

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ УГОЛЬНОЙ
ШАХТЫ

В.В. Окольнишников, А.А. Ордин, С.В. Рудометов (Новосибирск)

В настоящее время для многих угольных шахт Кузбасса возникли проблемы обоснованного принятия решений по повышению производительности, улучшению планирования добычи угля, рациональному использованию новых горных машин и новых перспективных технологий добычи угля. Для решения этих проблем наиболее подходящим способом является имитационное моделирование. На важность использования имитационного моделирования для поддержки принятия решений по проектированию, разработке и оптимизации угольных шахт указывает большое число публикаций, например [1–5].

Для решения этих проблем в Институте вычислительных технологий СО РАН была использована система имитационного моделирования MTSS [6, 7]. Система MTSS является визуально-интерактивной процессно-ориентированной системой дискретного имитационного моделирования, предназначенной для разработки и исполнения моделей технологических процессов. Отличительной чертой системы моделирования является ориентация на пользователей, являющихся специалистами конкретной предметной области (инженеров-технологов, горных инженеров), не имеющих опыта использования универсальных систем имитационного моделирования. Быстрое построение моделей обеспечивается наличием визуально-интерактивного интерфейса и специализированных библиотек моделей технологического оборудования конкретных предметных областей. Система моделирования MTSS предоставляет пользователю следующие возможности: визуально-интерактивное построение модели, задание параметров модели, различные режимы выполнения модели, 2D и 3D визуализацию выполнения модели.

Для моделирования технологических процессов в угольных шахтах в системе моделирования MTSS разработана специализированная библиотека технологического оборудования для таких подсистем угольной шахты, как конвейерная подсистема, подсистема водоотлива, подсистема электроснабжения. С использованием специализированной библиотеки разработан ряд моделей этих подсистем для угольных шахт Кузбасса [8]. В статье рассматривается использование системы MTSS для моделирования технологических процессов добычи угля в очистном забое.

Математическая модель

По действующим нормативным документам, методикам и инструкциям расчета производительности очистных забоев теоретическая скорость очистного комбайна V и теоретическая производительность очистного комбайна A вычисляются по формулам (1) и (2):

$$V = \frac{30N\eta n_1 K_1}{SDn_2 K_o K} \text{ м/мин, (1)}$$

где N – мощность электродвигателя рабочего органа, η – КПД редуктора исполнительного органа, n_1 – количество резцов в одной линии резания, K_1 – коэффициент, учитывающий затраты мощности на перемещение комбайна, S – сопротивляемость угольного пласта резанию, D – диаметр шнеков комбайна, n_2 – количество резцов, одновременно разрушающих забой, K_o – коэффициент отжима, учитывающий уменьшение сил резания вследствие горного давления, K – коэффициент, учитывающий другие технические характеристики очистного комбайна (угол резания, ширину резца, затупление и форму резцов и др.),

$$A = \gamma m r V = \frac{30\gamma m r N \eta n_1 K_1}{SDn_2 K_o K} \text{ т/мин, (2)}$$

где γ – плотность угля, m – вынимаемая мощность угольного пласта, r – ширина захвата комбайна.

В [9] предложены более точные формулы (3) и (4) для расчета скорости V и производительности A очистного комбайна, учитывающие зависимость коэффициента K_0 от вынимаемой мощности угольного пласта, от угла падения (наклона) угольного пласта в предположении, что двушнековый очистной комбайн обрабатывает угольный пласт на полную мощность.

$$V = \frac{30N\eta n_1 K_1}{fP \cos \alpha \pm P \sin \alpha + Smn_2 K_0(m)K}, \quad (3)$$

где f – коэффициент трения между комбайном и скребковым конвейером, P – вес комбайна, α – угол падения угольного пласта. Знаки “+” (“–”) соответствуют движению комбайна “вверх” (“вниз”) по лаве, соответственно,

$$A = \frac{30\gamma m \tau N \eta n_1 K_1}{fP \cos \alpha \pm P \sin \alpha + Smn_2 K_0(m)K}. \quad (4)$$

При расчетах производительности очистного комбайна на практике используются средние значения горно-геологических и геомеханических характеристик угольного пласта. Входящие в формулу (4) горно-геологические и геомеханические характеристики угольного пласта (γ , α , S , m , $K_0(m)$) не являются постоянными, и могут существенно изменяться при отработке длинного выемочного столба. Среди этих параметров наибольшее влияние на скорость движения очистного комбайна, а, следовательно, на производительность оказывает сопротивляемость угля резанию S , которая зависит от крепости угля по шкале проф. М. Протодяконова и наличия в угольном пласте прослоек породы.

Для более корректного моделирования технологических процессов при добыче угля в очистном забое были использованы не средние горно-геологические и геомеханические характеристики, а их функциональные зависимости от текущих координат (x , y) очистного комбайна. Скорость V и производительность A очистного комбайна вычислялась по формулам (5) и (6):

$$V(x, y) = \frac{30N\eta n_1 K_1}{fP \cos \alpha(x, y) \pm P \sin \alpha(x, y) + S(x, y)m(x, y)n_2 K_0(m(x, y))K}, \quad (5)$$

$$A(x, y) = \frac{30\gamma(x, y)rN\eta n_1 K_1}{\frac{P}{m(x, y)}(f \cos \alpha(x, y) \pm \sin \alpha(x, y)) + S(x, y)n_2 K_0(m(x, y))K}, \quad (6)$$

где $x \leq L$, $y \leq L_c$, L – длина лавы, L_c – длина выемочного столба.

Для вычисления распределенных горно-геологических и геомеханических характеристик угольного пласта (γ , α , S , m , $K_0(m)$) был использован метод обратных расстояний IDW (Inverse Distance Weighting), формула (7):

$$F(x, y) = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^n d_i^{-2} F_i}{\sum_{i=1}^n d_i^{-2}}, & \text{если } d_i \neq 0 \\ F_i, & \text{если } d_i = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

где $F(x, y)$ – расчетное значение геомеханического показателя пласта в точке с координатами (x, y) очистного комбайна, n – количество геологоразведочных скважин, пересекающих выемочный столб, F_i – значение геомеханического показателя в i -ой скважине, d_i – расстояние между i -ой геологоразведочной скважиной и местоположением очистного комбайна в точке с координатами (x, y).

Имитационная модель

Формула (6) определяет максимальную производительность очистного комбайна при условии непрерывного прямолинейного движения. В общем случае на производительность очистного комбайна в очистном забое влияют следующие факторы: горно-геологическое и геомеханическое состояние угольного пласта, технические параметры очистного комбайна, технологическая схема работы очистного комбайна, передвижение секций механизированной крепи, работа скребкового конвейера, содержание газа метана.

Существует три наиболее используемые технологические схемы работы очистного комбайна: односторонняя, челноковая и уступчатая. При челноковой схеме цикл работы очистного комбайна состоит из движения комбайна в прямом и обратном ходе в рабочем режиме. При односторонней схеме цикл работы очистного комбайна состоит из движения комбайна в прямом ходе в рабочем режиме, а в обратном ходе очистной комбайн движется с маневровой скоростью и производит зачистку отбитого угля с почвы пласта.

Поскольку очистной комбайн не может "развернуться", то на границах лавы осуществляется так называемый "косой заезд". Косой заезд – это сложный технологический процесс, связанный с маневрированием комбайна, занимающий значительное время, приводящий к потере угля и др. При челночной схеме за один цикл работы комбайна осуществляется два косых заезда, при односторонней схеме – один. Кроме того, при косом заезде происходит "искривление" скребкового конвейера, что приводит к увеличению времени выполнения косого заезда.

Механизированные крепи передвигаются секциями, неготовность крепей вызывает остановку работы очистного комбайна. По технике безопасности очистной комбайн останавливается при достижении концентрации газа метана в воздухе 1 %. Все эти факторы не поддаются вероятностным оценкам и аналитическим выкладкам, что делает вычисления средних величин ориентировочными.

Особенностью реализованной имитационной модели является детальная имитация движения очистного комбайна, включая косой заезд, взаимодействие движения очистного комбайна с другими горными машинами (механизированными крепями и скребковым конвейером), распределенное вычисление горно-геологических и геомеханических состояний угольного пласта, включая газоносность, на основании данных геологоразведочных скважин. Имитационные эксперименты с реализованной моделью позволяют получать теоретически и модельно обоснованные результаты для сравнения и решения оптимизационных задач.

Перед запуском модели на исполнение пользователь с помощью системы меню выбирает состав и марки горных машин, участвующих в имитационном эксперименте (очистной комбайн, механизированные крепи, конвейеры). В системе MTSS имеется база данных горных машин, содержащая несколько десятков наименований горных машин. При выборе некоторой горной машины все технические характеристики этой машины загружаются в модель.

Далее пользователь задает число и координаты геологоразведочных скважин, а также значения горно-геологических и геомеханических характеристик угольного пласта в этих скважинах. Для нескольких шахт Кузбасса в базе данных имеется информация о геологоразведочных скважинах, которая загружается в модель автоматически.

После этого пользователь задает линейные размеры забоя, например, длину лавы, выбирает технологическую схему работы очистного комбайна, задает режимы исполнения модели, формы представления выходных данных модели и запускает модель на исполнение.

На рис. 1 представлено главное окно имитационной модели технологических процессов подземной добычи угля в очистном забое, реализованной с помощью системы имитационного моделирования MTSS.

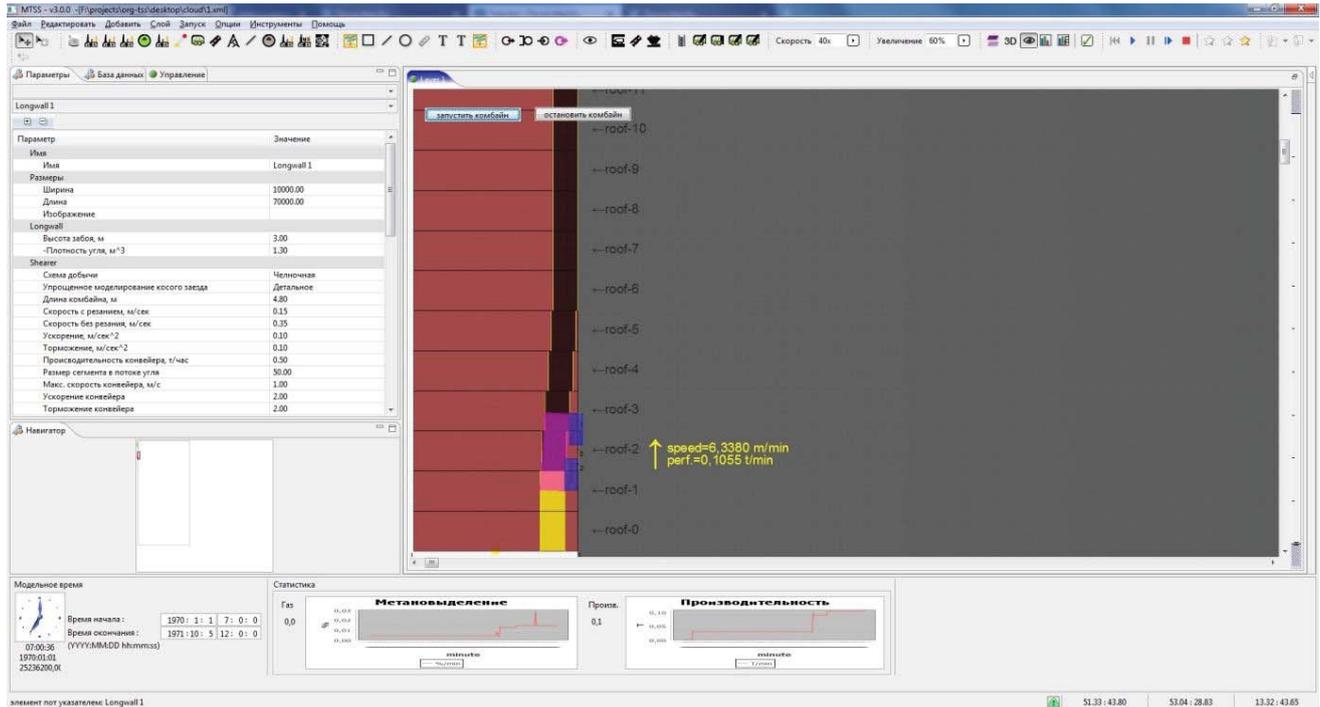


Рис. 1 – Главное окно имитационной модели

Правое серое поле изображает пласт угля, синими прямоугольниками отмечены положения двух шнеков очистного комбайна. Стрелка отображает направление движения очистного комбайна. Черные прямоугольники отображают заполненные углем решетки. Желтые прямоугольник и отображают пустые решетки. Положения секций механизированных крепей обозначены прямоугольниками коричневого цвета.

При разработке имитационной модели большое значение было уделено детальному моделированию и адекватной визуализации цикла работы очистного комбайна. На протяжении всего периода разработки модели осуществлялся контакт между разработчиками и экспертами из Института горного дела СО РАН. Детальное моделирование и визуализация позволили разработчикам получить углубленные знания о тонкостях технологического процесса, а пользователям (экспертам) получить возможность проверки правильности реализации, что повысило их уровень доверия как к имитационному моделированию в целом, так и к реализованной имитационной модели в частности.

При исполнении имитационной модели вычисляются текущие значения всех выходных параметров. Эти текущие значения могут выводиться в указанные пользователем индикаторы в главном окне модели или в виде графиков в главном окне модели или в новых окнах. На рис. 1 в нижних окнах выводятся графики текущих значений содержания газа метана и производительности очистного комбайна.

Визуализация циклов работы очистного комбайна увеличивает время исполнения модели. Для получения интегральных выходных данных визуализацию можно отключить.

С помощью имитационной модели была исследована зависимость производительности очистного комбайна от длины лавы для односторонней и челноковой технологической схемы работы очистного комбайна SL-500/1. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

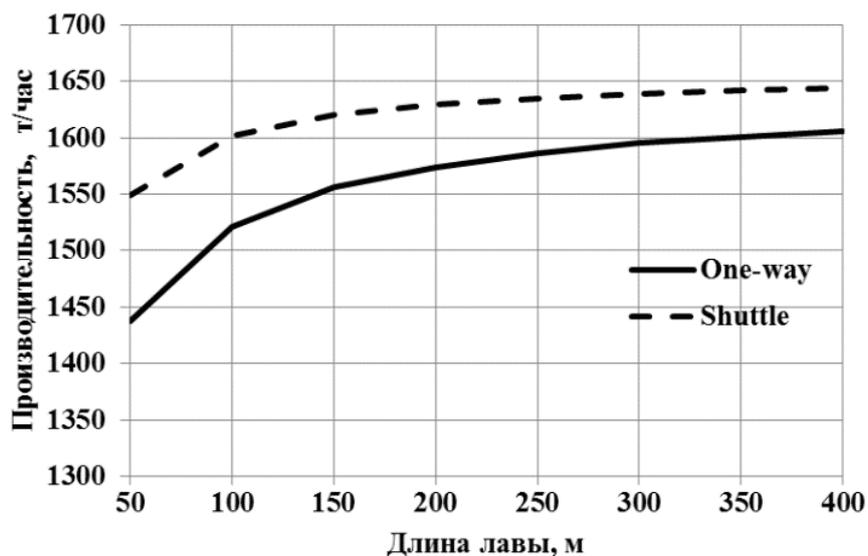


Рис. 2 – Производительность очистного комбайна SL-500/1 в зависимости от длины лавы для односторонней (One-way) и челноковой (Shuttle) технологической схемы

Полученные результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы:

Челноковая технологическая схема работы очистного комбайна является более производительной, чем односторонняя схема.

Увеличение длины лавы с некоторого значения не дает существенного прироста добычи угля.

Закключение

В реализованной модели выделение газа метана вычисляется с учетом проветривания очистного забоя как функция от количества отколотого угля и метаносности угольного пласта. Предполагается дальнейшее развитие модели в следующих направлениях: более точное вычисление метановыделения при работе очистного забоя; включение экономических показателей, например, прибыль шахты с учетом стоимости угля и стоимости работ по подготовке и эксплуатации очистного забоя; разработка системы поддержки принятия решений, основным компонентом которой является имитационная модель.

Литература

1. T.N. Michalakopoulos, C.P. Roumpos, M.J. Galetakis, and G.N. Panagiotou G.N. Discrete-Event Simulation of Continuous Mining Systems in Multi-layer Lignite Deposits // Lecture Notes in Production Engineering. Proceedings of the 12th International Symposium Continuous Surface Mining. 2015. P. 225–239.
2. P. Gospodarczyk. Modeling and Simulation of Coal Loading by Cutting Drum in Flat Seams // Archives of Mining Sciences 61(2). 2016. P. 385–379.
3. V.N. Fryanov, L.D. Pavlova, and M.V. Temlyantsev. Theoretical approaches to creation of robotic coal mines based on the synthesis of simulation technologies // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 84. 2017. P. 1–7.
4. Jinxia Liu, Chao Ma, Qingliang Zeng, and Kuidong Gao. Discrete Element Simulation of Conical Pick's Coal Cutting Process under Different Cutting Parameters // Shock and Vibration. 2018. P. 1–9. <https://doi.org/10.1155/2018/7975141>.
5. M. Kęsek, A. Adamczyk, and M. Kłaś. Computer Simulation of the Operation of a Longwall Complex Using the “Process Flow” Concept of FlexSim Software // Advances in Intelligent Systems and Computing 835. 2019. P. 97–106.
6. Рудомётов С.В. Визуально-интерактивная система имитационного моделирования технологических систем // Вестник СибГУТИ. 2011. № 3. С. 14–26.

7. 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. P. 62–68.
8. Okolnishnikov V., Rudometov S., Zhuravlev S. Simulating the Various Subsystems of a Coal Mine // Engineering, Technology & Applied Science Research. 2016. 6.,N 3. P. 993–999.
9. Ordin A. A., Metel'kov A. A. Analysis of longwall face output in screw-type cutter-loader-and-scraper conveyor system in underground mining of flat-lying coal beds // Journal of Mining Science. 2015. 51, N 6.P. 1173–1179.