

УДК 622.015, 519.876.5

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОТОБРАЖЕНИЯ РАБОТЫ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Кузнецова А.В. - студент группы АРМ-241, II курс

Научный руководитель: Зиновьев В.В., к.т.н., доцент

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

Россия, г. Кемерово

Угледобывающая промышленность продолжает играть важнейшую роль в экономике Кемеровской области и Российской Федерации в целом. Известно, что более 70% угля добывают открытым способом [1]. Процесс добычи/вскрыши производят мощными экскаваторными автомобильными комплексами (ЭАК). При проведении исследований, как правило, не учитывают вероятностную природу и динамику осуществляемых процессов, из-за чего значительно падает точность результатов [2].

Математический аппарат теории массового обслуживания (ТМО) и имитационное моделирование [2-5] активно применяется в горном деле. В данной работе эти методы применены для отображения работы ЭАК, действующего в условиях Кедровско-Крохалевского угольного месторождения.

Исследуемый ЭАК включает экскаватор P&N - 2800, выполняющий выемочно-погрузочные работы и семь закреплённых за ним автосамосвалов марки БелАЗ-75306, осуществляющих транспортирование породы на внешний отвал на расстояние 3,07 км. С использованием ТМО разработана математическая модель ЭАК, которую можно представить, как замкнутую систему массового обслуживания (СеМО). На рисунке 1 представлена концептуальная модель ЭАК.

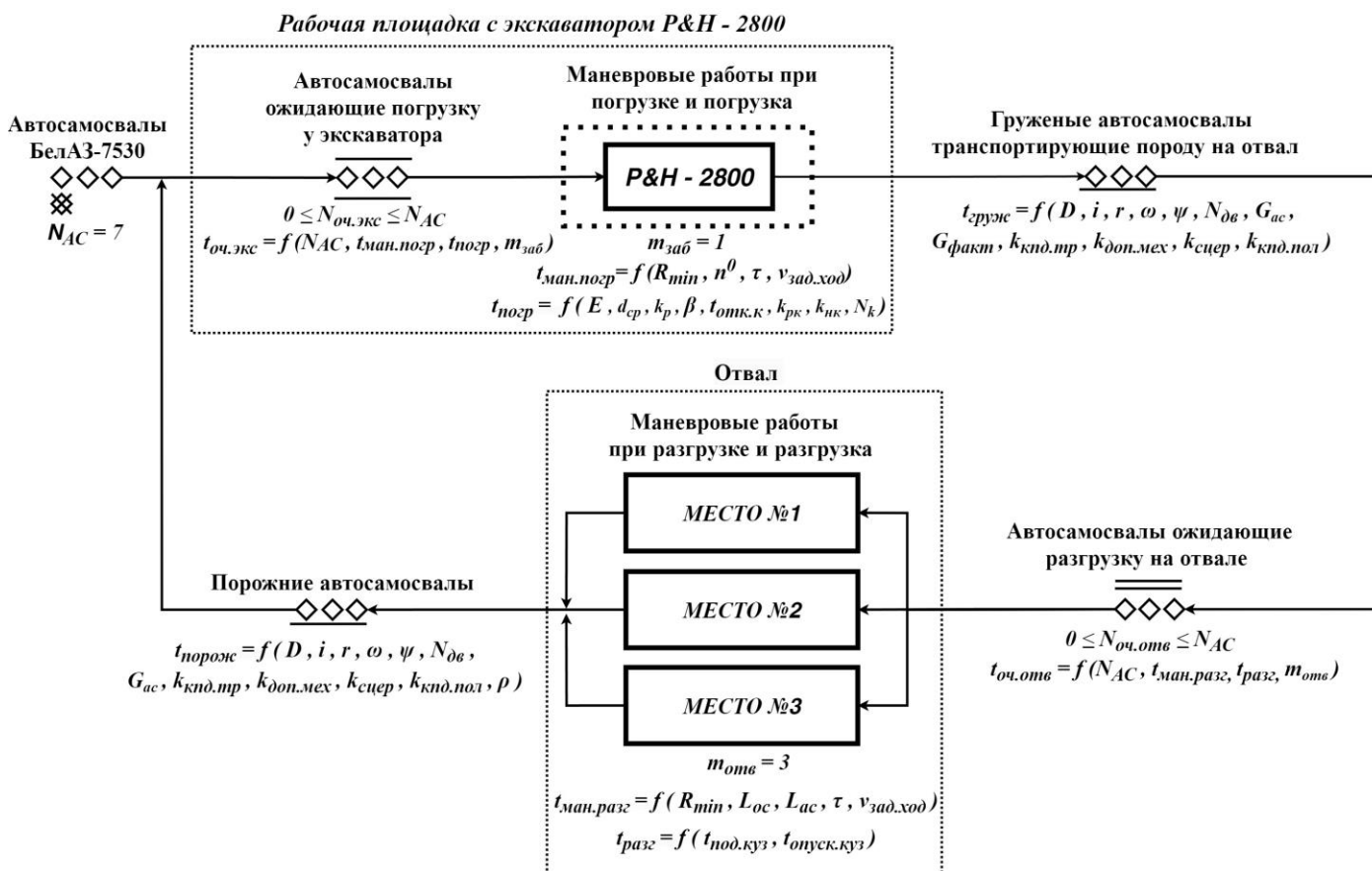


Рисунок 1 - Концептуальная модель работы ЭАК в виде СеМО

Автосамосвалы марки БелАЗ-7530 представляют собой заявки в СеМО. Количество генерируемых заявок-автосамосвалов в качестве входного потока N_{AC} , равно семи, в соответствии с описанием объекта моделирования.

Приборами, обслуживающими эти заявки-автосамосвалы, являются рабочие площадки с местами для установки автосамосвала под погрузку, экскаваторы и отвал. Стрелками обозначено направление движения заявок в модели. Проходя через эти приборы обслуживания, каждая i -ая заявка задерживается на время равное времени выполнения процесса, тем самым отображает работу системы. Продолжительность обслуживания i -ой заявки является случайным числом и задаётся гамма-законом [3,6].

В случае занятости прибора обслуживания, отображающего экскаватор, выполнения определённого процесса и/или отсутствия свободного автосамосвала, заявки выстраиваются в очередь. Подобная очередь может образовываться и перед местами для погрузки. Дисциплина обслуживания заявок осуществляется по правилу FIFO (первым пришёл - первым обслужен).

Размер очереди из заявок-автосамосвалов перед погрузкой ($N_{оч.экс}$) и разгрузкой ($N_{оч.отв}$) находятся в интервале:

$$0 \leq N_{оч.экс} \leq 7, \quad (1)$$

$$0 \leq N_{оч.отв} \leq 7. \quad (2)$$

На время обслуживания заявок-автосамосвалов в каждом приборе влияют горнотехнические условия эксплуатации, физико-технические свойства вскрышных работ, рабочие и технологические параметры экскаваторов и конструктивно-технологических параметров автосамосвалов

Полный рейс автосамосвала $t_{рейс.ас}$ в модели можно представить как продолжительность одного цикла i -ой заявки-автосамосвала:

$$t_{рейс.ас} = t_{ожд.погр} + t_{ман.погр} + t_{погр} + t_{груз} + t_{ман.разг} + t_{разг} + t_{порож}, \quad (4)$$

где $t_{оч.экс}$ - время ожидания погрузки, сек; $t_{ман.погр}$ - время выполнения маневровых работ при погрузке, сек.; $t_{погр}$ - время погрузки автосамосвала экскаватором, сек; $t_{груз}$ - время движения автосамосвала в гружёном направлении (транспортирование), сек; $t_{ман.разг}$ - время выполнения маневровых работ при разгрузке, сек.; $t_{разг}$ - время разгрузки автосамосвала, сек; $t_{порож}$ - время движения автосамосвала в порожнем направлении, сек.

Время ожидания погрузки зависит от количества автосамосвалов закреплённые за экскаватором, продолжительности нахождения автосамосвала у экскаватора, а также времени нахождения вне зоны работы экскаватора:

$$t_{оч.экс} = f(N_{AC}, t_{ман.погр}, t_{погр}, m_{заб}), \quad (5)$$

где: N_{AC} - количество автосамосвалов закреплённое за экскаватором, шт.; $m_{заб}$ - количество мест для одновременной установки автосамосвалов на погрузку, шт.

схема подъезда ($t_{ман.погр}$) влияет на время выполнения маневровых работ при погрузке в забое [7,8].

$$t_{ман.погр} = f(n_i), \quad (6)$$

где n_i - тип принятой схемы выполнения маневровых работ (сквозная, тупиковая, петлевая с разворотом).

При разработке указанного месторождения принята тупиковая схема. Время задержки заявок-автосамосвалов в приборах, отображающие рабочую площадку с местами для установки под погрузку при тупиковой схеме, представлена в виде функции [8]:

$$t_{ман.погр} = f(R_{min}, n^0, V_{зад.ход}, \tau), \quad (7)$$

где: R_{min} - минимальный радиус поворота автосамосвала, м; n^0 - угол постановки автосамосвала на погрузку относительно экскаватора, град; $V_{зад.ход}$ - скорость движения автосамосвала задним ходом, м/с; τ - время на переключение передачи, сек.

Продолжительность задержки заявок-автосамосвалов в приборах, отображающих экскаватор, представлена в виде функции [8]:

$$t_{погр} = f(E, d_{ср}, k_p, \beta, t_{отк.к}, k_{рк}, k_{нк}, N_k), \quad (8)$$

где: E - вместимость ковша экскаватора, м³; $d_{ср}$ - средневзвешенный диаметр куска вскрышной породы, м; k_p - коэффициент разрыхления породы в развале; β - средний угол поворота экскаватора, град; $t_{отк.к}$ - продолжительность открытия ковша, сек; $k_{рк}$ - коэффициент разрыхления породы в ковше экскаватора; $k_{нк}$ - коэффициент наполнения ковша экскаватора; N_k - требуемое число разгружаемых ковшей экскаватора в кузов автосамосвала, шт.

Продолжительность движения заявок-автосамосвалов от экскаватора до отвала отображая тем самым движение гружёных автосамосвалов зависит от горнотехнических условий эксплуатации, параметров горных машин и физико-механических свойств вскрышной породы:

$$t_{груз} = f(D_j, i_j, r_j, \omega_j, \varpi_j, N_{дв}, G_{ас}, G_{факт}, k_{кпд.тр}, k_{доп.мех}, k_{сцеп}, k_{кпд.кол}), \quad (9)$$

где: D_j - тягово-динамическая характеристика автосамосвала на j -ом участке трассы, м/с²; i_j - средневзвешенный продольный уклон j -ого участка трассы, ‰; r_j - радиус кривизны j -ого участка трассы, м; ω_j - коэффициент основного сопротивления движению автосамосвала на забойном участке трассы, м/с²; ϖ_j - основное сопротивление движению от кривизны на j -ом участке трассы, м/с²; $N_{дв}$ - мощность двигателя автосамосвала, кВт; $G_{ас}$ - масса автосамосвала без груза, тонн; $G_{факт}$ - фактическая загруженность автосамосвала, тонн; $k_{кпд.тр}$ - коэффициент кпд трансмиссии; $k_{доп.мех}$ - коэффициент забора мощности на дополнительные механизмы; $k_{сцеп}$ - коэффициент сцепления колёс с трассой; $k_{кпд.кол}$ - коэффициент кпд колёс.

Время ожидания разгрузки зависит от количества автосамосвалов закреплённые за экскаватором,

$$t_{оч.отв} = f(N_{АС}, t_{ман.разг}, t_{разг}, m_{отв}), \quad (9)$$

где: $N_{АС}$ - количество автосамосвалов закреплённое за экскаватором, шт.; $m_{отв}$ - количество мест для одновременной установки автосамосвалов на разгрузку, шт.

Время задержки заявок-автосамосвалов на отвале отображающая выполнение манёвров при разгрузке ($t_{ман.разг}$) и сама разгрузка ($t_{разг}$) представлены в виде функций [8]:

$$t_{ман.разг} = f(R_{min}, L_{ос}, L_{ас}, V_{зад.ход}, \tau), \quad (10)$$

$$t_{разг} = f(t_{под.куз}, t_{опуск.куз}), \quad (11)$$

где: R_{min} - минимальный радиус поворота автосамосвала, м; $L_{ос}$ - расстояние между осевыми линиями автодорог, м; $L_{ас}$ - длина автосамосвала, м; $V_{зад.ход}$ - скорость движения автосамосвала задним ходом, м/с; τ - время на переключение передачи, сек.; $t_{под.куз}$ - паспортное время подъёма кузова, сек; $t_{опуск.куз}$ - паспортное время опускания кузова, сек.

Продолжительность движения заявок-автосамосвалов отображая движение порожних автосамосвалов от отвала до экскаватора зависит от параметров горных машин, физико-механических свойств вскрышной породы и горнотехнических условий эксплуатации:

$$t_{порож} = f(D_j, i_j, r_j, \omega_j, \varpi_j, N_{дв}, G_{ас}, k_{кпд.тр}, k_{доп.мех}, k_{сцеп}, k_{кпд.кол}), \quad (12)$$

где: D_j - тягово-динамическая характеристика автосамосвала на j -ом участке трассы, м/с²; i_j - средневзвешенный продольный уклон j -ого участка трассы, ‰; r_j - радиус кривизны j -ого участка трассы, м; ω_j - коэффициент основного сопротивления движению автосамосвала на забойном участке трассы, м/с²; ϖ_j - основное сопротивление движению от кривизны на j -ом участке трассы, м/с²; $N_{\text{дв}}$ - мощность двигателя автосамосвала, кВт; $G_{\text{факт}}$ - фактическая загруженность автосамосвала, тонн; $k_{\text{кпл.тр}}$ - коэффициент кпл трансмиссии; $k_{\text{доп.мех}}$ - коэффициент забора мощности на дополнительные механизмы; $k_{\text{сцеп}}$ - коэффициент сцепления колёс с трассой; $k_{\text{кпл.кол}}$ - коэффициент кпл колёс.

Эксплуатационная производительность ЭАК в СеМО определяется произведением количеством совершенных рейсов автосамосвалом, количеством закреплённых автосамосвалов и фактической загруженностью автосамосвала и определяется по формуле [7]:

$$Q_{\text{зак}} = (N_p \cdot q_{\text{ф}}) \cdot n_{\text{ас}}, \quad (13)$$

где: N_p - количеством совершенных рейсов автосамосвалом, шт.; $q_{\text{ф}}$ - фактическая загруженность автосамосвала, тонн; $n_{\text{ас}}$ - , количество закреплённых автосамосвалов за экскаватором, шт.

СеМО является замкнутой, поскольку количество заявок - автосамосвалов ограничено, и они не покидают систему. Так как в разработанной СеМО продолжительность выполнения основных технологических процессов подчиняется гамма-распределению [3,6] с ограниченной правосторонней областью, то для ее расчета современное развитие ТМО не позволяет аналитически рассчитать данную модель [9].

В связи с этим для реализации, созданной СеМО применён имитационный подход, основанный на языке GPSS World-Core, который успешно используется в горном деле [9-11].

Имитационная модель ЭАК, реализованная в среде ALINA GPSS состоит из семи сегментов: «Фиксация расчётных переменных», «Ввод автосамосвалов в модель», «Работа экскаватора», «Гружённый ход автосамосвалов», «Работа автосамосвалов на отвале», «Порожний ход автосамосвалов», «Запуск и остановка процесса моделирования». Транзакты отображают автосамосвалы. Фрагмент блок-схемы, описывающий работу экскаватора, представлен на рисунке 2. Расшифровка блоков и их назначение представлено в таблице 1.

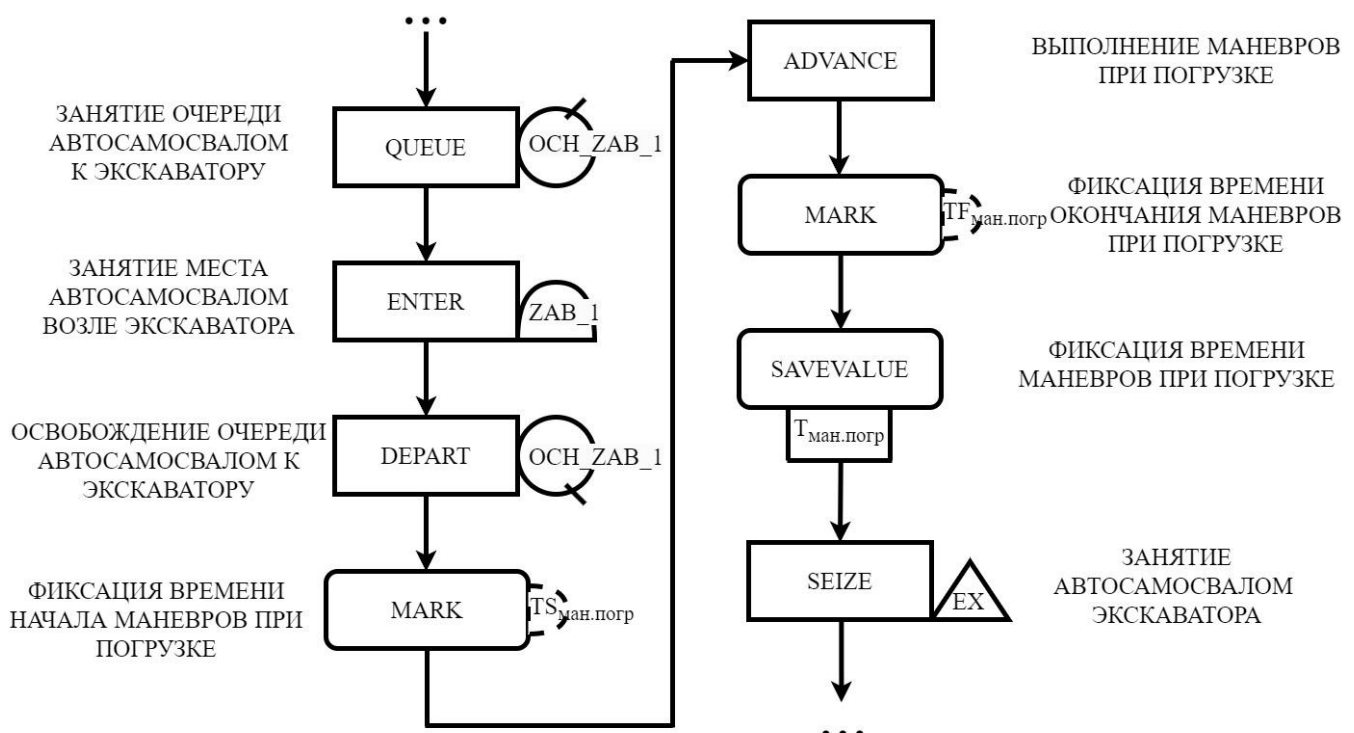


Рисунок 2 - Фрагмент блок-схемы GPSS-модели, описывающий работу экскаватора

Таблица 1. Назначение блоков и управляющих операторов GPSS модели описывающий работу экскаватора

Блоки	Назначение
QUEUE и DEPART	Фиксируют начало и окончание сбора статистики об ожидающих обслуживания транзактах, т.е. простаивающих автосамосвалах в ожидании погрузки
ENTER и LEAVE	Занятие и освобождение мест возле экскаватора, предназначенных для установки автосамосвалов на погрузку
SEIZE и RELEASE	Начало и окончание работы экскаватора, осуществляющего погрузку вскрышной породы в кузов автосамосвала
ADVANCE	Задерживают транзакты на время равное времени выполнения маневровых работ при погрузке в забое и саму погрузку
MARK, SAVEVALUE	Определение продолжительности технологических операций
TEST и TRANSFER	Перенаправляют транзакты в соответствии с установленными требованиями работы экскаватора и автосамосвалов
STORAGE	Указание количества мест для одновременной установки под погрузку

Оценка адекватности созданной имитационной модели осуществлялась с использованием методов валидации и верификации. В результате расхождение не превысило принятого критического значения 10,0% [10].

На имитационной модели ЭАК проведены вычислительные эксперименты по исследованию влияния числа закрепляемых за экскаватором автосамосвалов на следующие показатели эффективности: сменную эксплуатационную производительность ЭАК, средний размер очереди автосамосвалов, ожидающих погрузки у экскаватора и коэффициент загрузки экскаватора. Период моделирования составил 12 часов (1 смена). Принятый уровень значимости $\alpha = 0,05$. При проведении вычислительных экспериментов приняты следующие ограничения:

- 1) Исключены все внеплановые простои (аварийные и организационные), кроме ожидания погрузки;
- 2) Исключён учёт работы дополнительного оборудования (бульдозеры, грейдеры, фронтальные погрузчики);
- 3) Автосамосвалы работают по закрытому циклу, поскольку отсутствуют данные о перегонах автосамосвалов между экскаваторами и отвалами;

4) Рассматривались только экскаваторы-механические лопаты, поскольку по ним имеется хронометраж.

Результаты вычислительных экспериментов представлены на рисунках 3 - 5.

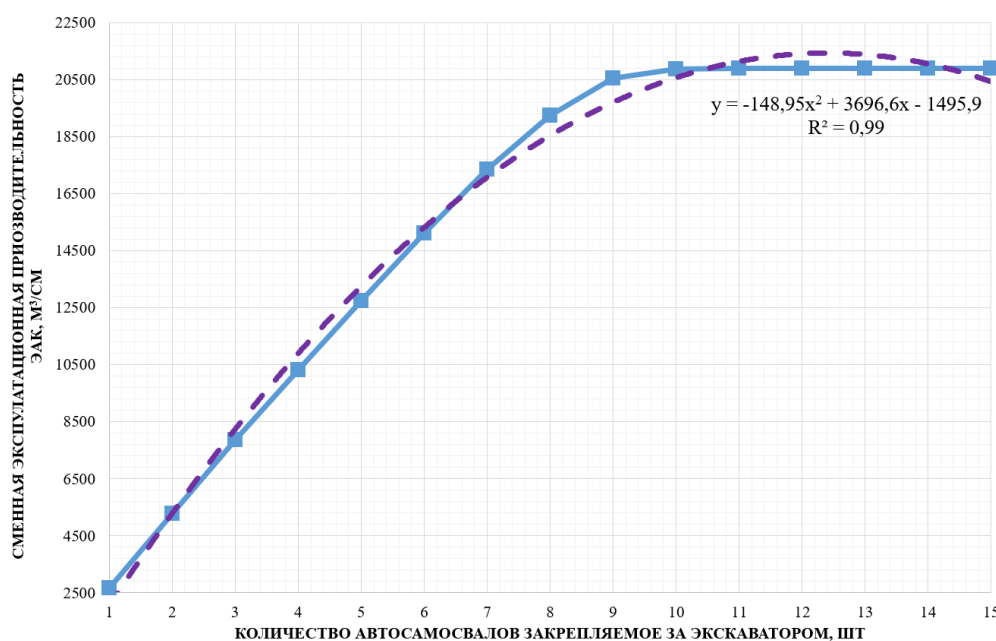


Рисунок 3 - Зависимость сменной эксплуатационной производительности ЭАК от числа автосамосвалов, закрепляемых за экскаватором

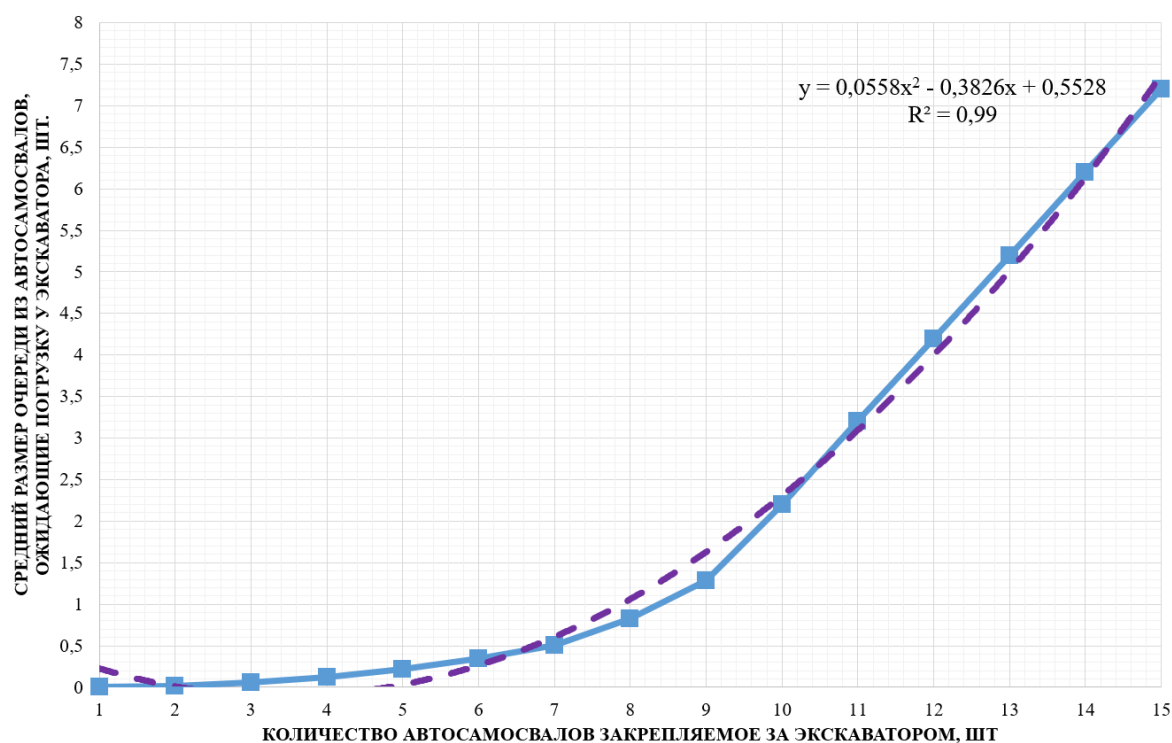


Рисунок 4 - Зависимость среднего размера очереди из автосамосвалов, ожидающих погрузки у экскаватора, от числа автосамосвалов, закрепляемых за экскаватором

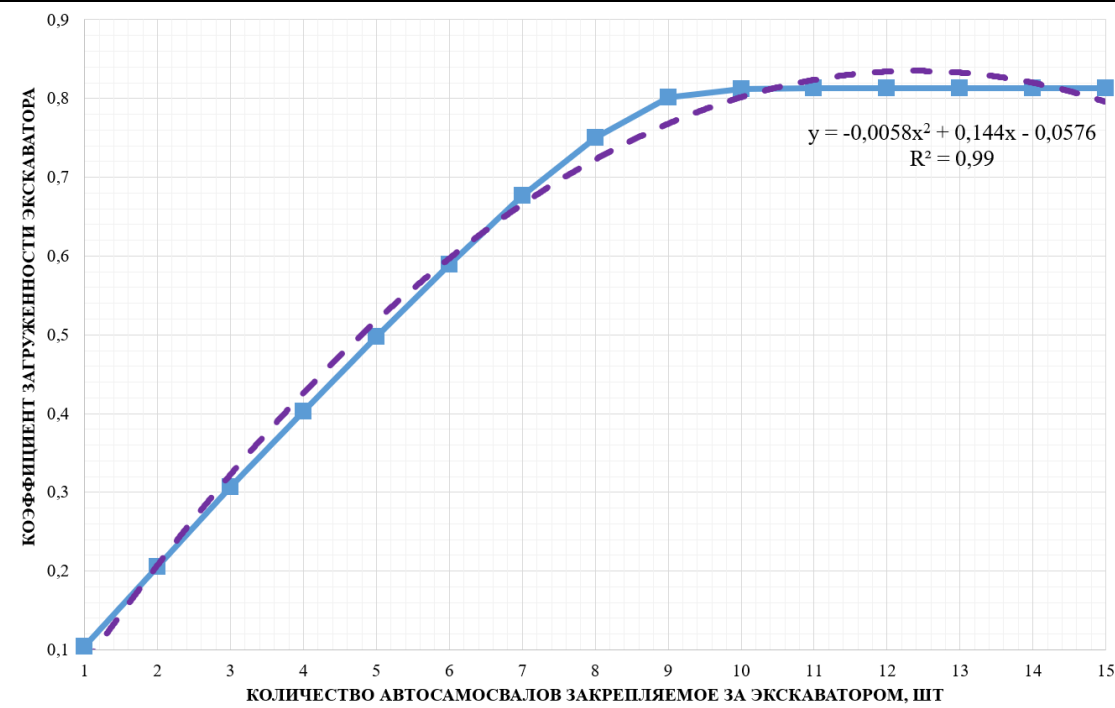


Рисунок 5 - Зависимость коэффициента загрузки экскаватора от числа закрепляемых автосамосвалов

Из рисунков 3-5, видно, что зависимости всех выбранных выше показателей эффективности от числа закрепляемых за экскаватором автосамосвалов описываются полиномом второй степени.

Установлено, что сменная эксплуатационная производительность достигает своего максимума 20556,63 м³/смену при закреплении за экскаватором Р&Н-2800 девяти автосамосвалов БелАЗ-75306. Дальнейшее увеличение количества автосамосвалов не приведёт к росту данного показателя эффективности время рейса увеличится в среднем на 5 минут, вследствие роста среднего размера очереди автосамосвалов перед экскаватором (рисунок 4) из-за повышения коэффициента его загрузки до 0,85 (рисунок 5).

Таким образом, имитационное моделирование является эффективным инструментом для отображения работы ЭАК с учетом динамики и стохастичности процессов и позволяет исследовать влияние параметров ЭАК на показатели его эффективности.

Список литературы:

1. Таразаров И.Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь - декабрь 2020 года / И.Г. Таразаров, Д.А. Губанов // Уголь. - 2021. - №3. - С. 27 - 43.
2. Кузнецов И.С. Исследование технологических параметров экскаваторно-автомобильного комплекса методом имитационного моделирования // Сборник материалов XVII международной научно практической конференции «природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2018». - 2018. - 112.1 с.
3. Зиновьев В.В., Кузнецов И.С., Николаев П.И., Стародубов А.Н. Имитационное моделирование роботизируемых технологий открытых и подземных горных работ. Горная промышленность. 2023;(S2):65–76
4. Козлова О.Ю. Опыт применения и перспективы развития имитационного моделирования в горном деле // Уголь. 2022. № 5. С. 42-45
5. Стародубов А.Н., Зиновьев В.В. Методика повышения скорости и достоверности принятия решения при проектировании очистных работ в сложных горно-геологических условиях // Уголь. 2025;(10) - С. 99-106.

6. Воронов, А.Ю. Оптимизация эксплуатационной производительности экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.06, 05.13.18 - КузГТУ. - Кемерово, 2015. -195 с.
7. Стенин Д.В. Перспективы развития производства автономных тяжёлых платформ для безлюдной добычи полезных ископаемых // Горное оборудование и электромеханика - 2019. - № 6 (146). - С. 3-8.
8. Фурман, А.С. Оценка эффективности эксплуатации экскаваторно-авто-мобильных комплексов на технологических трассах разрезов Кузбасса: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.06. – КузГТУ. – Кемерово, 2018. - 137 с
9. Кузнецов, И.С. Оптимизация параметров карьерных экскаваторно-автомобильных комплексов с учетом внеплановых простоев: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.06 - ФИЦ УУХ СО РАН, КузГТУ. - Кемерово, 2022. -169 с.
10. Зиновьев, В.В. Моделирование процессов и систем: учеб. пособие / В.В. Зиновьев, А.Н. Стародубов, П.И. Николаев, И.С. Кузнецов; КузГТУ. - Кемерово, 2025. - 158 с.
11. Девятков В.В. Эволюция имитационного моделирования – от "искусства и науки" к массовому применению / В.В. Девятков // Имитационное моделирование. Теория и XIII Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. - 2017. - С. 27-36.