УДК 622.271.4:621.879

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРА ВО ВРЕМЕНИ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ, ОРГАНИЗАЦИОННЫХ ПЕРЕРЫВОВ И ОТКАЗОВ ЭКСКАВАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В.Д. Воробьев, докт. техн. наук, А.И. Крючков, канд. техн. наук, Л.И. Евтеева, инж. (НТУУ «КПИ»), В.С. Прокопенко, докт. техн. наук (ЗАО «Техновзрыв»)

Наведені результати математичного моделювання та дослідження впливу технологічних та організаційних перерв, а також відмов екскаваційного устаткування на коефіцієнт використання екскаватора в часі, що є базою для розроблення інженерних методик розрахунку технологічних показників.

Ключові слова: гірнича маса, відкоси, екскавація, кар’єр, методики, модель, параметри, перерви.

Приведены результаты математического моделирования и исследования влияния технологических и организационных перерывов, отказов экскавационного оборудования на коэффициент использования экскаватора во времени, что является фундаментальным основанием для разработки инженерных методик расчета технологических параметров.

Ключевые слова: горная масса, откосы, экскавация, карьер, методики, модель, параметры, перерывы.

The results of mathematical modeling and study of influence of technological and organizational interruptions and refuses of excavators on their time utilization rate that is a base for development of engineering methods for calculation technological parameters.

Key words: mined rock, slopes, excavating, open-cast, methods, model, parameters, and time gaps.

Введение. Для оценки влияния всего многообразия факторов на показатели эффективности процесса экскавации горной массы, как правило, проводят статистические измерения полного набора влияющих факторов с последующей оценкой степени их воздействия на процесс. Для осуществления такой процедуры использован метод Маркова–Колмогорова с учетом вероятностных нестационарных альтернирующих процессов, что позволяет значительно повысить точность и достоверность моделей основных циклов экскавации.

Анализ состояния проблемы. В настоящее время 98 % всех выемочных работ на карьерах по добыче строительных материалов производится с использованием мощных погрузчиков или экскаваторов типа мехлопата, каждый из которых представляет собой достаточно сложное сочетание элементов, состоящее из связанных между собой механической, гидравлической и электрической подсистем. Для анализа такой системы использованы методы теории надежности и теории массового обслуживания.

Целью работы является установление характера и степени влияния на показатели эффективности процесса экскавации всего многообразия организационных и технологических перерывов, отказов экскавационного оборудования на машинном и календарном времени, что позволит разработать ряд практических мероприятий по повышению надежности и производительности экскавационного процесса.

1. Причины простоев экскаватора и их классификация. При работе экскаватора каждый элемент передает поток энергии, часть которой преобразуется в поверхностную энергию образующихся и развивающихся усталостных микротрещин. Это вызывает износ поверхностей и формирует тепловые потоки в деталях экскаватора. Накопление повреждений приводит, как правило, к поломке отдельных деталей и узлов механизмов, что может быть оценено соответствующими показателями надежности: средней наработкой на отказ; средним временем восстановления; коэффициентом готовности и др.

В идеальном случае процесс копания можно рассматривать как непрерывный процесс в течение цикла копания. В конце каждого цикла производятся регламентированные работы, связанные с поворотом на разгрузку, разгрузкой ковша, опусканием пустого ковша в забой, а также переездом экскаватора на новое место стояния и другими обязательными технологическими операциями. Однако на практике возможны непредвиденные остановки экскаватора, связанные с отказами как самого экскаватора, так и отказами другого оборудования, связанного технологически с экскавационными работами. При этом повышение надежности экскаватора приводит не только к росту производительности копания, экономических показателей, но и к снижению уровня травматизма на работающих карьерах.

Для учета уровня надежности, совершенствования технологических процессов и организационных факторов принят достаточно распространенный показатель – коэффициент использования экскаватора во времени $K_{И}\left(\lambda_i, \mu_i\right)$. Оценка влияния на величину $K_{И}$ организационных и технологических факторов, а также надежности оборудования может осуществляться с помощью комплекса математических моделей, позволяющих учесть любой набор и сочетание факторов, их динамику и особенности функционирования моделируемого объекта.

Для облегчения анализа причин простоев экскаватора их можно классифицировать на три подсистемы. Первая и вторая подсистемы включают в себя простои по внутриучастковым причинам, а третья – общекарьерным.

Деление участковых простоев на две подсистемы вызвано тем, что для некоторого оборудования, узлов или деталей наработка на отказ происходит на машинном времени, а остальные отказы могут появиться независимо от того, копает экскаватор или нет, то есть на непрерывном календарном времени. По этой же причине разделены организационные и технологические перерывы (рис. 1).

Организационные перерывы обычно регламентированы по времени и появление их не зависит от того, работает или нет экскаватор, то есть они возникают на непрерывном календарном времени.

В отличие от организационных, технологические перерывы возникают только после окончания определенной технологической операции, то есть на машинном времени.

2 Математическая модель подсистемы технологических перерывов и отказов оборудования на машинном времени. Рассмотрим составление математической модели для первой подсистемы, к которой относятся технологические перерывы и участковые отказы оборудования на машинном времени (см. рис. 1).

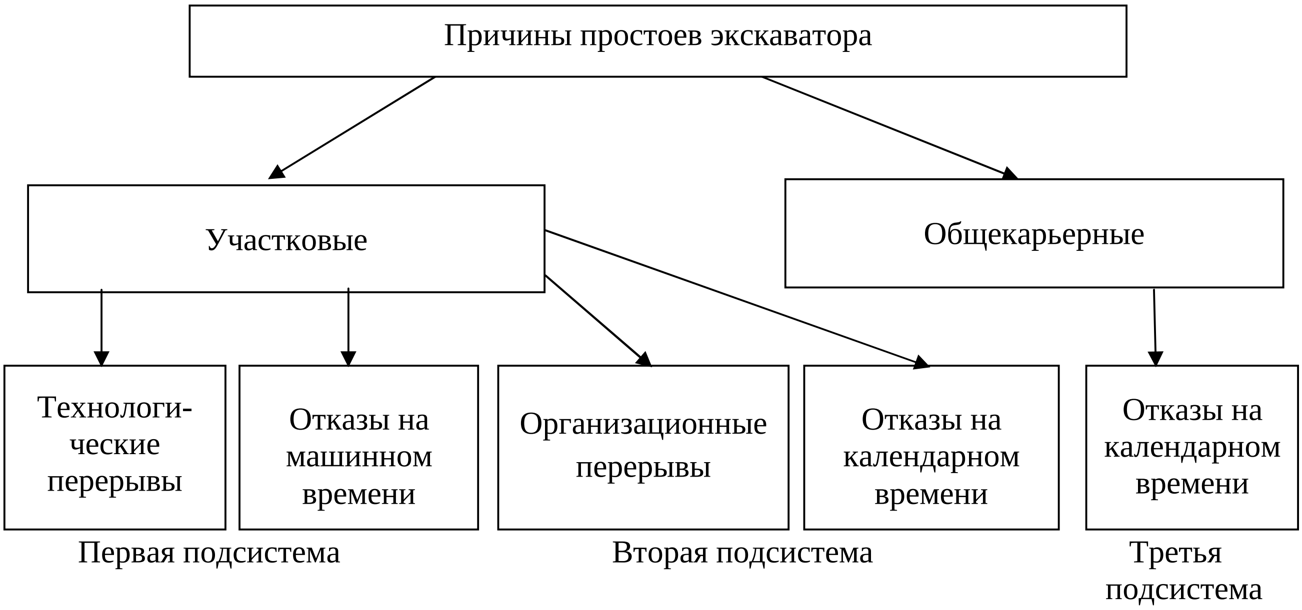

Рис. 1. Классификация простоев экскаватора

При отказе любого из N_1 элементов первой подсистемы экскаватор останавливается и до устранения этого отказа ни один из оставшихся исправными элементов отказать не может. В этом случае для устранения отказов достаточно одной ремонтной бригады.

В терминах теории надежности подсистема может быть описана как состоящая из N_1 различных последовательно соединенных элементов с интенсивностями отказов λ_{1i} и восстановлений μ_{1i} (экспоненциальные распределения вероятностей). При отказе подсистема выключается. Состояние подсистемы во времени описывается системой дифференциальных уравнений Маркова–Колмлгорова [1]:

$$\left.\begin{aligned} \frac{dP_0(t)}{dt} &= -\sum_{i=1}^{N_1} \lambda_{1i} P_0(t) + \sum_{i=1}^{N_1} \mu_{1i} P_i(t) \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \frac{dP_{N_1}(t)}{dt} &= -\mu_{1N1} P_{N1}(t) + \lambda_{1N1} P_0(t) \end{aligned}\right\}, \qquad (1)$$

где $P_i(t)$ – вероятность i-го состояния экскаваторного забоя по i-му отказу первой подсистемы; $P_0(t)$ – вероятность процесса копания (безотказной работы) по первой подсистеме отказов и перерывов; N_1 – количество учтенных факторов (элементов) в первой подсистеме участковых технологических перерывов и отказов на машинном времени**.**

Вследствие замкнутости системы переходов все состояния образуют полную группу событий. Поэтому уравнения Маркова–Колмогорова должны быть дополнены уравнением полной вероятности

$$\sum_{i=1}^{N1} P_i = 1 \; . \qquad (2)$$

Согласно теореме Маркова, при $t \to \infty$ (стационарное решение) система линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами превращается в систему алгебраических уравнений.

Решение этой системы уравнений заключается в определении вероятности каждого из возможных (N_1+1) состояний подсистемы. В частности, вероятность застать экскаватор копающим (по первой подсистеме перерывов и отказов) определяется по уравнению

$$P_{0-1} = \frac{1}{1+\sum_{i=1}^{N_{1i}} \frac{\lambda_{1i}}{\mu_{1i}}} \; . \qquad (3)$$

Интенсивность наступления перерывов и интенсивность их устранения определяются по выражениям

$$\lambda_1 = \sum_{i=1}^{N_1} \lambda_{1,\,i} \; ; \qquad (4)$$

$$\mu_1 = \frac{\lambda}{\sum_{i=1}^{N_{1i}} \frac{\lambda_{1i}}{\mu_{1i}}} \; . \qquad (5)$$

3. Математическая модель подсистемы организационных перерывов и отказов экскавационного оборудования на календарном времени. Вторая подсистема учитывает простои экскаватора по внутриучастковым причинам, когда отказы происходят на календарном времени независимо от того, копает экскаватор или нет. Сюда же относятся перерывы по организационным причинам. Выход из строя одного элемента приводит к остановке процесса копания, поэтому подсистему необходимо считать состоящей из N_2 последовательных элементов. Коротко такую подсистему массового обслуживания можно охарактеризовать следующим образом.

Последовательная подсистема из N_2 разных восстанавливаемых элементов с интенсивностями отказов λ_{2i} и восстановления μ_{2i}. При отказе подсистема не выключается. Восстановление ограниченное (количество ремонтных рабочих в добычную смену на участке ограничено). По аналогии с предыдущим случаем составляется система дифференциальных уравнений Маркова-Колмогорова, описывающих изменение вероятностей состояний во времени с учетом интенсивностей переходов из одного состояния в другое. Стационарное решение такой системы для вероятности застать экскаватор копающим по второй подсистеме перерывов и отказов может быть получено в виде [1]:

$$P_{0-2} = 1 - \sum_{i=1}^{N_2} \frac{\lambda_{2i}}{\mu_{2i}} \; . \qquad (6)$$

Интенсивности наступления перерывов и интенсивность их устранения по второй подсистеме определяются по выражениям:

$$\lambda_2 = \sum_{i=1}^{N_2} \lambda_{2,i} \, ; \tag{7}$$

$$\mu_2 = \lambda_2 \left(\frac{1 - \sum_{i=1}^{N_2} \frac{\lambda_{2,i}}{\mu_{2,i}}}{\sum_{i=1}^{N_2} \frac{\lambda_{2,i}}{\mu_{2,i}}} \right) . \tag{8}$$

4. Математическая модель подсистемы общекарьерных перерывов. Анализ работы экскаваторных забоев показал, что общекарьерные перерывы, включающие в себя в основном отказы оборудования, обычно возникают на календарном времени. Организационные общекарьерные перерывы в этой модели не берутся во внимание, так как они учтены в модели второй подсистемы. Кратко эту подсистему можно определить следующим образом.

Последовательная подсистема N_3 разных восстанавливаемых элементов с интенсивностями отказов λ_{3i} и восстановления μ_{3i}. При отказе система не выключается. Восстановление неограниченное, так как общекарьерные отказы могут устраняться отдельными ремонтными бригадами независимо друг от друга.

Как и для первых двух подсистем, составляется система линейных дифференциальных уравнений Маркова–Колмогорова, описывающих изменение вероятностей состояний во времени с учетом интенсивностей переходов. Стационарную вероятность состояния, при котором происходит копание массива экскаватором, можно определить по выражению

$$P_{0-3} = \prod_{i=1}^{N_3} \left(\frac{1}{1 + \frac{\lambda_{3,i}}{\mu_{3,i}}} \right) . \tag{9}$$

Интенсивности наступления перерывов и их устранения по третьей подсистеме определяются по выражениям

$$\lambda_3 = \sum_{i=1}^{N_3} \lambda_{3,i} \, ; \tag{10}$$

$$\mu_3 = \lambda_3 \left[\prod_{i=1}^{N_3} \left(1 + \frac{\lambda_{3,i}}{\mu_{3,i}} \right) - 1 \right]^{-1} . \tag{11}$$

5 Синтез математической модели системы «экскаваторный забой». Для составления модели коэффициента использования экскаватора во времени по всем видам отказов и перерывов, рассмотренных в трех предыдущих моделях, составим граф возможных состояний забоя (рис. 2).

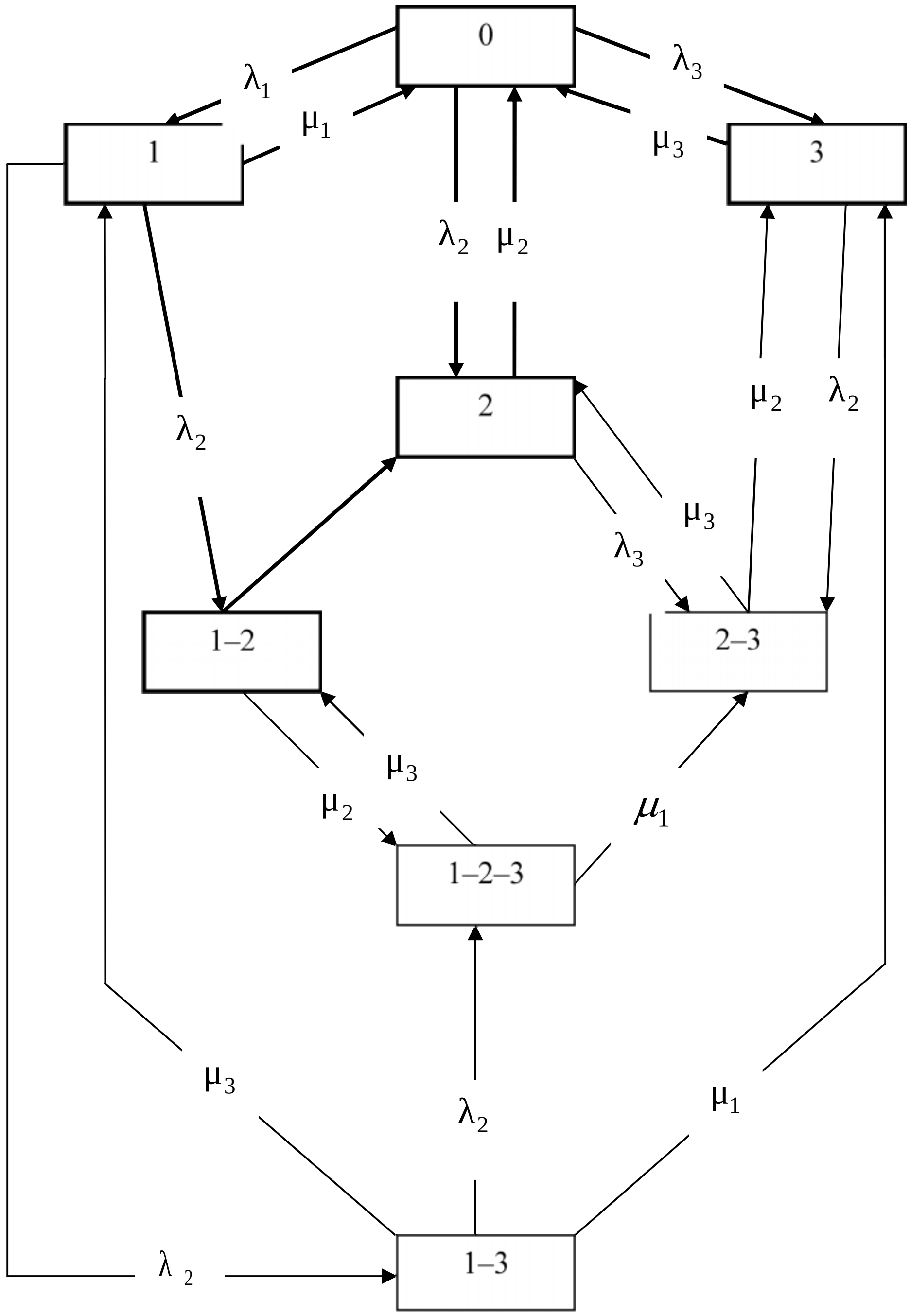

Рис. 2. Граф устойчивых состояний системы «экскаваторный забой»

Все состояния и переходы в системе зависят от состояний отдельных подсистем и их количество рассчитывается по формуле $N = 2^n$. В нашем случае для трех подсистем имеем $N = 2^3 = 8$ состояний:

0 – отказов и перерывов нет, экскаватор копает;

1 – простой экскаватора по первой подсистеме участковых отказов и технологических перерывов;

2 – простой экскаватора по второй подсистеме участковых отказов и организационных перерывов;

3 – простой экскаватора по подсистеме общекарьерных перерывов.

Кроме этих четырех простых состояний, возможны еще четыре сложных, то есть таких, при которых экскаватор простаивает одновременно по нескольким причинам. Это следующие состояния:

1–2 – простой экскаватора по причинам первой и второй подсистем участковых отказов, действующих одновременно;

1–3 – простой экскаватора по первой подсистеме участковых отказов и по подсистеме общекарьерных отказов;

2–3 – простой по причинам второй подсистемы участковых и по системе общекарьерных отказов;

1–2–3 – простой экскаватора при совместном действии причин по всем трем подсистемам.

Ряд состояний (0–1, 1–0, 0–2, 2–0, 0–3, 3–0) невозможен ввиду их несовместимости. Невозможны также состояния 2–1 и 3–1, поскольку при отказах второй или третьей подсистем отказы по первой подсистеме возникнуть уже не могут (отказы по этой подсистеме возникают только на машинном времени). Этим же обстоятельством объясняется тот факт, что одни состояния связаны взаимными переходами, а другие – односторонними. Например, обратный переход 1–2 > 1 невозможен, так как появившийся первым отказ по первой подсистеме первым и устраняется, а отказ по второй подсистеме ожидает своей очереди (ограниченное восстановление). При окончании устранения отказа первой подсистемы система в целом всегда перейдет в состояние 2, то есть начнется устранение отказа второй подсистемы. Все состояния, переходы и их интенсивность представлены в виде графа (см. рис. 2)

На основании разработанного графа составим дифференциальные линейные уравнения Маркова–Колмогорова, описывающие изменения во времени вероятностей состояний системы «экскаваторный забой»:

$$\begin{aligned}
\frac{dP_0(t)}{dt} &= -(\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3)P_0(t)+\mu_1 P_1(t)+\mu_2 P_2(t)+\mu_3 P_3(t);\\
\frac{dP_1(t)}{dt} &= -(\mu_1+\lambda_2+\lambda_3)P_1(t)+\lambda_1 P_0(t)+\mu_3 P_{1-3}(t);\\
\frac{dP_2(t)}{dt} &= -(\mu_2+\lambda_3)P_2(t)+\lambda_2 P_0(t)+\mu_1 P_{1-2}(t)+\mu_3 P_{2-3}(t);\\
\frac{dP_3(t)}{dt} &= -(\mu_1+\lambda_2)P_3(t)+\lambda_3 P_0(t)+\mu_2 P_{2-3}(t)+\mu_1 P_{1-3}(t);\\
\frac{dP_{1-2}(t)}{dt} &= -(\mu_1+\lambda_3)P_{1-2}(t)+\lambda_2 P_1(t)+\mu_3 P_{1-2-3}(t);\\
\frac{dP_{2-3}(t)}{dt} &= -(\mu_3+\mu_2)P_{2-3}(t)+\lambda_3 P_2(t)+\mu_1 P_{1-2-3}(t);\\
\frac{dP_{1-3}(t)}{dt} &= -(\mu_1+\mu_3+\lambda_3)P_{1-3}(t)+\lambda_3 P_1(t);\\
\frac{dP_{1-2-3}(t)}{dt} &= -(\mu_1+\mu_3)_{1-2-3}(t)+\lambda_3 P_{1-2}(t)+\lambda_2 P_{1-3}(t)\ .
\end{aligned}\qquad (12)$$

Решение приведенной системы линейных дифференциальных уравнений показало, что последние три состояния маловероятны и их можно не учитывать (ошибка 1,5 %). Тогда граф системы «экскаваторный забой» и соответствующие уравнения значительно упрощаются:

$$\begin{aligned}
&\frac{dP_0}{dt} = -\left(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3\right) P_0 + \mu_1 P_1 + \mu_2 P_2 + \mu_3 P_3;\\
&\frac{dP_1}{dt} = -\left(\lambda_2 + \mu_1\right) P_1 + \lambda_1 P_0;\\
&\frac{dP_2}{dt} = -\mu_2 P_2 + \mu_1 P_{1-2} + \lambda_2 P_0;\\
&\frac{dP_3}{dt} = -\mu_1 P_3 + \lambda_3 P_0;\\
&\frac{dP_{1-2}}{dt} = -\mu_1 P_{1-2} + \lambda_2 P_1\ .
\end{aligned} \tag{13}$$

Для отыскания стационарного решения этой системы приравняем, согласно теореме Маркова, производные нулю и решаем полученную систему линейных алгебраических уравнений с учетом условий полной вероятности

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_{1-2} = 1. \tag{14}$$

В результате получим вероятность каждого состояния:

$$\begin{aligned}
&P_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1 - \lambda_2} P_0\ ;\\
&P_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\mu_2\left(\mu_1 + \lambda_2\right)} P_0 + \frac{\lambda_2}{\mu_2} P_0\ ;\\
&P_3 = \frac{\lambda_3}{\mu_3} P_0\ ;\\
&P_{1-2} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\mu_2\left(\mu_1 + \lambda_2\right)} P_0 + \frac{\lambda_2}{\mu_2} P_0\ ;\\
&P_0 = \left[1 + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \frac{\lambda_3}{\mu_3} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 + \mu_1}\left(1 + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \frac{\lambda_2}{\mu_1}\right)\right]^{-1}
\end{aligned} \tag{15}$$

Последнее выражение для стационарного состояния и будет средним значением коэффициента использования экскаватора во времени, выраженным через интенсивности переходов:

$$K_{И} = \left[1 + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \frac{\lambda_3}{\mu_3} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 + \mu_1}\left(1 + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \frac{\lambda_2}{\mu_1}\right)\right]^{-1}. \qquad (16)$$

Выводы

С применением системного подхода к процессу использования экскаватора во времени разработан комплекс математических моделей в виде системы дифференциальных уравнений Маркова–Колмогорова для описания вероятности состояний как каждой из выделенных подсистем, так и для системы «экскаваторный забой» в целом.

Как случайная величина, коэффициент использования экскаватора во времени имеет усеченное гамма-распределение плотности вероятности, что установлено аналитически и подтверждено фактическими данными.

Учет случайных колебаний параметров, вида распределения плотности вероятности перерывов, ограничений, детальный учет организационных, технологических перерывов и отказов оборудования для конкретных условий в математической модели коэффициента использования экскаватора позволяет повысить точность и достоверность расчетов в 3–4 раза по сравнению с существующими методиками.

Существенное повышения коэффициента использования экскаватора во времени, а следовательно, и повышение надежности экскавационного процесса за счет изменения какого-либо одного определяющего фактора невозможно. Необходимо комплексное совершенствование организации работ на участке, повышение надежности экскаватора и другого оборудования в первую очередь за счет выбора рациональных режимов его работы, совершенствования организации ремонта, уменьшения времени на конечные операции.

1. *Домбровский Н. Г.* Экскаваторы / Н. Г. Домбровский. – М., Машиностроение, 1969. – 236 с.

2. *Ветров Ю. И.* Резание грунтов землеройными машинами / Ю. И. Ветров. – М., Машиностроение, 1971. – 183 с.

3. *Беляков Ю. И.* Совершенствование экскаваторных работ на карьерах / Ю. И. Беляков, В. М. Владимиров. – М., Недра, 1974. – 295 с.

4. *Ржевский В. В.* Открытые горные работы. Ч. I. Производственные процессы: Учебник для вузов. // В. В. Ржевский – М., Недра., 1985. – 479 с.

5. *Тангаев И. А.* Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых / И. А. Тангаев – М.: Недра, 1986. – 231 с.

6. *Крючков А. І.* Наукові принципи і математичні моделі процесів гірничого виробництва / А. І. Крючков // Вісник НТУ України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»: Зб. наук. праць. – 2000. – Вип. 2. – С. 11–17.