

УДК 622.333.004.942 © В.В. Зиновьев, И.С. Кузнецов, А.Н. Стародубов, 2021

# Исследование человеко-машинного управления автосамосвалами в составе экскаваторно-автомобильного комплекса с применением имитационного моделирования\*

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2021-7-9-12>

С применением имитационного моделирования исследовано влияние долей дистанционного и автоматического управления, количества операторов и управляемых ими автосамосвалов на производительность вскрышного забоя, степень использования операторов и простои автосамосвалов при человеко-машинном управлении на угольном разрезе. В экспериментах установлено наиболее эффективное сочетание количества операторов и автосамосвалов, автоматизированных и роботизированных на разных уровнях.

**Ключевые слова:** экскаваторно-автомобильный комплекс, угольный разрез, вскрышной забой, простои, автоматизация, роботизация, человеко-машинное управление, имитационное моделирование, вычислительный эксперимент.

**Для цитирования:** Зиновьев В.В., Кузнецов И.С., Стародубов А.Н. Исследование человеко-машинного управления автосамосвалами в составе экскаваторно-автомобильного комплекса с применением имитационного моделирования // Уголь. 2021. № 7. С. 9-12. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-7-9-12.

## ВВЕДЕНИЕ

При добыче угля открытым способом с использованием традиционных технологий люди вынуждены работать в загрязненной среде, шуме, пыли, вибрациях. Все это существенно осложняет присутствие и участие человека в технологических процессах и снижает эффективность угольного разреза. Поэтому основным направлением повышения безопасности горных работ и эффективности добычи в данных условиях являются разработка и внедрение безлюдных технологий на основе применения средств

## ЗИНОВЬЕВ В.В.

Канд. техн. наук, доцент,  
старший научный сотрудник  
ФИЦ УУХ СО РАН,  
650000, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: zv150671@gmail.com

## КУЗНЕЦОВ И.С.

Аспирант ФИЦ УУХ СО РАН,  
650000, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: is150794@mail.ru

## СТАРОДУБОВ А.Н.

Канд. техн. наук, доцент,  
старший научный сотрудник  
ФИЦ УУХ СО РАН,  
650000, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: a.n.starodubov@gmail.com

автоматизации и роботизации на различных уровнях от дистанционного управления до полной роботизации, при которой горная машина на основе анализа информации самостоятельно принимает решения по выполнению той или иной операции. В настоящее время разработкой средств автоматизации и роботизации для управления автосамосвалами, экскаваторами, погрузчиками занимается ряд компаний: ООО «ВИСТ Групп» (входит в ГК «ЦИФРА»), «Remote control technologies (RCT)», «Cavotec», «Specto Remote», «Dynamic Automation Systems» (DAS), «Modular mining system», «Caterpillar», «Komatsu», ПАО «Камаз», «Inner Mongolia North Heavy Industries Group Co., Ltd» [1].

В зависимости от объема человеческого участия в процессе управления горными машинами развитие уровня автоматизации и роботизации можно представить в виде трех основных этапов: дистанционное управление (дубли-

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90031 «Разработка специализированной компьютерной системы имитационного моделирования для исследования параметров безлюдной открыто-подземной геотехнологии».

рующее управление на безопасном для оператора удалении); комбинированное (управление машиной при выполнении наиболее сложных операций и работ, требующих творческого подхода, которое осуществляется оператором в режиме дистанционного управления, при этом рутинные операции осуществляются в автоматическом режиме); полностью роботизированное (позволяет использовать технику в полностью автономном режиме, под управлением программно-аппаратного комплекса, лишённого потребности в непосредственном участии оператора для выполнения операций технологического цикла. В настоящее время для ведения открытых горных работ наиболее отработаны решения по человеко-машинному управлению, где выполнение сложных операций, таких как установка автосамосвалов на погрузку/разгрузку, находится в ведении оператора в дистанционном режиме, а монотонный труд, сводящийся в основном к автономному движению автосамосвалов в порожнем/груженом состояниях по заданной траектории, отдан автоматике [2]. Разделение процесса управления горной машиной на дистанционно и автоматически управляемые операции позволяет одному оператору чередовать управление несколькими машинами: пока одна машина работает в автоматическом режиме, можно перейти к дистанционному управлению другой машиной. Такая идея была высказана еще в 1989 г. и с 1993 г. реализуется на практике [3].

При человеко-машинном управлении автосамосвалами, когда часть операций выполняется устройством управления, а другая часть – дистанционно оператором, возникают задачи по исследованию влияния долей дистанционного и автоматического управления, количества управляемых автосамосвалов и количества операторов на производительность забоя, степень загруженности операторов, а также простои автосамосвалов по причине ожидания операторов.

Проверка таких задач в реальных условиях угольного разреза требует крупных затрат, так как от их решения будут зависеть оснащение автосамосвалов средствами навигации, позиционирования, формирование алгоритмов дистанционного и автоматического управления, создание распределенной сети для обмена цифровой информацией в реальном времени. Поэтому для решения подобных

задач применяют математическое моделирование. Традиционные аналитические методы моделирования работы экскаваторно-автомобильного комплекса (ЭАК), как правило, не учитывают динамику и вероятностные значения длительности выполнения основных процессов, а основываются на усредненных или крайних значениях интервалов с применением ряда допущений [4]. Все это негативно влияет на адекватность модели и понижает точность и достоверность результатов экспериментов. Для отображения различных сложных систем в динамике с учетом случайных факторов, в том числе в горном деле, хорошо себя зарекомендовал подход с использованием теории массового обслуживания (ТМО) [5].

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОСАМОСВАЛАМИ В СОСТАВЕ ЭАК

Концептуальная модель системы «операторы – автосамосвалы» разработана в виде замкнутой системы массового обслуживания (СМО) (рис. 1).

В СМО поступающие заявки соответствуют автосамосвалам, используемым в ЭАК. Операторы представлены в виде многоканального устройства, в котором заявка задерживается на время выполнения соответствующего процесса при дистанционном управлении автосамосвалом от оператора. Если по прибытии заявки операторы заняты, она становится в очередь и ожидает обслуживания. После обслуживания у операторов каждая заявка задерживается на время автономного управления автосамосвалами  $T_1, T_2, \dots, T_F$ , по истечении которого снова поступает на обслуживание к операторам. При полной автоматизации и роботизации автосамосвалов (пятый уровень) время обслуживания заявок операторами равно нулю. Выходной поток представляет последовательность выполненных запросов на управление автосамосвалами. Каждый из автосамосвалов может находиться в одном из трех состояний: оператор дистанционно управляет процессом; автосамосвал выполняет процессы в автоматическом режиме; автосамосвал ожидает команду оператора. Выбор заявки на управление из очереди для обслуживания осуществляется по правилу FIFO (первый пришел – первый обслужен).

По результатам идентификации законов распределения выявлено, что процессы движения, установки автосамосвалов распределены по Гамма-закону, следовательно, не являются марковскими [5]. Несмотря на высокий уровень развития теории массового обслуживания, приближенные аналитические методы для моделирования таких процессов не всегда реализуемы и могут привести к чрезмерному объему вычислений и/или к высокому уровню погрешности. Поэтому для решения таких систем рекомендуется применять имитационное моделирование [6].

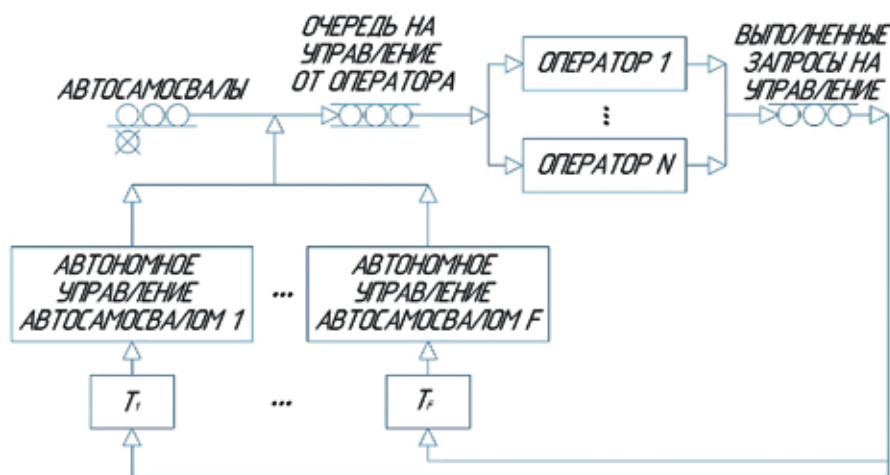


Рис. 1. Концептуальная модель системы «операторы – автосамосвалы» в виде СМО

Отображенная на *рис. 1* концептуальная модель реализована в среде имитационного моделирования GPSS-Studio [7]. Имитировалась работа одного ЭАК, работающего на ООО СП «Барзасское товарищество». Исследуемый ЭАК включает в себя один экскаватор марки ЭКГ-10 и четыре автосамосвала марки БелАЗ-7513. Использовалась тупиковая схема установки на погрузку. После погрузки автосамосвалы транспортируют вскрышную породу, двигаясь со средней скоростью 5,48 м/с на отвал. Дальность транспортировки – 2470 м. После разгрузки порожние автосамосвалы возвращаются обратно к экскаватору, двигаясь со средней скоростью 6,52 м/с. Плановые и внеплановые простои горных машин не учитывались. При дистанционном и автоматизированном управлении вместо БелАЗ-7513 в модельных экспериментах использовались БелАЗ-7513R [8]. Предполагалось, что при дистанционном управлении скорость движения автосамосвалов увеличивается в 1,25 раза, а при роботизированном – в 1,5 раза по сравнению с традиционным штатным управлением [1]. Также при дистанционном управлении длительность установки автосамосвалов на погрузку увеличивается в 1,78 раза, а на разгрузку – в 1,28 раза [9]. При автоматизированном и роботизированном управлении длительность этих процессов сокращаются в два раза [8].

При проведении имитационных экспериментов принята следующая схема уровней автоматизации и роботизации автосамосвалов (*см. таблицу*).

В экспериментах изменялось количество операторов от 1 до 5, количество автосамосвалов от 1 до 6 и уровень автоматизации и роботизации процессов – от 0 до 5. На выходе оценивались: производительность вскрышного забоя (т/сут.), степень загруженности оператора, среднее время ожидания автосамосвалами оператора (с), средний размер очереди заявок, ожидающих

**Уровни автоматизации и роботизации процессов, выполняемых автосамосвалами**

Уровень	Выполняемый процесс
0	-
1	Только груженный ход
2	Груженный и порожний ход
3	Груженный, порожний ход и установка на погрузку
4	Груженный, порожний ход, установка на погрузку и установка на разгрузку
5	Груженный, порожний ход, установка на погрузку, установка на разгрузку и разгрузка

оператора (шт.). Часть результатов исследований представлена на *рис. 2*.

Установлено, что введение второго оператора, управляющего автосамосвалами с нулевым уровнем автоматизации и роботизации даст прирост суточной производительности вскрышного забоя на 42%, а добавление третьего оператора увеличит производительность на 27%. При управлении автосамосвалами с первым уровнем автоматизации и роботизации прирост производительности составит 37% при добавлении второго оператора и 10% при добавлении третьего оператора. При дальнейшем повышении уровня автоматизации и роботизации максимальную производительность в 37356 т/сут. сможет обеспечить один оператор при степени его загруженности 36%, одновременно управляющий пятью автосамосвалами с автоматизированными и роботизированными процессами груженого/порожнего хода и установки на погрузку (третий уровень роботизации). Также в рассматриваемых условиях нецелесообразно увеличивать число автосамосвалов более чем на пять и повышать уровень их автоматизации и роботизации выше третьего, так как это не повысит производительность вскрышного забоя.

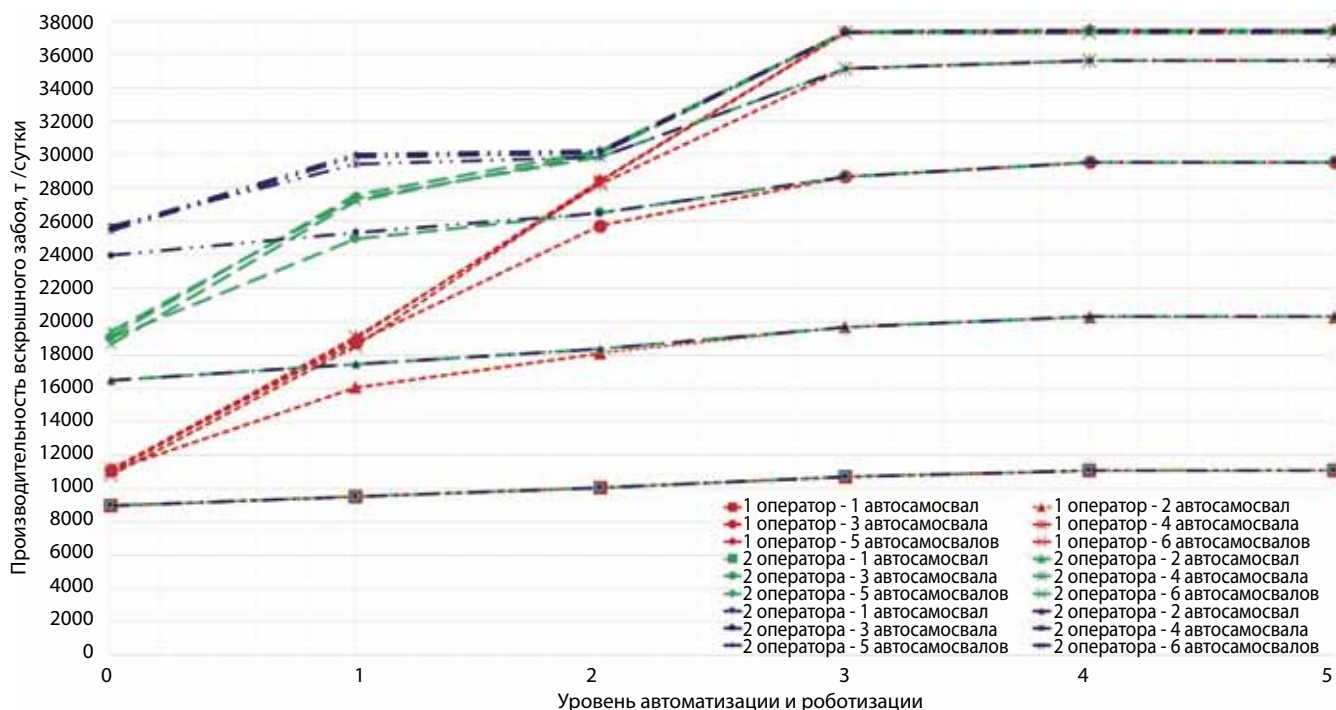


Рис. 2. Зависимость суточной производительности вскрышного забоя от уровня автоматизации и роботизации процессов, количества автосамосвалов и операторов

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование человеко-машинного управления автосамосвалами в составе ЭАК при помощи имитационного моделирования позволяет решать задачи по определению влияния долей дистанционного и автоматического управления, количества управляемых автосамосвалов и количества операторов на производительность забоев, степень загруженности экскаваторов и операторов, а также простои автосамосвалов, определять наиболее эффективное сочетание количества операторов и автосамосвалов, автоматизированных и роботизированных на различных уровнях.

## Список литературы

1. Журавлев А.Г. Тенденции развития транспортных систем карьеров с использованием роботизированных машин // Проблемы недропользования. 2014. № 3 (3). С. 164-175.
2. Клебанов Д.А. Разработка технико-технологических решений по созданию и применению роботизированных систем грузоперевозок: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 21 с.

3. Коных В.Л., Тайлаков О.В. Предпроектный анализ шахтных робототехнических систем. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение. 1991. 182 с.

4. Стенин Д.В. Перспективы развития производства автономных тяжелых платформ для безлюдной добычи полезных ископаемых // Горное оборудование и электромеханика. 2019. № 6. С. 3-8.

5. Воронов А.Ю. Оптимизация эксплуатационной производительности экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов: дис. ... канд. техн. наук. Кемерово, 2015. 195 с.

6. Задорожных В.Н. Методы аналитико-имитационного моделирования систем с очередями и стохастических сетей: автореф. дис. ... доктора техн. наук. СПб., 2011. 36 с.

7. Элина Компьютер. [Электронный ресурс]. URL: <http://elina-computer.ru/> (дата обращения: 15.06.2021).

8. Владимиров Д.Я. Обоснование параметров роботизированных горнотехнических систем в осложненных условиях открытой разработки месторождений полезных ископаемых: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2016. 195 с.

9. Зырянов И.В., Ильбульдин Д.Х., Кондратьев А.П. Параметры системы дистанционного управления горнотранспортным оборудованием в условиях Удачинского ГОКа // Горная промышленность. 2016. № 5. С. 49-51.

## Original Paper

UDC 622.333.004.942 © V.V. Sinoviev, I.S. Kuznetsov, A.N. Starodubov, 2021  
ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2021, № 7, pp. 9-12  
DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2021-7-9-12>

## Title

**STUDIES INTO MAN-MACHINE CONTROL OF DUMP TRUCKS AS PART OF EXCAVATOR-AND-TRUCK COMPLEX USING SIMULATION MODELING**

## Authors

Sinoviev V.V.<sup>1</sup>, Kuznetsov I.S.<sup>1</sup>, Starodubov A.N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of SB RAS, Kemerovo, 650000, Russian Federation

## Authors Information

**Sinoviev V.V.**, PhD (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher, e-mail: [zv150671@gmail.com](mailto:zv150671@gmail.com)

**Kuznetsov I.S.**, Graduate Student, e-mail: [is150794@mail.ru](mailto:is150794@mail.ru)

**Starodubov A.N.**, PhD (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher, e-mail: [a.n.starodubov@gmail.com](mailto:a.n.starodubov@gmail.com)

## Abstract

The impact of remote and automatic control shares, the number of operators and dump trucks controlled by these operators on the productivity of the stripping face, the degree of operators' utilization and downtime of dump trucks in conditions of man-machine control in a coal strip mine was investigated using simulation modeling. The most efficient combination of the number of operators and dump trucks with various degrees of automation and robotization has been experimentally established.

## Keywords

Excavator-and-truck complex, Open-pit coal mine, Stripping face, Downtime, Automation, Robotization, Man-machine control, Simulation modeling, Computational experiment.

## References

1. Zhuravlev A.G. Trends in development of open-pit transport systems using robotic equipment. *Problemy nedropol'zovaniya*, 2014, (3), pp. 164-175. (In Russ.).
2. Klebanov D.A. Development of technical and technological solutions for creation and implementation of robotic transportation systems. PhD (Engineering) diss. Moscow, 2015. 21 p. (In Russ.).
3. Konyukh V.L. & Tailakov O.V. Pre-project analysis of mine robotics systems. Novosibirsk, Nauka Publ., Siberian Branch, 1991, 182 p. (In Russ.).
4. Stenin D.V. Development prospects of heavy autonomous platforms for unmanned mining. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, 2019, (6), p. 3-8. (In Russ.).

5. Voronov A.Yu. Optimization of operational performance of excavator-and-truck complexes in open-pit mines. PhD (Engineering) diss. Kemerovo, 2015, 195 p. (In Russ.).

6. Zadorozhnykh V.N. Methods of analytical and simulation modeling of queueing systems and stochastic networks. Dr. eng. sci. diss. St.Petersburg, 2011, 36 p. (In Russ.).

7. Elina Computer. [Electronic resource]. Available at: <http://elina-computer.ru/> (accessed 15.06.2021). (In Russ.).

8. Vladimirov D.Ya. Justification of parameters for robotic mining systems in complicated conditions of surface mining of mineral deposits. PhD (Engineering) diss. Magnitogorsk, 2016, 195 p. (In Russ.).

9. Zyryanov I.V., Ylbuldin D.Kh. & Kondratyuk A.P. Parameters of remote control system for mining transport equipment in conditions of Udachinskiy Mining and Processing Plant. *Gornaya promyshlennost'*, 2016, (5), pp. 49-51. (In Russ.).

## Acknowledgments

The research was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project No.19-37-90031 "Development of dedicated computer system of simulation modeling for studying parameters of unmanned surface and underground geotechnology".

## For citation

Sinoviev V.V., Kuznetsov I.S. & Starodubov A.N. Studies into man-machine control of dump trucks as part of excavator-and-truck complex using simulation modeling. *Ugol'*, 2021, (7), pp. 9-12. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2021-7-9-12.

## Paper info

Received April 09, 2021

Reviewed May 27, 2021

Accepted June 15, 2021