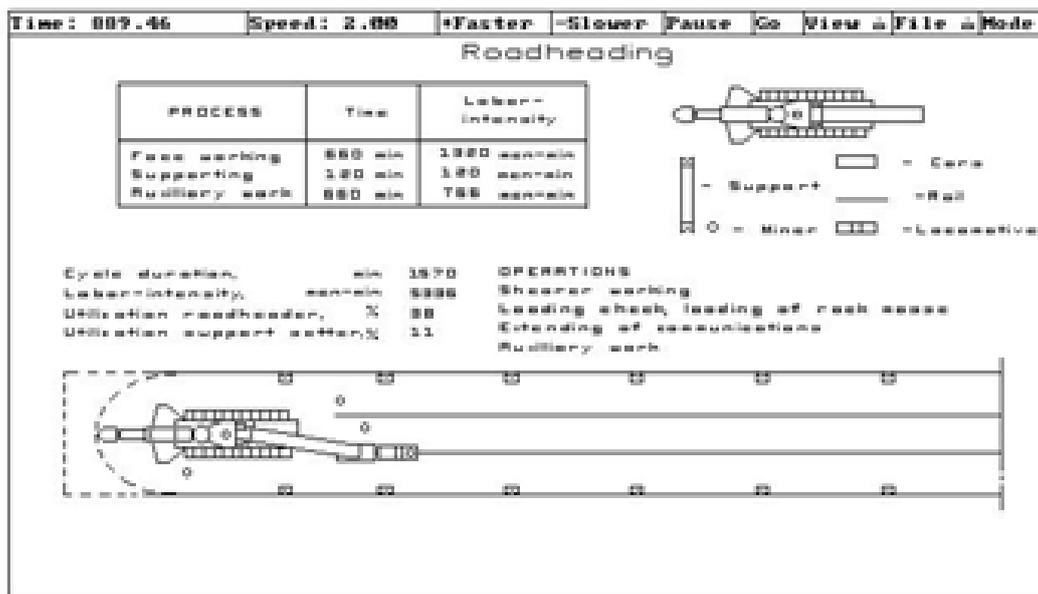


Рис. 3. Имитация проходки выработки комбайном избирательного действия
 Fig. 4. Simulation of excavation with a selective miner

Современное моделирование процессов в горном деле. Промышленные ноу-хау, аналитическая оценка и специальные эксперименты доказывают, что сокращение различий в качестве сырья для переработки руды может существенно повысить производительность и улучшить качество конечной продукции при одновременном снижении стоимости продукции. [3]. Построенная модель транспорта калийной руды по конвейерным линиям смогла продемонстрировать основные отличия нового проекта от старого, сделав акценты на ключевых вещах, которые могут заинтересовать потенциального инвестора.

При разработке угольных пластов, опасных по внезапным выбросам угля и газа, следует организовывать работу таким образом, чтобы производительность сохранялась на достаточном уровне без вреда безопасности. Большое количество метана может выделиться из зон повышенного горного давления. Одной из таких зон является массив угля около очистного забоя. Для того, чтобы проанализировать признаки, предвестники и характер этого процесса, и на основе этих данных построить показательную модель, используют методы вычислительной гидродинамики, так как законы движения жидкости и газов в данном случае сопоставимы [4]. Такая модель позволила установить и подтвердить теоретические понятия явления внезапного выброса газа, такие как закон Дарси.

Сохранение поверхности от пагубного влияния подземных горных работ – достаточно важная тема в наши дни, так как людей на планете становится больше, а вот плодородной земли нет, в некоторых местах ее количество даже уменьшается. Для того, чтобы правильно оценить последствия освоения новых глубин и выемки большего количества породы из недр, необходимо качественно и количественно понимать закономерности движения вышележащих пород. Для этих целей была создана модель клеточного автомата сдвижения пород [5], в которой авторам удалось, используя математическую базу и программирование, выявить и доказать характер подобных процессов. Работу в этом направлении продолжили авторы ра-

боты о численном моделировании зависимостей влияния литологических разностей на технологические процессы [6; 7]. Они создали модель, которая показывает влияние разниц мощностей породных слоев над пластом на вероятность обрушения. С помощью этой модели были выявлены предельные мощности, разработка которых оптимальна по сопротивлению к обрушению. Большая работа была проведена по анализу массива отработанных участков, с целью выявления характерных размеров обрушаемой основной кровли и зависимость величины ее шага обрушения от трещиноватости вышележащих пород [8]. Полученные данные позволили в начале построить физическую модель, а затем при помощи специального программного обеспечения создать имитационную модель, которая может быть применена для проектирования будущих очистных участков.

Характерным примером физического моделирования является моделирование на эквивалентных материалах. При помощи такого подхода можно моделировать процессы обрушения кровли. Такими экспериментами занимались в научном центре геомеханики Санкт-Петербургского горного университета [9]. Такая модель, как на рис. 5, позволила доказать правильность принятых проектных решений, путем демонстрации и получения натуральных результатов тех явлений, которые были рассчитаны, опираясь на зависимости и формулы.

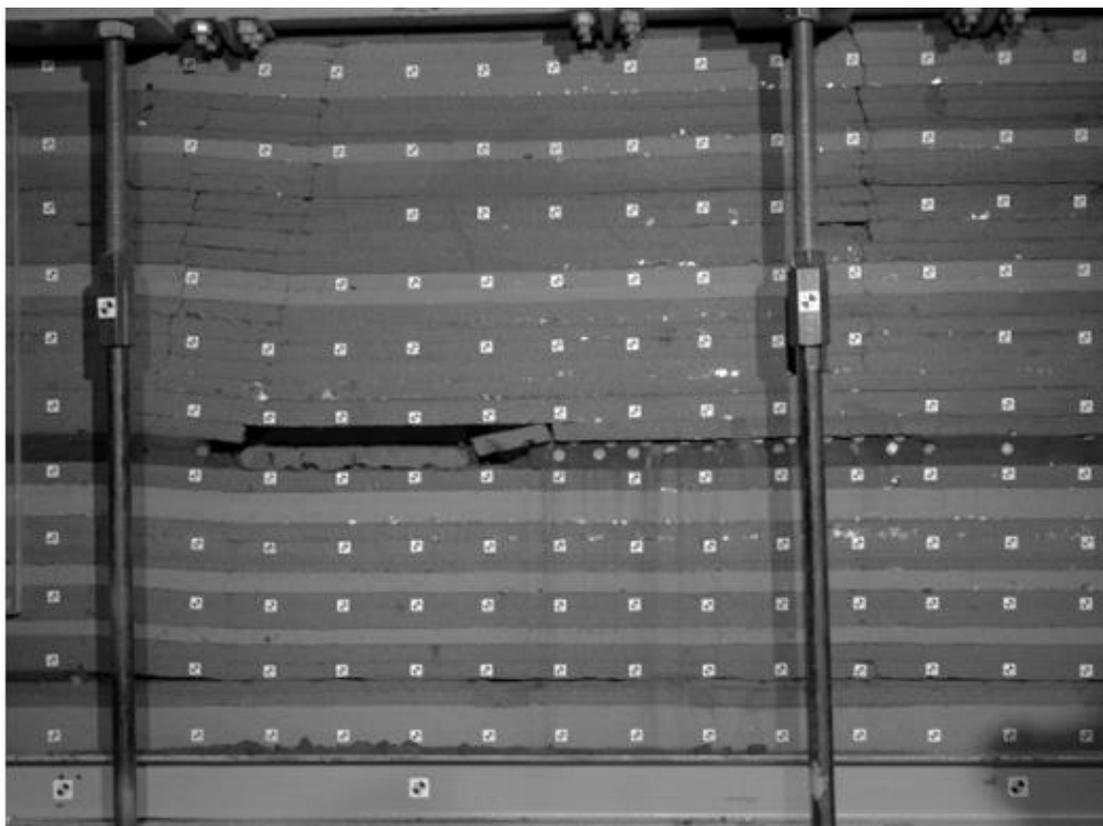


Рис. 4. Формирование зоны обрушения в модели эквивалентных материалов
Fig. 5. Collapse zone formation in the equivalent materials model

Подземная газификация угля применяется для добычи горючих газов, в которые превращается уголь под действием высоких температур, кислорода и давления. Способ добычи весьма экономичный, в связи с дешевым производством и количеством газа, получаемым при применении данного метода. Данный процесс был

воссоздан в виде одномерной числовой модели на основе конечного моделирования Галеркина, которая имитирует температуру профиля в угольном пласте, массу при тепловом переносе и химические реакции, которые происходят при сжигании угля [10]. Данная модель позволяет обеспечить стабильность расчета процесса газификации и улучшить точность вычисляемой теплотворной способности сингаза.

Одним из современных решений по оптимизации горных работ является разработка решений по удаленному контролю за оборудованием и автоматизации технологических операций [11]. Такие технологии являются ключом к решению проблем по увеличению эффективности работ и сведению к нулю вероятности появления серьезных рисков для сотрудников [12]. Авторами Кравцовым А. А. и Анищенко В. И. была проведена работа в данном направлении и установлено, что технология WebRTC является перспективной при разработке систем дистанционного управления горным оборудованием. Общая и доступная рабочая документация делает возможным интегрирование большого количества программ от разных производителей, что повлияет на сокращение издержек в работе по разработке и поддержанию программного обеспечения [13].

В работе «Моделирование технологических процессов подземной добычи угля» [14] представлена имитационная модель процессов добычи угля на одной из шахт Кузнецкого угольного бассейна. Модель направлена на оценку основных характеристик оборудования в условиях меняющихся внешних факторов. Что характерно создание этой модели производилось на собственном разработанном научным коллективом программном обеспечении, что позволяет быть независимыми в условиях введенных санкций.

Заключение. Проведя анализ существующих способов моделирования и разработанных моделей, можно прийти к заключению, что моделирование технологических процессов – это важный элемент любого современного производства, так как оно приводит к повышению качества продукции, приросту производительности, уменьшению затрат и позволяет поддерживать, а в некоторых моментах и увеличивать, уровень безопасности ведения горных работ.

Для современного производства компьютерное моделирование технологических процессов позволяет проводить исследования большого списка вариантов, проводить их комплексный сравнительный анализ, и на основании этих данных выбирать лучший из вариантов. Такой подход не только позволяет сократить сроки разработки и внедрения новых технических и научных разработок, но и значительно уменьшить вложения, так как отпадает необходимость создания реальных прототипов.

При помощи компьютерного моделирования появилась возможность выявить на ранних стадиях проектирования узкие места технологических цепочек для их оптимизации, что в свою очередь положительно скажется на общей производительности компании и уменьшит общее время внедрения новых технических решений. Также неоспоримым достижением компьютерного моделирования технологических процессов является то, что большинство нововведений возможно испытать до непосредственного внедрения на производстве, что обеспечит снижение рисков и увеличит эффективность внедрения этих технологий.

Недостатком компьютерного моделирования является его потребность в достаточном количестве точных данных о характеристиках материалов и оборудования,

многие из которых существует возможность измерить только при непосредственной их эксплуатации. Это приводит к появлению неточностей и ошибкам в создаваемой модели, что оказывает свое влияние и искажает получаемые результаты.

Важным будет отметить то, что компьютерное моделирование не способно всецело заменить собой необходимость проведения натуральных экспериментов, ведь для уточнения модели постоянно требуется вносить эмпирические данные, что позволит контролировать точность создаваемой модели.

По итогам выполненной работы можно сформулировать основные выводы:

- компьютерное моделирование обеспечивает исследование и оптимизацию технологических процессов и при этом не требует создания реальных физических прототипов, что приводит к экономии денег и времени;

- компьютерное моделирование может учитывать множество исходных параметров, которые повлияют на итоговое качество продукции и позволяет подобрать наилучшие условия для ее производства;

- применение компьютерного моделирования позволяет в ранние сроки обнаруживать узкие места производства для их оптимизации, что положительно сказывается на производительности;

- используя компьютерные модели при проектировании и эксплуатации горных производств, появляется возможность выявить воздействие различных факторов на безопасность, и как следствие, разработать необходимые организационные решения по их снижению;

- компьютерное моделирование технологических процессов – не является панацеей, так как оно не исключает необходимость проведения физических испытаний и экспериментов, для контроля точности модели;

- количество создаваемых и применяемых компьютерных моделей за последнее время возросло, так как растут возможности техники для их создания;

- существует большое количество способов моделирования, однако для моделирования процессов горного производства наиболее активно применяется математическое моделирование и его логическое развитие – имитационное.

Литература

1. Kondrat'ev, V. Industrial Policy Priorities under Industry 4.0 // World economy and international relations / V. Kondrat'ev V. Popov G. Kedrova. – 2022. – Vol. 66, No 3. – pp. 73–80.

2. Компьютерное моделирование процессов и технологий в горнодобывающей промышленности [Электронный ресурс] / Библиофонд. – Электрон. дан. – Режим доступа : <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=784982#text>, свободный. – Загл. с экрана.

3. Прогноз качества потока руды на калийном руднике с учетом логистики ее перемещения от забоев до ствола / А. К. Гец [и др.] // Горный журнал. – 2022. – № 4. – С. 49–51.

4. Discrete modeling of a longwall coal mine gob for CFD simulation / A. Juganda [et al] // International Journal of Mining Science and Technology. – 2020. – Vol. 30, No 4. – pp. 463–469.

5. Qiuji, C. Dynamic simulation for the process of mining subsidence based on cellular automata model / Qiuji Chen, Jiye Li, Enke Hou // Open Geosciences. – 2020. – Vol. 12. – pp. 832–839.

6. Liu, Chuang. Numerical simulation study on the relationship between mining heights and shield resistance in longwall panel / Liu Chuang, Li Huamin, Jiang Dongjie // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2017. – Vol. 27, No 2. – pp. 293–297.
7. Мустафин, М. Г. Анализ точности построения цифровых моделей рельефа на основе данных периодического воздушного лазерного сканирования горнопромышленного объекта / М. Г. Мустафин, А. А. Кологривко, Б. Ю. Васильев // *Горный журнал*. – 2023. – № 2. – С. 56–62.
8. Physical Experiment and Numerical Modeling on the Failure Mechanism of Gob-Side Entry Driven in Thick Coal Seam / Xinshuai Shi [et al] // *Energies*. – 2020. – Vol. 13. – p. 5425.
9. Physical modeling the formation of roof collapse zones in Vorkuta coal mines / B. Y. Zuev [et al] // *Bulletin of The Mineral Research and Exploration*. – 2019. – Vol. 162, No 162. – pp. 225–234.
10. Galerkin Finite Element Based Modeling of One-Dimensional Packed Bed Reactor for Underground Coal Gasification (UCG) Process / I. Qudsiya [et al] // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – pp. 223130–223139.
11. Adaptive Video with SCReAM over LTE for Remote-Operated Working Machines / I. Johansson [et al] // *Wireless Communications and Mobile Computing*. – 2018. – Vol. 2018, No 1. – pp. 1–10.
12. Markvardt, R. V. Relevance of using software remote control for roadheader / R. V. Markvardt // *Eurasia Science : Proceedings of XI International Scientific Conference, Moscow, 31 October, 2017. – Moscow, 2017. – pp. 107–108.*
13. Perspectives of applying webRTC for remote-controlled mining equipment / A. A. Kravtsov [et al] // *Sustainable Development of Mountain Territories*. – 2020. – Vol. 4. – pp. 592–599.
14. Okolnishnikov, V. Modelling of Technological Processes of Underground Coal Mining / V. Okolnishnikov, A. Ordin, S. Rudometov // *Computational and Information Technologies in Science, Engineering and Education*. – 2019. – Vol. 998. – pp. 153–160.