

УДК 519.876.5, 622.33.013.3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧИ УГЛЯ

© В. В. Окольнішников, А. А. Ордин, С. В. Рудометов

*Институт вычислительных технологий СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 6  
E-mail: okoln@mail.ru*

Представлена комплексная имитационная модель технологических процессов подземной добычи угля в длинном комплексно-механизированном очистном забое. Выполнен ряд имитационных экспериментов. Дана оценка производительности очистного забоя в зависимости от различных факторов: технических параметров горных машин, длины лавы, газового фактора, технологических схем работы очистного комбайна, распределённых геомеханических характеристик угольного пласта.

*Ключевые слова:* шахта, очистной забой, угольный пласт, сопротивляемость угольного пласта резанию, очистной комбайн, имитационное моделирование.

DOI: 10.15372/AUT20190409

**Введение.** В настоящее время в практике проектирования угольных шахт существует несоответствие между достигнутыми на шахтах Кузбасса высокими нагрузками на длинные комплексно-механизированные очистные забои, оснащённые главным образом импортными высокопроизводительными механизированными комплексами, и существующими нормативными документами и инструкциями расчёта производительности очистных забоев [1], которые ориентируются на применение отечественных комплексов с низкой производительностью. На многих угольных шахтах возникли проблемы обоснованного принятия решений по повышению производительности, улучшению планирования добычи угля, использованию новых горных машин и новых перспективных технологий добычи угля.

Целью работы является обоснование принятия решений с использованием математического и имитационного моделирования. На важность применения имитационного моделирования для поддержки принятия решений по проектированию, разработке и оптимизации угольных шахт указывает ряд публикаций [2–6].

Для решения этих проблем в Институте вычислительных технологий СО РАН была использована система имитационного моделирования MTSS (Manufacturing and Transportation Simulation System) [7, 8]. Эта система является визуально-интерактивной процессно-ориентированной системой дискретного имитационного моделирования, предназначенной для разработки и исполнения моделей технологических процессов. Отличительной чертой системы моделирования является ориентация на специалистов 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. Пользователю MTSS предоставляет следующие возможности: визуально-интерактивное построение модели, задание параметров модели, различные режимы выполнения модели, 2D- и 3D-визуализация выполнения модели.

Для моделирования технологических процессов в угольных шахтах в MTSS разработана специализированная библиотека технологического оборудования для таких подсистем

угольной шахты, как конвейерная подсистема, подсистема водоотлива, подсистема электроснабжения. С применением специализированной библиотеки реализован ряд моделей этих подсистем для угольных шахт Кузбасса [9]. В предлагаемой работе рассматривается использование MTSS для моделирования технологических процессов добычи угля в очистном забое.

**Математическая модель.** По действующим нормативным документам, методикам и инструкциям расчёта производительности очистных забоев теоретическая скорость очистного комбайна  $V$  и теоретическая производительность очистного комбайна  $A$  вычисляются по следующим формулам:

$$V = \frac{30N\eta n_1 K_1}{SDn_2 K_0 K} \frac{\text{м}}{\text{мин}}, \quad (1)$$

где  $N$  — мощность электродвигателя рабочего органа;  $\eta$  — 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;  $K_0$  — коэффициент отжима, учитывающий уменьшение сил резания вследствие горного давления;  $K$  — коэффициент, учитывающий угол резания, ширину резца, затупление и форму резцов,

$$A = \gamma m r V = \frac{30\gamma m r N \eta n_1 K_1}{SDn_2 K_0 K} \frac{\text{т}}{\text{мин}}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  — плотность угля;  $m$  — вынимаемая мощность угольного пласта;  $r$  — ширина захвата комбайна.

В [10, 11] предложены более точные формулы для расчёта скорости  $V$  и производительности  $A$  очистного комбайна, учитывающие зависимость коэффициента  $K_0$  от вынимаемой мощности угольного пласта, от угла падения (наклона) угольного пласта с предположением, что двушнековый очистной комбайн обрабатывает угольный пласт на полную мощность:

$$V = \frac{30N\eta n_1 K_1}{fP \cos \alpha \pm P \sin \alpha + S m n_2 K_0(m) K}, \quad (3)$$

$$A = \frac{30\gamma m \tau N \eta n_1 K_1}{fP \cos \alpha \pm P \sin \alpha + S m n_2 K_0(m) K}, \quad (4)$$

где  $f$  — коэффициент трения между комбайном и скребковым конвейером;  $P$  — вес комбайна;  $\alpha$  — угол падения угольного пласта; знаки « $\pm$ » соответствуют движению комбайна вверх (вниз) по лаве.

При расчётах 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 ( $\gamma$ ,  $\alpha$ ,  $S$ ,  $m$ ,  $K_0(m)$ ) 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 Протодяконова и наличия в угольном пласте прослоек породы.

Для 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 вычислялись по формулам

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

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

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

Для вычисления распределённых горно-геологических и геомеханических характеристик угольного пласта ( $\gamma, \alpha, S, m, K_0(m)$ ) был использован метод обратных расстояний (Inverse Distance Weighting, IDW) [12]:

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

где  $F(x, y)$  — расчётное 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  $i$ -й скважине;  $d_i$  — расстояние между  $i$ -й геологоразведочной скважиной и местоположением очистного комбайна в точке с координатами  $(x, y)$ .

**Имитационная модель.** Формула (6) определяет максимальную производительность очистного комбайна при условии его непрерывного прямолинейного движения. В общем случае на производительность 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 метана.

Существуют две наиболее используемые технологические схемы работы очистного комбайна: челночная и односторонняя. При челночной схеме цикл работы комбайна состоит из движения комбайна в прямом и обратном ходе в рабочем режиме. При односторонней схеме цикл работы комбайна состоит из его движения в прямом ходе в рабочем режиме, а в обратном ходе он 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 — сложный технологический процесс, связанный с маневрированием комбайна, занимающий значительное время и приводящий к потере угля. 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.

В модели реализован комбинированный скоростной режим движения скребкового конвейера. При попутном направлении движения очистного комбайна и скребкового конвейера скорость конвейера больше скорости очистного комбайна, при встречном направлении движения скорость конвейера меньше скорости очистного комбайна. Скорость передвижения

секций крепи равна паспортной скорости. Механизированные крепи передвигаются секциями, неготовность крепей вызывает остановку работы очистного комбайна. По технике безопасности очистной комбайн останавливается при достижении концентрации метана в воздухе 1 %. Все эти факторы не поддаются вероятностным оценкам и аналитическим выкладкам, что делает вычисления средних величин по нормативным документам 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), распределённое вычисление горно-геологических и геомеханических состояний угольного пласта, а также 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 горных машин, участвующих в имитационном эксперименте (очистной комбайн, механизированные крепи, конвейеры). В системе MTSS имеется база данных горных машин, содержащая несколько десятков наименований (марок). При выборе некоторой горной машины все её технические характеристики загружаются в модель.

Далее пользователь задаёт 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.

После этого пользователь задаёт линейные размеры забоя, например длину лавы, выбирает технологическую схему работы очистного комбайна, задаёт режимы исполнения модели, формы представления выходных данных 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.

Правое серое поле изображает пласт угля, синими прямоугольниками отмечены положения двух шнеков очистного комбайна. Стрелка указывает направление движения очистного комбайна. Чёрные прямоугольники отображают заполненные углём рештаки, жёлтые прямоугольники — пустые рештаки. 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 Института горного дела СО РАН. Детальное моделирование и визуализация позволили разработчикам получить углублённые знания о тонкостях технологического процесса, а пользователям (экспертам) — 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. Например, на рис. 2 приведён график суммарного количества добытого угля. Неравномерность графика соответствует изменению скорости или остановке очистного комбайна.

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

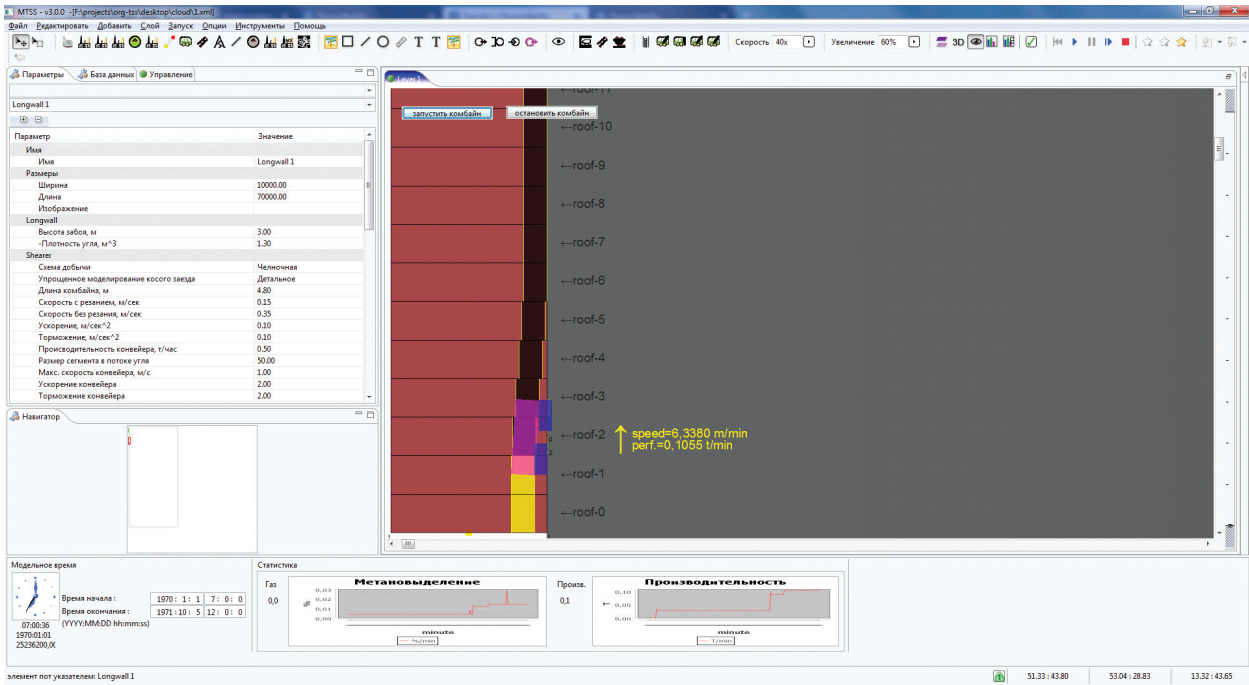


Рис. 1

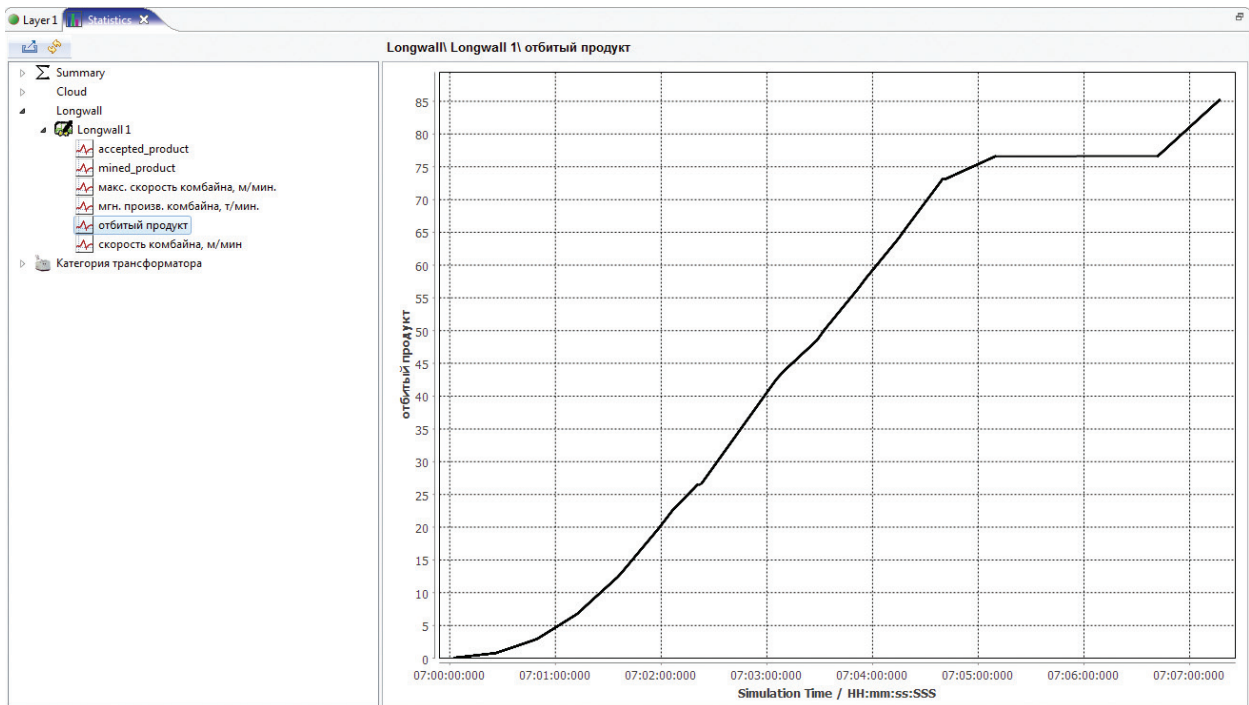


Рис. 2

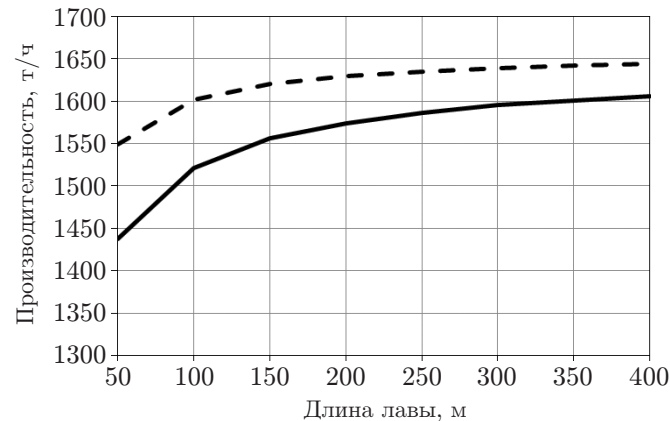


Рис. 3

С помощью имитационной модели была исследована зависимость производительности очистного комбайна от длины лавы для односторонней (сплошная кривая) и челночной (штриховая кривая) технологических схем работы очистного комбайна SL-500/1. Результаты моделирования, представленные на рис. 3, позволяют сделать следующие выводы:

- 1) челночная технологическая схема работы очистного комбайна более производительна, чем односторонняя схема;
- 2) увеличение длины лавы с некоторого значения не даёт существенного прироста добычи угля.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Методические** документы по определению нагрузок на очистные забои угольных шахт. М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 1980. 140 с.
2. **Salama A., Greberg J., Schunnesson H.** The use of discrete event simulation for underground haulage mining equipment selection // Intern. Journ. Mining Mineral Eng. 2014. **5**, N 3. P. 256–271.
3. **Fioroni M., Santos L., Franzese L. et al.** Logistic evaluation of an underground mine using simulation // Proc. of the Winter Simulation Conf. Savannah, USA, 7–10 Dec., 2014. P. 1855–1865.
4. **Michalakopoulos T. N., Roumpos C. P., Galetakis M. J., Panagiotou G. N.** Discrete-event simulation of continuous mining systems in multi-layer lignite deposits // Proc. of the 12th Intern. Symp. Continuous Surface Mining. Aachen, Germany, 2015. P. 225–239.
5. **Gospodarczyk P.** Modeling and simulation of coal loading by cutting drum in flat seams // Arch. Mining Sci. 2016. **61**, N 2. P. 385–379.
6. **Gao Y., Liu D., Zhang X., He M.** Analysis and optimization of entry stability in underground longwall mining // Sustainability. 2017. **9**, N 11. P. 2079–2088.

7. **Рудомётов С. В.** Визуально-интерактивная система имитационного моделирования технологических систем // Вестн. СибГУТИ. 2011. № 3. С. 14–26.
8. **Okolnishnikov V. V., Rudometov S. V.** A system for computer simulation of technological processes // Comput. Sci. Telecommun. Control Syst. 2014. **181**, N 1. P. 62–68.
9. **Okolnishnikov V., Rudometov S., Zhuravlev S.** Simulating the various subsystems of a coal mine // Eng., Technol. Appl. Sci. Res. 2016. **6**, N 3. P. 993–999.
10. **Ordin A. A., Metelkov A. A.** Analysis of longwall face output in screw-type cutter-loader-and-scraper conveyor system in underground mining of flat-lying coal beds // Journ. Mining Sci. 2015. **51**, N 6. P. 1173–1179.
11. **Ордин А. А., Никольский А. М.** Оптимизация ширины захвата и производительности шнекового комбайна при отработке пологого угольного пласта длинным очистным забоем // Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 1. С. 79–86.
12. **Дэвис Дж.** Статистический анализ данных в геологии. М.: Недра. 1990. 319 с.

*Поступила в редакцию 25.04.2019*

*После доработки 10.06.2019*

*Принята к публикации 20.06.2019*

---