

УДК 622, 004.942

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕПЛАНОВЫХ ПРОСТОЕВ ГОРНЫХ МАШИН НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Кузнецов И.С., Зиновьев В.В., Стародубов А.Н., Николаев П.И. (Кемерово)

### Введение

При добыче угля открытым способом наибольшие затраты приходятся на вскрышные работы, объем которых превышает объем добычи угля примерно в 7 раз [1]. Основными технологическими процессами при отработке подготовленной вскрышной породы являются ее погрузка и транспортирование на внутренний или внешний отвалы, используя экскаваторы и автосамосвалы. В совокупности данные машины представляют собой экскаваторно-автомобильный комплекс (ЭАК).

При работе ЭАК возникают вероятностные внеплановые простои горных машин, вызванные организационными и/или аварийными причинами. Такие простои с учетом продолжительности их устранения могут занимать до 57% рабочего времени, что приводит к прекращению горных работ и снижению эффективности функционирования ЭАК [2,3]. В настоящее время после установления факта возникновения внеплановых простоев осуществляют их фиксацию и разработку предложений по минимизации их влияния на показатели эффективности работы ЭАК. Эти предложения применяют при дальнейшем ведении горных работ, но при этом уже полученные потери от простоев остаются невосполнимыми. Актуальной является задача предварительного исследования на математических моделях влияния внеплановых простоев горных машин на эффективность работы ЭАК с целью разработки мероприятий по их устранению еще до начала ведения горных работ.

### Методы решения задачи

Основными технологическими процессами при работе ЭАК являются погрузка экскаватором горной массы в автосамосвалы, транспортирование горной массы, выполнение маневровых работ автосамосвалами перед загрузкой и разгрузкой, разгрузка горной массы, порожний ход автосамосвалов. Подобные процессы удобно представлять в виде конечных дискретных событий, время между которыми является случайной величиной. Для отображения систем с такими процессами широко применяют метод математического моделирования, основанного на теории массового обслуживания (ТМО) [4, 5], элементы которой использованы для построения концептуальной модели работы ЭАК с учетом внеплановых простоев. Для анализа и исследования СМО используют численные методы, основанные на марковских и полумарковских моделях, предполагающих пуассоновский входной поток заявок, экспоненциальный закон распределения времени их обслуживания, однородные заявки, простейшую дисциплину обслуживания [4, 6]. Для исследования немарковских сложных сетей массового обслуживания используют имитационное моделирование, которое применено для исследования влияния внеплановых простоев горных машин при работе ЭАК.

### Результаты

Разработана концептуальная дискретно-стохастическая динамическая модель работы ЭАК с учетом внеплановых простоев горных машин в виде замкнутой системы массового обслуживания (СМО). Сеть состоит из трех узлов, отображающих прибытие и установку автосамосвалов под погрузку (СМО вида  $G1/G2/m_{погр}/N_{ac}$ ), погрузку вскрышной породы экскаватором в автосамосвалы (СМО вида  $G1/G2/1/0$ ), прибытие и работу автосамосвалов в пунктах разгрузки (СМО вида  $G1/G2/m_{раз}/H_{ac}$ ) (рис. 1).



Неоднородные заявки во входном потоке представляют собой автосамосвалы различной грузоподъемности, закрепленные за определенным экскаватором. Общее количество поступающих заявок, в конкретный забой  $N_{ac}$  принимается в интервале  $1 \leq N_{ac} \leq 20$ . Каждая  $i$ -я заявка-автосамосвал проходит через одноканальные (экскаватор) и многоканальные (автосамосвалы, пункты разгрузки, места для установки под погрузку) обслуживающие устройства. Задержкой заявок в этих устройствах отображаются работы по погрузке вскрышной породы в автосамосвал и разгрузке. Время обслуживания  $i$ -ой заявки  $t_i$  на каждом  $j$ -ом процессе является случайным и задается законом распределения с плотностью вероятностей  $f(x)$ . Значения параметров, характеризующих распределение, определяются по хронометражным данным, либо рассчитываются по известным формулам [3, 7-10]. В случае занятости обслуживающих устройств поступившие заявки выстраиваются в очередь. Дисциплина обслуживания заявок осуществляется по правилу *FIFO*. Выходной поток представляет собой обслуженные заявки в пунктах разгрузки. Моделирование внеплановых простоев экскаваторов и автосамосвалов в СеМО отображается введением дополнительного источника заявок, которые вводятся в модель через вероятностные интервалы времени, соответствующие периодичности возникновения того или иного простоя. После появления заявки-простоя закрываются своеобразные «клапаны», тем самым ограничивая доступ заявок-автосамосвалов к обслуживающим устройствам на время устранения простоя.

Разработанная СеМО, помимо эксплуатационной производительности ЭАК, позволяет также определять коэффициент использования экскаватора, среднюю продолжительность погрузки вскрышной породы экскаватором, среднюю продолжительность ожидания автосамосвалами погрузки вскрышной породы экскаватором, среднее количество автосамосвалов, ожидающих погрузки вскрышной породы экскаватором.

СеМО имеет разнородные заявки, обратные связи, три узла. При этом интервалы поступления заявок и продолжительность их задержки в обслуживающих устройствах подчинены  $\gamma$ -закону распределения с ограниченной правосторонней областью [3, 11]. Эти обстоятельства не позволяют применить аналитические методы для анализа СеМО ввиду их отсутствия. В связи с этим, для определения показателей эффективности, созданной СеМО, использован имитационный подход, реализованный на языке GPSS World, который успешно применяется в горном деле [5, 12-16].

Разработана имитационная модель работы ЭАК, включающая набор блоков, отображающих основные технологические процессы открытых горных работ с учетом внеплановых простоев горных машин. На рис. 2 представлена часть блок-схемы GPSS-модели, отображающая маневровые работы перед погрузкой и погрузку вскрышной породы экскаватором в автосамосвалы.

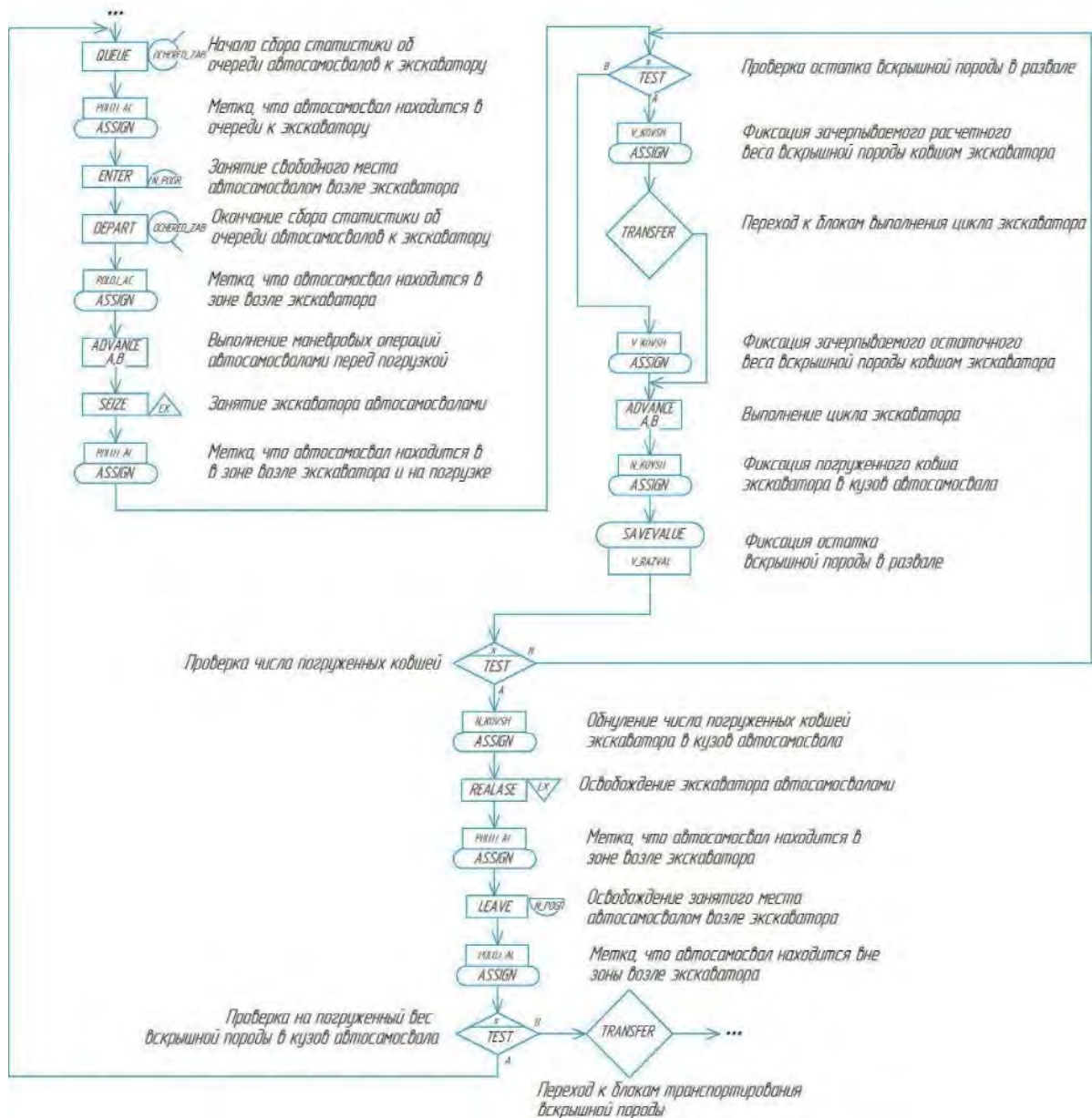


Рис. 2. Часть блок-схемы GPSS-модели, отображающая маневровые работы перед погрузкой и погрузку вскрышной породы экскаватором в автосамосвалы

В модели (рис. 2) блоки QUEUE и DEPART фиксируют начало и окончание сбора статистики об ожидающих погрузки автосамосвалах. ENTER и LEAVE отображают занятие и освобождение автосамосвалов, мест для установки автосамосвалов на погрузку. Блоки SEIAZE и REALASE имитируют занятие и освобождение экскаватора, осуществляющего погрузку вскрышной породы в автосамосвалы. Маневровые работы и цикл экскаватора отображаются посредством блоков ADVANCE. В блоках ASSIGN путем присвоения параметрам транзактов определяются актуальные в текущий момент времени значения числа погруженных и требуемых ковшей, вес вскрышной породы, зачерпываемый ковшом экскаватора, вес перевозимой вскрышной породы в кузове автосамосвала. Блок SAVEVALUE применяется для фиксации остатка вскрышной породы в развале. TEST и TRANSFER перенаправляют транзакты в соответствии остатком вскрышной породы в развале и

погруженной массы в кузов автосамосвала. Количество мест для установки на погрузку задается с помощью управляющего оператора STORAGE.

Оценка адекватности разработанной имитационной модели проводилась путем сравнения данных диспетчерских отчетов автоколонн за прошлый период работы реального разреза с результатами, полученными на модели при одинаковых условиях эксплуатации ЭАК. В результате расхождение не превысило принятого критического значения 10% [5].

#### Обсуждение результатов и принятые допущения

С использованием разработанной имитационной модели проведены вычислительные эксперименты по исследованию и анализу влияния интервалов продолжительности и периодичности внеплановых простоев на эксплуатационную производительность ЭАК для условий одного из разрезов Кузбасса.

Исследовался ЭАК, включающий в себя один экскаватор марки Hitachi EX-1900 и четыре, закрепленных за ним, автосамосвала марки БелАЗ-7513. При работе ЭАК автосамосвалы после их загрузки вскрышной породой транспортируют ее на внешний отвал, двигаясь со средней технической скоростью  $V_{cp} = 6,1$  м/с на расстояние  $S = 2680$  м. После разгрузки порожние автосамосвалы возвращаются к экскаватору, двигаясь со средней технической скоростью  $V_{cp} = 6,9$  м/с. В экспериментах учитывались внеплановые простои горных машин. Плановые простои оборудования ЭАК исключены. Факторами при проведении экспериментов являлись периодичность и продолжительность внеплановых простоев согласно хронометражным данным. Период моделирования составил 30 месяцев. Часть результатов проведенных исследований представлена на рисунках 3-4.

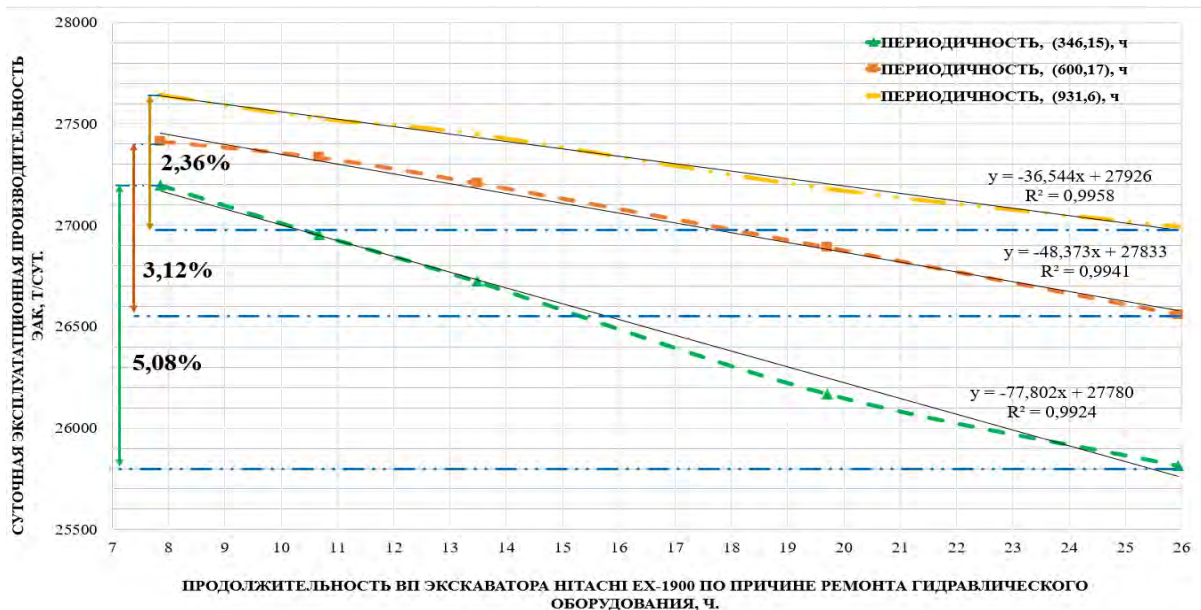


Рис. 3. Зависимость суточной эксплуатационной производительности ЭАК от продолжительности ремонта гидравлического оборудования экскаватора Hitachi-EX-1900



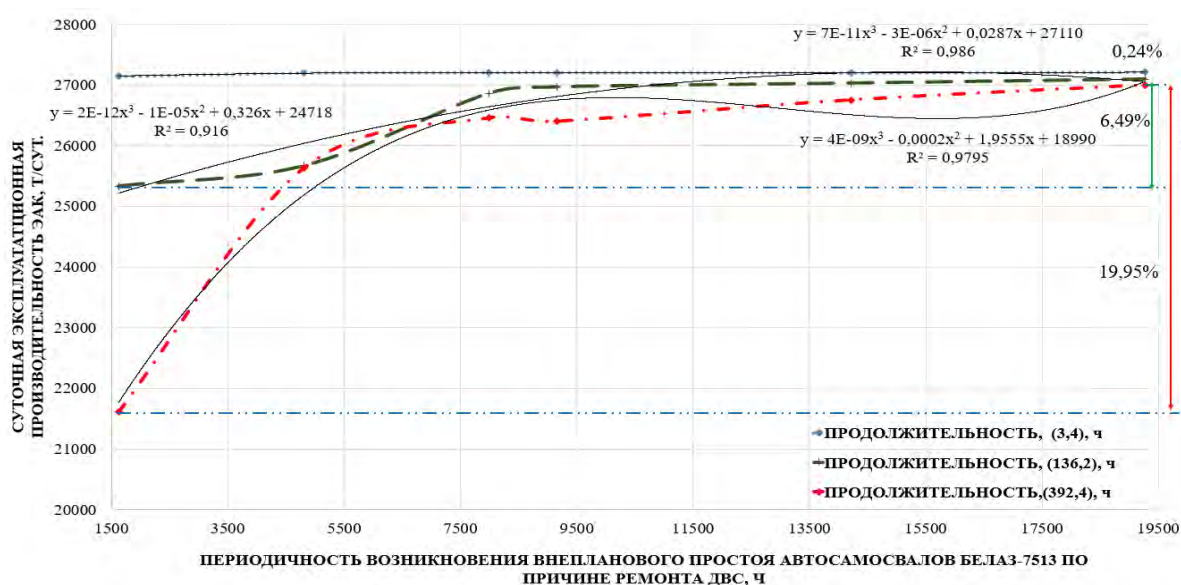


Рис. 4. Зависимость суточной эксплуатационной производительности ЭАК от периодичности ремонта двигателя внутреннего сгорания автосамосвала БелАЗ-7513

Установлено, что при различной периодичности возникновения внеплановых простоев экскаватора (346, 15; 600, 17; 931, 60 часов), связанных с ремонтом гидравлического оборудования, увеличение продолжительности ремонта с 7 до 26 часов снизит эксплуатационную производительность ЭАК на 2,36% - 5,08%, а изменение периодичности внепланового простоя автосамосвалов по причине ремонта двигателя внутреннего сгорания в интервале от 1623 до 19295 часов приведет к увеличению суточной эксплуатационной производительности ЭАК на 0,24% - 19,95% в зависимости от продолжительности ремонта (3,4; 136,2; 392,4 часов).

#### Заключение

Таким образом, применение разработанной имитационной модели для отображения работы ЭАК позволяет исследовать и анализировать влияние внеплановых простоев на эксплуатационную производительность, что может быть использовано при составлении планов работы ЭАК и формировании парка горных машин в его составе.

**Благодарности:** Исследование выполнено в рамках гранта (постановление Правительства Кемеровской области – Кузбасса от 19.09.2022 № 632) по прикладному научному исследованию «Разработка программно-методического обеспечения для цифровизации процессов проектирования горнотехнических систем для открытых и подземных горных работ», соглашение от 22.11.2022 г. №1.

#### Литература

1. Петренко И.Е. Итоги работы угольной промышленности России за 2022 год // Уголь. – 2023. – № 3. – С. 21-33. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-3-21-33
2. Герике П.Б. О едином диагностическом критерии для выявления дефектов электрических машин по параметрам механических колебаний // Известия Уральского государственного горного университета. – 2019. – № 2 (54). – С. 100-106, <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-2-100-106>.
3. Воронов А.Ю. Оптимизация эксплуатационной производительности экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.06, 05.13.18 / Воронов Артем Юрьевич. – КузГТУ. Кемерово, 2015. – 195 с.

4. **Томашевский В.Н.** Имитационное моделирование в среде GPSS / В.Н. Томашевский, Е.Г. Жданова. – М.: Бестселлер. – 2003. – 412 с.
5. **Конюх В.Л.** Дискретно-событийное моделирование подземных горных работ / В.Л. Конюх, В.В. Зиновьев; отв. ред. О.В. Тайлаков; Сиб. отд. РАН, КемНЦ. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. – 243 с.
6. **Алиев Т.И.** Основы моделирования дискретных систем. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
7. **Фурман А.С.** Оценка эффективности эксплуатации экскаваторно-автомобильных комплексов на технологических трассах разрезов Кузбасса: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.06 / Фурман Андрей Сергеевич. – КузГТУ. – Кемерово, 2018. – 137 с.
8. **Хорешок А.А.** Оценка степени взаимовлияния вместимости ковша экскаватора и кузова автосамосвала / А.А. Хорешок, Д.М. Дубинкин, С.О. Марков, М.А. Тюленев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. – № 3. – С. 104-112.
9. **Томаков П.И.** Технология, механизация и организация открытых горных работ: учебник для вузов / П.И. Томаков, И.К. Наумов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1986. – 312 с.
10. **Шамсутдинов М.М.** Открытые горные работы: учебное пособие / М.М. Шамсутдинов, Э.В. Лупинин. – Бишкек, 2015. – 182 с
11. **Орлов А.И.** Теория принятия решений: учебное пособие / А.И. Орлов. – М.: Изд-во «Экзамен», 2005. – 656 с.
12. **Девятков В.В.** Эволюция имитационного моделирования – от «искусства и науки» к массовому применению / В.В. Девятков // Имитационное моделирование. Теория и практика. XIII Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. – 2017. – С. 27-36.
13. **Зиновьев В.В.** Новый подход к обоснованию геотехнологий без постоянного присутствия людей в забое / В.В. Зиновьев, А.Н. Стародубов, П.И. Николаев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – № 5. – С. 37-44.
14. **Стародубов А.Н.** Система имитационного моделирования горнопроходческих работ / А.Н. Стародубов, В.В. Зиновьев, М.В. Береснев, А.Е. Майоров // Уголь. – 2016. – № 2. – С. 20-24.
15. **Николаев П.И.** Система имитационного моделирования для рациональной автоматизации горнопроходческих работ / Сборник материалов II Международной научно-практической конференции «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте». – 2018. – С. 113- 115.
16. **Кузнецов И.С.** Исследование влияния внеплановых простоев горных машин на добычу угля открыто-подземным способом методом имитационного моделирования / И.С. Кузнецов, В.В. Зиновьев, А.Н. Стародубов // Уголь. – 2020. – № 9. – С. 10-13.