



УДК 519.876.5:622.2

ВЫЯВЛЕНИЕ ВИДА ВЕРОЯТНОСТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВСКРЫШНЫХ РАБОТ НА РАЗРЕЗАХ КУЗБАССА

Кузнецов И.С.^{1,2}, Зиновьев В.В.^{1,2}, Кузнецова А.В.²

¹ Федеральний исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук

² Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева



Информация о статье

Поступила:

11 января 2024 г.

Рецензирование:

08 апреля 2024 г.

Принята к печати:

29 апреля 2024 г.

Ключевые слова:

разработка угольных месторождений, открытые горные работы, мехлопата, имитационное моделирование, экскаваторно-автомобильный комплекс, вскрышные работы, гидролопата, вероятностные распределения.

Аннотация. В статье представлены результаты анализа чувствительности к изменению вида вероятностного распределения продолжительности технологических процессов при имитационном моделировании вскрышных горных работ для условий шести разрезов Кузбасса, а также результаты исследования 280 выборок значений продолжительностей основных технологических процессов функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов и идентификации законов распределения этих значений. Подробно описаны примеры анализа чувствительности модели к изменению закона распределения основных технологических процессов, а также выявления вида распределения при моделировании вскрышных горных работ в условиях Кедровско-Крохалеваго каменноугольного месторождения.

Для цитирования: Кузнецов И.С., Зиновьев В.В., Кузнецова А.В. Выявление вида вероятностного распределения продолжительности основных технологических процессов при моделировании вскрышных работ на разрезах Кузбасса // Техника и технология горного дела. – №2(25). – С. 79-103. – DOI: 10.26730/2618-7434-2024-2-79-103, EDN: SBMZUH

Введение

Известно, что при разработке угольных месторождений открытым способом наибольшие затраты приходится на вскрышные работы, объем которых превышает объем добычи угля примерно в 7-10 раз [1]. При ведении таких работ большое количество элементов технологии взаимодействует во времени и ограниченном пространстве, поэтому для повышения эффективности необходимо решать ряд задач по согласованию параметров оборудования, продолжительности выполнения операций и др. Методы имитационного моделирования позволяют создавать компьютерные модели вскрышных горных работ и на их основе с достаточной точностью и высокой скоростью решать указанные задачи. На основе этих методов с использованием программного продукта GPSS World-Core (ООО «Элина-Компьютер», Россия) в ФИЦ УУХ СО РАН создана универсальная имитационная модель, позволяющая отображать



основные технологические процессы открытых горных работ (маневры перед погрузкой / разгрузкой, погрузка, разгрузка, движение в груженом / порожнем направлениях) с применением экскаваторно-автомобильных комплексов (ЭАК) [2].

На разрезах Кузбасса при добыче угля открытым способом производство вскрышных работ преимущественно осуществляется с использованием ЭАК, состоящих из экскаваторов типа прямая / обратная механическая / гидравлическая лопата (ЭКГ-10, ЭКГ-12,5, ЭКГ-15, ЭКГ-18, ЭКГ-35, Komatsu PC-3000, Hitachi EX-1900, Hitachi EX-2500, P&H 2800, Liebherr R994, WK-35, P&H 4100 и др.) с вместимостью ковша 10-56 м³ и автосамосвалов с грузоподъемностью 130-320 тонн (БелАЗ-7513, БелАЗ-7530, БелАЗ-75600, Komatsu HD830E, Hitachi EH-3500 и др.) [3-5].

Продолжительность технологических процессов является случайной величиной в силу влияния вероятностных аспектов ведения вскрышных горных работ. Поэтому при имитационном моделировании работы ЭАК необходимо учитывать эту особенность для повышения точности и достоверности результатов вычислительных экспериментов. Анализ литературных источников показал, что при исследовании работы ЭАК для учета вероятностного характера технологических процессов авторы используют различные виды распределений, а именно: Гамма-распределение, Гаусса-распределение и Бета-распределение [3,6-8]. Следовательно, для ввода в имитационную модель случайных величин, отображающих основные процессы при функционировании ЭАК, необходим анализ чувствительности модели к изменению вероятностного закона распределения. Если модель окажется чувствительна к изменению закона, то необходимы дополнительные исследования по идентификации вида вероятностного распределения с применением нескольких статистических критериев для повышения достоверности и точности результатов моделирования при отображении вскрышных горных работ на разрезах Кузбасса.

Основная часть

Как правило, для анализа чувствительности вероятностной модели к какому-либо фактору используется дисперсионный анализ ANOVA (analysis of variance) [9]. Если фактор не оказывает влияния на отклик, то он является не значимым, и считается, что модель к нему не чувствительна. С другой стороны, если фактор влияет на отклик, то его количественное значение сравнивают с оценкой изменчивости наблюдения, то есть со стандартной ошибкой. Это делается для исключения эффектов, которые являются не более чем случайной флуктуацией.

В ANOVA с одним фактором A используется аддитивная математическая модель, которая определяет компоненты изменения в наблюдениях:

$$y_{ig} = m + a_i^A + e_{ig}, \quad (1)$$

где a_i^A – главный эффект фактора A на уровне i . Так как используется только один фактор, число вариантов комбинаций определяется числом уровней i этого фактора.

Дисперсионный анализ заканчивается построением таблицы ANOVA, в которой анализируется влияние фактора A на отклик и случайные помехи наблюдения. С помощью этой таблицы проверяется гипотеза об отсутствии влияния фактора. Если гипотеза об отсутствии влияния фактора справедлива, то считается, что все результаты вычислительного эксперимента получены из одной генеральной совокупности. Для проверки гипотезы используется критерий Фишера (F -распределение), который определяет отношение выборочных дисперсий. Если фактор существенно влияет на отклик, то расчетное значение F -распределения принимает значение большее, чем критическое теоретическое значение, и F -статистика становится значимой, что приводит к отбрасыванию гипотезы об отсутствии влияния фактора, то есть фактор является значимым [9].

В качестве примера в статье представлены результаты анализа чувствительности к изменению вида вероятностного распределения продолжительности технологических процессов в имитационной модели, отображающей работу ЭАК, состоящего из экскаватора ЭКГ-10 и трех автосамосвалов БелАЗ-7513, функционирующих в условиях Кедровско-Крохалевского каменноугольного месторождения при разработке вскрышной породы IV категории по блочности. Параметры эксплуатации и средняя продолжительность выполнения основных



технологических процессов согласно хронометражным данным представлены в Таблицах 1 и 2 соответственно, а технологическая схема работы экскаватора отображена на Рис. 1.

Таблица 1. Параметры эксплуатации производства вскрышных работ с использованием экскаватора ЭКГ-10 и автосамосвалов БелАЗ-7513 при разработке Кедровско-Крохалевского каменноугольного месторождения

Table 1. Operating parameters for stripping production using an EKG-10 excavator and BelAZ-7513 dump-trucks during the development of the Kedrovsko-Krokhalevsky coal deposit

Группа параметров	Параметры	Значение, ед. изм
Рабочие и технологические параметры экскаватора ЭКГ-10	Максимальный радиус черпания на уровне стояния	12,6 м
	Максимальный радиус черпания	18,4 м
	Максимальная высота черпания	13,5 м
	Вместимость ковша	10,0 м ³
Конструктивно-технологические параметры автосамосвала БелАЗ-7513	Максимальная грузоподъемность	130 т
	Вместимость кузова с «шапкой»	71,2 м ³
	Номинальная вместимость кузова	45,2 м ³
	Минимальный радиус поворота	13,0 м
	Эксплуатационная масса автосамосвала	109,5 т
Физико-механические свойства вскрышной породы	Плотность вскрышной породы	2,40 т/м ³
Горнотехнические условия эксплуатации	Дальность транспортирования	2,70 км
	Высота вскрышного уступа	15,0 м
	Тип забоя	Торцевой
	Ширина заходки	25 м
	Вид заходки	Широкая
	Схема подъезда автосамосвала	Тупиковая
	Средний угол поворота экскаватора	90 град
	Коэффициент экскавации	0,6
	Ширина рабочей площадки	56 м
	Число машин, одновременно находящихся под погрузкой	1 шт
Средний коэффициент разрыхления вскрышной породы в ковше	1,5	

Таблица 2. Средняя продолжительность основных технологических процессов при производстве вскрышных работ с использованием экскаватора ЭКГ-10 и автосамосвалов БелАЗ-7513 при разработке Кедровско-Крохалевского каменноугольного месторождения

Table 2. Average duration of the main technological operations of EAC during stripping operations using an EKG-10 excavator and BelAZ-7513 dump trucks at the development of Kedrovsko-Krokhalevsky coal deposit

Технологический процесс	Средняя продолжительность, с
Маневры при погрузке	95,3
Погрузка автосамосвала	243,1
Движение автосамосвала в груженом направлении	485,8
Маневры при разгрузке	40,1
Разгрузка	36,0
Движение автосамосвала в порожнем направлении	413,4

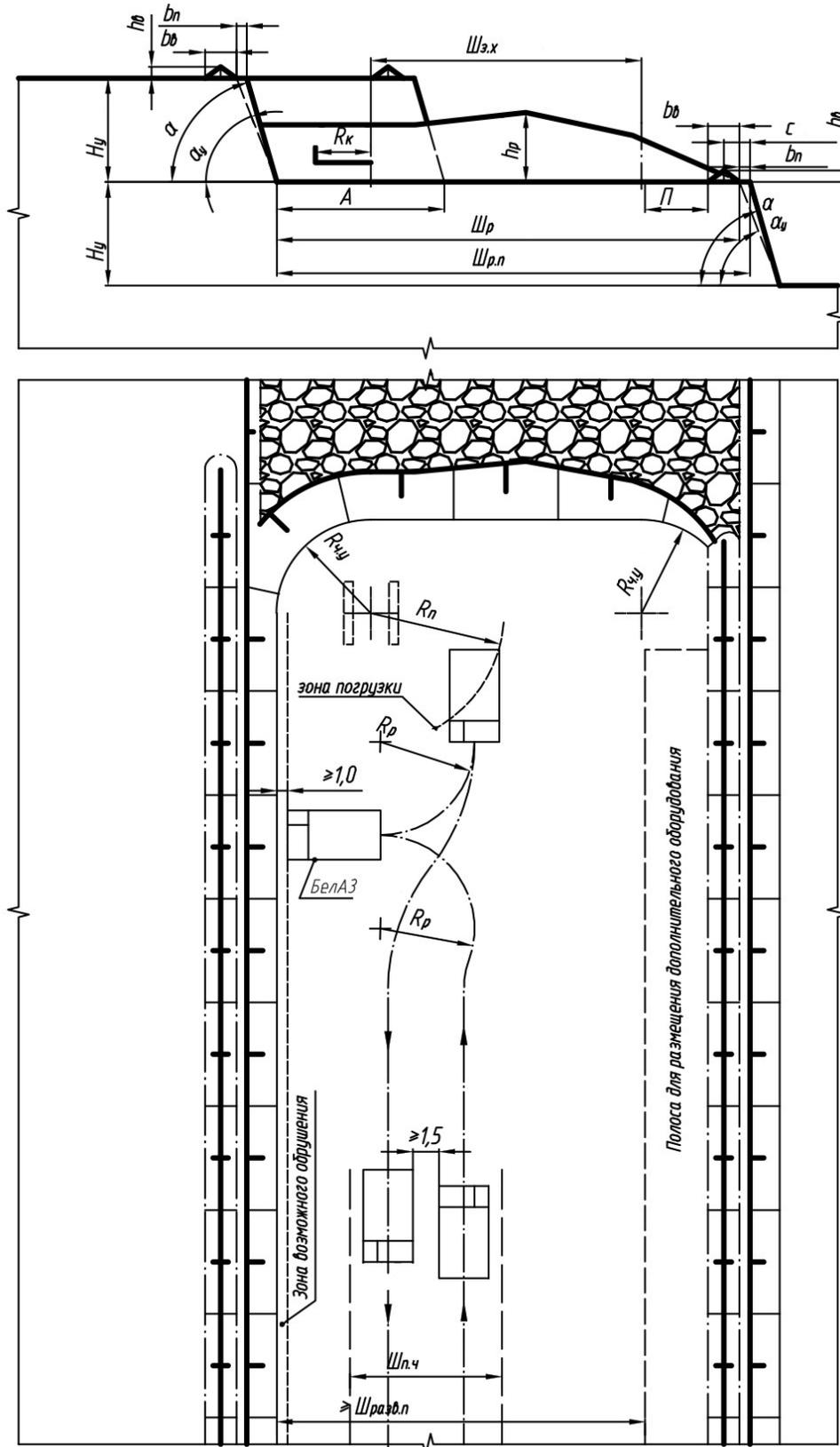


Рис. 1. Технологическая схема работы прямой мехлопаты при разработке вскрышных пород в торцевом забое с погрузкой в средства транспорта на уровне стояния экскаватора
 Fig. 1. Flowchart of the operation of a rope shovel during the overburden rocks excavation in the end face with loading into dump trucks at the level of the excavator standing



Продолжительность основных технологических процессов вводилась в имитационную модель на основе реальных хронометражных данных в виде непрерывных функций распределения. В Таблице 3 для примера представлены интервалы и значения частот продолжительности процесса погрузки вскрышной породы экскаватором ЭКГ-10 в автосамосвалы БелАЗ-7513, а на Рис. 2 – график функции распределения.

Таблица 3. Интервалы и значения частот продолжительности погрузки автосамосвала
Table 3. Frequency intervals and values dump truck loading duration

Интервал	Относительная частота	Накопленная частота
194-222	0,289	0,289
222-250	0,400	0,689
250-278	0,156	0,845
278-306	0,111	0,956
306-334	0,022	0,978
334-362	0,022	1,000

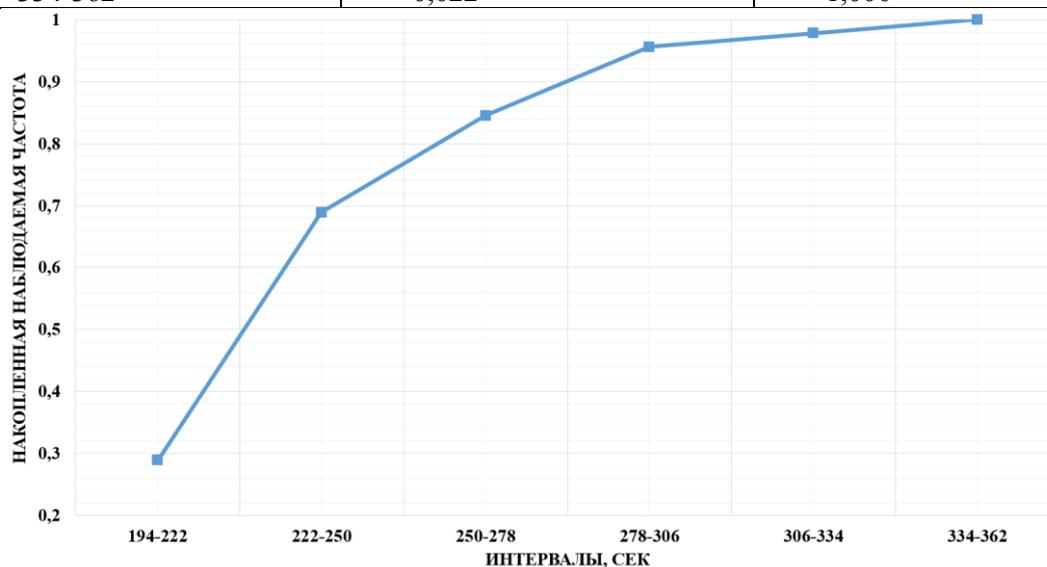


Рис. 2. График функции распределения продолжительности технологического процесса погрузки вскрышной породы экскаватором ЭКГ-10 в автосамосвал БелАЗ-7513
Fig. 2. Graph of the distribution function of the duration of the technological process of loading overburden rock with an EKG-10 excavator into a BelAZ-7513 dump truck

Ввод в имитационную модель функций выполнялся по следующему синтаксису:

Name FUNCTION RNStr, Bn

$$v_1^{\text{накоп}}, N_1 / v_2^{\text{накоп}}, N_2 / v_3^{\text{накоп}}, N_3 / \dots / v_i^{\text{накоп}}, N_i / v_n^{\text{накоп}}, N_n$$

ADVANCE (FN \$Name)

где *RN* – генератор случайных чисел; *Str* – номер генератора случайных чисел (1...8); *B* – тип функции; *n* – количество интервалов; $v_1^{\text{накоп}}$ – значение накопленной частоты для правой границы первого интервала; N_1 – значение правой границы первого интервала; $v_2^{\text{накоп}}$ – значение накопленной частоты для правой границы второго интервала; N_2 – значение правой границы второго интервала; $v_3^{\text{накоп}}$ – значение накопленной частоты для правой границы третьего интервала; N_3 – значение правой границы второго интервала; $v_i^{\text{накоп}}$ – значение накопленной частоты для правой границы *i*-го интервала; N_i – значение правой границы *i*-го интервала; $v_n^{\text{накоп}}$ – значение накопленной частоты для правой границы *n*-го интервала; N_n – значение правой границы *n*-го интервала; *Name* – имя функции, к которой идет обращение.



Подобные функции распределений были также введены в модель для продолжительности технологических процессов: маневровых работ перед погрузкой и разгрузкой, движения в груженом и порожнем направлении, разгрузки, ожидания погрузки.

При анализе чувствительности модели к виду вероятностного распределения исследовалось влияние гамма-распределения, Гаусса-распределения и бета-распределения на следующие технологические показатели: коэффициент использования экскаватора, средняя продолжительность погрузки, средняя продолжительность ожидания погрузки, средняя продолжительность рейса автосамосвалов, количество совершенных рейсов автосамосвалами за указанный период. При этом ввод в имитационную модель указанных распределений выполнялся по следующему синтаксису:

- Гамма-распределение:

$$ADVANCE(Gamma(Str, Loc, \beta_i, \alpha_i)),$$

где Str – номер генератора случайных чисел (1...8); Loc – величина сдвига (константа, добавляемая к значению моделируемой величины); α_i – форма кривой γ -распределения i -го процесса; β_i – параметр масштаба функции γ -распределения i -го процесса.

- Бета-распределение:

$$ADVANCE(Beta(Str, Min, Max, \alpha_i, \beta_i)),$$

где Str – номер генератора случайных чисел (1...8); Min – наименьшее значение интервала для генерации; Max – наибольшее значение интервала для генерации; α_i – форма кривой β -распределения i -го процесса; β_i – параметр масштаба функции β -распределения i -го процесса.

- Гаусса-распределение:

$$ADVANCE(Normal(Str, Mean, StdDev)),$$

где Str – номер генератора случайных чисел (1...8); $Mean$ – математическое ожидание; $StdDev$ – среднеквадратическое отклонение.

Период моделирования взят равным 7 часам (в течение этого периода автосамосвалы были жестко закреплены за экскаватором и их перераспределения не происходило).

При проведении экспериментов принято допущение, что коэффициент использования грузоподъемности автосамосвала равен единице по причине отсутствия данных о количестве загруженных ковшей экскаватора в кузов автосамосвала. Также принято, что продолжительности всех технологических процессов функционирования ЭАК распределены по одному и тому же закону.

Поскольку продолжительность процессов носит вероятностный характер, для повышения точности и достоверности результатов вычислительных экспериментов осуществлялось 1000 прогонов модели с различной последовательностью псевдослучайных чисел.

Чтобы осуществить полный перебор всех вариантов сочетаний видов распределений продолжительности технологических процессов, использован элемент комбинаторики – сочетание без повторений с применением формулы (2) [10].

$$C_k^n = \frac{n!}{(n-k)! \cdot k!} = \frac{4!}{(4-2)! \cdot 2!} = 6, \quad (2)$$

где n – общее количество различных элементов ($n = 4$), шт; k – количество элементов в сочетании ($k = 2$), шт.

В Таблице 4 представлены варианты сочетаний без повторений видов распределений продолжительностей технологических процессов.

Степень влияния фактора (вида распределения) определялась по значению выборочного коэффициента детерминации R_k^2 [11].

$$R_k^2 = \frac{\tilde{\sigma}_k^2}{\tilde{\sigma}_Y^2} \cdot 100\%, \quad (3)$$



где $\tilde{\sigma}_k^2$ – дисперсия групповых средних по k -му фактору; $\tilde{\sigma}_Y^2$ – общая выборочная дисперсия.

Таблица 4. Варианты сочетаний без повторений видов распределений продолжительностей технологических процессов

Table 4. Options for combinations without repetition of the laws of distribution of the duration of technological processes

№ варианта	Сочетание
1	Функция по хронометражу – гамма-распределение
2	Функция по хронометражу – бета-распределение
3	Функция по хронометражу – Гаусса-распределение
4	гамма-распределение – бета-распределение
5	гамма-распределение – Гаусса распределение
6	бета-распределение – Гаусса распределение

В Таблице 5 представлен фрагмент исходных данных для проведения однофакторного дисперсионного анализа на примере оценки сменной эксплуатационной производительности ЭАК одного из вариантов сочетания видов распределений (№1 в Таблице 4) для условий Кедровско-Крохалевского каменноугольного месторождения.

Таблица 5. Исходные данные для проведения однофакторного дисперсионного анализа

Table 5. Input data for conducting one-way ANOVA

№ прогона модели	Значения сменной эксплуатационной производительности ЭАК	
	Функция по хронометражу	Гамма-распределение
1	2979,2	3033,3
2	2979,2	2925,0
3	3033,3	2925,0
...		
1000	2979,2	2979,2

Результаты дисперсионного анализа на основе данных Таблицы 5 представлены в Таблице 6.

Таблица 6. Результаты дисперсионного анализа

Table 6. ANOVA results

Уровень значимости, α	Наблюдаемое значение критерия Фишера, F	Критическое значение критерия Фишера $F_{крит}$	Коэффициент детерминации R^2 , %
0,05	98408,7	3,8	3,9

Как видно из Таблицы 6, расчетное значение критерия Фишера по параметру дисперсионного анализа сменной эксплуатационной производительности ЭАК для варианта сочетания Функция по хронометражу – гамма-распределение находится в критической области с правосторонним интервалом $(3,9...+\infty)$ при $\alpha=0,05$. Поэтому гипотеза о равенстве выборочных средних отвергается, т.е. считается, что изменение эксплуатационной производительности ЭАК на 3,9% связано с изменением вида распределения продолжительности технологических процессов с Функции по хронометражу на Гамма-распределение.

Аналогичным образом были проведены исследования влияния изменения вида распределения продолжительностей основных технологических процессов для условий шести действующих разрезов Кузбасса при производстве вскрышных работ. Результаты проведенных исследований представлены в Таблицах 7-10.



Таблица 7. Результаты дисперсионного анализа при моделировании вскрышных работ для условий разрезов Кузбасса по показателю «Средняя продолжительность ожидания погрузки»
Table 7. Results of analysis of variance when modeling stripping operations for the conditions of open-pit mines in Kuzbass according to the indicator «Average waiting time for loading»

Сочетание	Разрез №1 – ЭКГ-10 и БелАЗ-7513 (Порода IV категории по блочности)		Разрез №2 – ЭКГ-12 и БелАЗ-7530 (Порода IV категории по блочности)		Разрез №3 – ЭКГ-18 и БелАЗ-7513 (Порода IV категории по блочности)	
	F	$R^2, \%$	F	$R^2, \%$	F	$R^2, \%$
Функция по хронометражу – Гамма-распределение	60,0	2,9%	111,8	5,3%	196,6	9,0%
Функция по хронометражу – Бета-распределение	371,6	15,7%	445,3	18,2%	20084,9	91,0%
Функция по хронометражу – Гаусса-распределение	47,5	2,4%	580,1	22,5%	307,2	13,3%
Гамма-распределение – Бета-распределение	711,7	26,3%	68,9	3,3%	23173,6	92,1%
Гамма-распределение – Гаусса-распределение	0,7	0,04%	156,1	7,2%	11,1	0,6%
Бета-распределение – Гаусса-распределение	699,4	25,9%	30,9	1,5%	25001,2	92,6%
Сочетание	Разрез №4 Komatsu PC-3000 и БелАЗ-7513 (Порода IV категории по блочности)		Разрез №5 Komatsu PC 2000 и БелАЗ-7555В (Порода I категории по блочности)		Разрез №6 ЭКГ-15 и БелАЗ-7513 (Порода III категории по блочности)	
	F	$R^2, \%$	F	$R^2, \%$	F	$R^2, \%$
Функция по хронометражу – Гамма-распределение	18,5	0,9%	118,8	5,6%	15,5	0,7%
Функция по хронометражу – Бета-распределение	5078,9	71,8%	5078,9	71,8%	6078,9	75,7%
Функция по хронометражу – Гаусса-распределение	67,5	3,3%	67,5	3,3%	72,5	3,9%
Гамма-распределение – Бета-распределение	4980,3	71,4%	2177,6	52,2%	2286,6	50,2%
Гамма-распределение – Гаусса-распределение	16,7	0,8%	0,06	0,003%	14,5	0,3%
Бета-распределение – Гаусса-распределение	4431,3	68,9%	2442,9	55,0%	2485,9	35,8%
Критическое значение критерия Фишера $F_{крит} = 3,8$ при $\alpha=0,05$						
Вывод: $F > F_{крит}$ – гипотезу о равенстве выборочных средних отвергаем, т. е. считаем, что влияние фактора на отклик есть						



Таблица 8. Результаты дисперсионного анализа при моделировании вскрышных работ для условий разрезов Кузбасса по показателю «Средняя продолжительность рейса автосамосвала»
Table 8. Results of analysis of variance when modeling stripping operations for the conditions of Kuzbass open-pit mines by indicator «Average duration of a dump truck trip»

Сочетание	Разрез №1 – ЭКГ-10 и БелАЗ-7513 (Порода IV категории по блочности)		Разрез №2 – ЭКГ-12 и БелАЗ-7530 (Порода IV категории по блочности)		Разрез №3 ЭКГ-18 и БелАЗ-7513 (Порода IV категории по блочности)	
	F	$R^2, \%$	F	$R^2, \%$	F	$R^2, \%$
Функция по хронометражу – Гамма-распределение	651,5	24,6%	2122,9	51,5%	240,4	10,7%
Функция по хронометражу – Бета-распределение	15234,0	88,4%	59531,7	96,8%	1762,5	46,9%
Функция по хронометражу – Гаусса-распределение	85,9	4,1%	523,2	20,8%	384,5	16,1%
Гамма-распределение – Бета-распределение	23795,0	92,3%	66441,9	97,1%	3559,5	64,0%
Гамма-распределение – Гаусса-распределение	257,2	11,41%	536,5	21,2%	14,3	0,7%
Бета-распределение – Гаусса-распределение	17784,3	89,9%	61756,3	96,9%	4368,2	68,6%
Сочетание	Разрез №4 Komatsu PC-3000 и БелАЗ-7513 (Порода IV категории по блочности)		Разрез №5 Komatsu PC 2000 и БелАЗ-7555В (Порода I категории по блочности)		Разрез №6 ЭКГ-15 и БелАЗ-7513 (Порода III категории по блочности)	
	F	$R^2, \%$	F	$R^2, \%$	F	$R^2, \%$
Функция по хронометражу – Гамма-распределение	45,3	2,2%	784,4	28,2%	55,3	3,2%
Функция по хронометражу – Бета-распределение	33100,3	94,3%	33100,3	94,3%	32109,1	90,3%
Функция по хронометражу – Гаусса-распределение	0,2	0,01%	1014,9	33,7%	0,4	0,05%
Гамма-распределение - Бета-распределение	26969,9	93,1%	18876,2	90,4%	3559,5	64,0%
Гамма-распределение – Гаусса-распределение	39,9	2,0%	7,9	0,4%	49,9	3,0%
Бета-распределение – Гаусса-распределение	33611,5	94,4%	21170,0	91,4%	35811,5	93,4%
Критическое значение критерия Фишера $F_{крит} = 3,8$ при $\alpha=0,05$						
Вывод: $F > F_{крит}$ – гипотезу о равенстве выборочных средних отвергаем, т. е. считаем, что влияние фактора на отклик есть						



Таблица 9. Результаты дисперсионного анализа при моделировании вскрышных работ для условий разрезов Кузбасса по показателю «Количество совершенных рейсов автосамосвалами»
 Table 9. Results of variance analysis when modeling stripping operations for the conditions of Kuzbass open-pit mines by indicator «Number of completed trips by dump trucks»

Сочетание	Разрез №1 – ЭКГ-10 и БелАЗ-7513 (Порода IV категории по блочности)		Разрез №2 – ЭКГ-12 и БелАЗ-7530 (Порода IV категории по блочности)		Разрез №3 ЭКГ-18 и БелАЗ-7513 (Порода IV категории по блочности)	
	F	$R^2, \%$	F	$R^2, \%$	F	$R^2, \%$
Функция по хронометражу – Гамма-распределение	81,5	3,9%	2206,4	52,5%	236,0	10,6%
Функция по хронометражу – Бета-распределение	15100,1	88,3%	57686,3	97,6%	2784,6	58,2%
Функция по хронометражу – Гаусса-распределение	96,7	4,6%	539,0	21,2%	380,4	16,0%
Гамма-распределение – Бета-распределение	16818,4	89,4%	71596,3	97,3%	3559,5	64,0%
Гамма-распределение – Гаусса-распределение	0,4	0,02%	529,4	20,9%	14,2	0,7%
Бета-распределение – Гаусса-распределение	17535,3	89,8%	62491,4	96,9%	6052,4	75,2%
Сочетание	Разрез №4 Komatsu PC-3000 и БелАЗ-7513 (Порода IV категории по блочности)		Разрез №5 Komatsu PC 2000 и БелАЗ-7555В (Порода I категории по блочности)		Разрез №6 ЭКГ-15 и БелАЗ-7513 (Порода III категории по блочности)	
	F	$R^2, \%$	F	$R^2, \%$	F	$R^2, \%$
Функция по хронометражу – Гамма-распределение	53,2	2,6%	832,7	29,4%	237,0	11,6%
Функция по хронометражу – Бета-распределение	27869,2	93,3%	27869,2	93,3%	16100,1	78,3%
Функция по хронометражу – Гаусса-распределение	34,9	1,7%	1111,8	35,8%	390,4	16,9%
Гамма-распределение – Бета-распределение	33556,9	94,4%	19162,8	90,6%	72596,3	95,1%
Гамма-распределение – Гаусса-распределение	2,6	0,1%	9,7	0,5%	540,4	22,9%
Бета-распределение – Гаусса-распределение	34462,4	94,5%	21831,6	91,6%	62432,4	78,9%
Критическое значение критерия Фишера $F_{крит} = 3,8$ при $\alpha=0,05$						
Вывод: $F > F_{крит}$ – гипотезу о равенстве выборочных средних отвергаем, т. е. считаем, что влияние фактора на отклик есть						



Таблица 10. Результаты дисперсионного анализа при моделировании вскрышных работ для условий разрезов Кузбасса по показателю «Сменная эксплуатационная производительность ЭАК»

Table 10. Results of variance analysis when modeling stripping operations for the conditions of Kuzbass open-pit mines by indicator «Shift operational performance of EAC»

Сочетание	Разрез №1 – ЭКГ-10 и БелАЗ-7513 (Порода IV категории по блочности)		Разрез №2 – ЭКГ-12 и БелАЗ-7530 (Порода IV категории по блочности)		Разрез №3 ЭКГ-18 и БелАЗ-7513 (Порода IV категории по блочности)	
	F	$R^2, \%$	F	$R^2, \%$	F	$R^2, \%$
Функция по хронометражу – Гамма-распределение	81,5	3,9%	2206,4	52,5%	236,0	10,6%
Функция по хронометражу – Бета-распределение	15100,1	88,3%	57794,6	96,7%	2654,8	57,0%
Функция по хронометражу – Гаусса-распределение	96,7	4,6%	539,0	21,2%	380,4	16,0%
Гамма-распределение – Бета-распределение	16818,4	89,4%	71596,3	97,3%	4975,3	71,3%
Гамма-распределение – Гаусса-распределение	0,4	0,02%	530,5	21,0%	14,2	0,7%
Бета-распределение – Гаусса-распределение	17535,3	89,8%	62491,4	96,9%	6052,4	75,2%
Сочетание	Разрез №4 Komatsu PC-3000 и БелАЗ-7513 (Порода IV категории по блочности)		Разрез №5 Komatsu PC 2000 и БелАЗ-7555В (Порода I категории по блочности)		Разрез №6 ЭКГ-15 и БелАЗ-7513 (Порода III категории по блочности)	
	F	$R^2, \%$	F	$R^2, \%$	F	$R^2, \%$
Функция по хронометражу – Гамма-распределение	53,2	2,6%	832,7	29,4%	237,0	11,6%
Функция по хронометражу – Бета-распределение	27869,2	93,3%	27869,2	93,3%	16100,1	78,3%
Функция по хронометражу – Гаусса-распределение	34,9	1,7%	1111,8	35,8%	390,4	16,9%
Гамма-распределение – Бета-распределение	33556,9	94,4%	19162,8	90,6%	72596,3	95,1%
Гамма-распределение – Гаусса-распределение	2,6	0,1%	9,7	0,5%	540,4	22,9%
Бета-распределение – Гаусса-распределение	34462,4	94,5%	21831,6	91,6%	62432,4	78,9%
Критическое значение критерия Фишера $F_{крит} = 3,8$ при $\alpha=0,05$						
Вывод: $F > F_{крит}$ – гипотезу о равенстве выборочных средних отвергаем, т. е. считаем, что влияние фактора на отклик есть						



Как видно из Таблиц 7-10, расчетное значение критерия Фишера по анализируемым показателям для всех вариантов сочетаний видов распределений в подавляющем большинстве находится в критической области с правосторонним интервалом $(3,8 \dots +\infty)$ при $\alpha = 0,05$. Поэтому гипотеза о равенстве выборочных средних отвергается, т.е. считается, что изменение рассматриваемых показателей эффективности ЭАК в среднем на 60% (минимум на 40% и максимум на 90%) связано с изменением вида распределения продолжительностей основных технологических процессов.

Совпадение полученных значений в Таблицах 9 и 10 объясняется использованием расчетной формулы эксплуатационной производительности ЭАК при моделировании. Данный показатель напрямую зависит от показателя числа совершенных рейсов автосамосвалом, количества закрепленных автосамосвалов за экскаватором и фактической загрузки автосамосвала [3, 12]:

$$Q_{\text{эак}} = (N_p \cdot q_{\text{ф}}) \cdot n_{\text{ас}} = \left(\frac{T}{t_{\text{ожд.погр}} + t_{\text{ман.погр}} + t_{\text{погр}} + t_{\text{груз}} + t_{\text{ман.разг}} + t_{\text{разг}} + t_{\text{порож}}} \cdot \left(\frac{n_k \cdot E \cdot k_{\text{нк}}}{k_p} \right) \right) \cdot n_{\text{ас}}, \quad (4)$$

где N_p – количество совершенных рейсов автосамосвалом; $q_{\text{ф}}$ – фактическая загрузка автосамосвала, м³; $n_{\text{ас}}$ – количество автосамосвалов, закрепленное за экскаватором, шт; T – рассматриваемый период эксплуатации ЭАК, с; $t_{\text{ожд.погр}}$ – время ожидания погрузки, с; $t_{\text{ман.погр}}$ – время выполнения маневровых работ автосамосвалами перед погрузкой, с; $t_{\text{погр}}$ – время погрузки автосамосвала экскаватором, с; $t_{\text{груз}}$ – время движения автосамосвала в груженом направлении, с; $t_{\text{ман.разг}}$ – время выполнения маневровых работ автосамосвалами перед разгрузкой, с; $t_{\text{разг}}$ – время разгрузки автосамосвала, с; $t_{\text{порож}}$ – время движения автосамосвала в порожнем направлении, с; n_k – число ковшей, разгружаемых экскаватором в кузов автосамосвала, шт.; E – вместимость ковша экскаватора, м³; $k_{\text{нк}}$ – коэффициент наполнения ковша; k_p – коэффициент разрыхления.

В имитационной модели ЭАК фиксация совершенного рейса автосамосвалом и доставленной вскрышной породы на отвал выполнялась по следующему синтаксису:

- Фиксация совершенного рейса автосамосвала:

SAVEVALUE REIS+,1.

- Фиксация доставленной вскрышной породы:

SAVEVALUE V_DOST_GM+,P\$QFA.

где *P\$QFA* – обращение к параметру, хранящем информацию о фактической загрузке автосамосвала; *REIS* – имя параметра, куда записываются значения количества совершенных рейсов автосамосвалами; *V_DOST_GM* – имя параметра, куда записываются значения доставленного объема вскрышной породы.

В модели автосамосвалы представлены как многоканальное устройство, в котором количество каналов равно числу автосамосвалов. Фиксация времени рейса автосамосвала выполнялась по следующему синтаксису:

SAVEVALUE T_REIS,ST\$AUTO,

где *T_REIS* – имя параметра, куда записываются значения времени рейса автосамосвала; *ST\$AUTO* – обращение к многоканальному устройству *AUTO* для фиксации времени рейса автосамосвала.

Таким образом, имитационная модель, отображающая вскрышные горные работы с использованием ЭАК, является чувствительной к изменению вида распределения. Поэтому необходимо проводить дополнительные исследования по выявлению вида распределения основных технологических процессов, используя методы математической статистики. Для проведения таких исследований, как правило, используется метод, основанный на разбиении выборки на интервалы, построении гистограммы, расчете частот (наблюдаемых и теоретических), выдвижении гипотезы, оценке правильности выдвинутой гипотезы с использованием теоретических статистических критериев в соответствии с алгоритмом, представленном на Рис. 3.

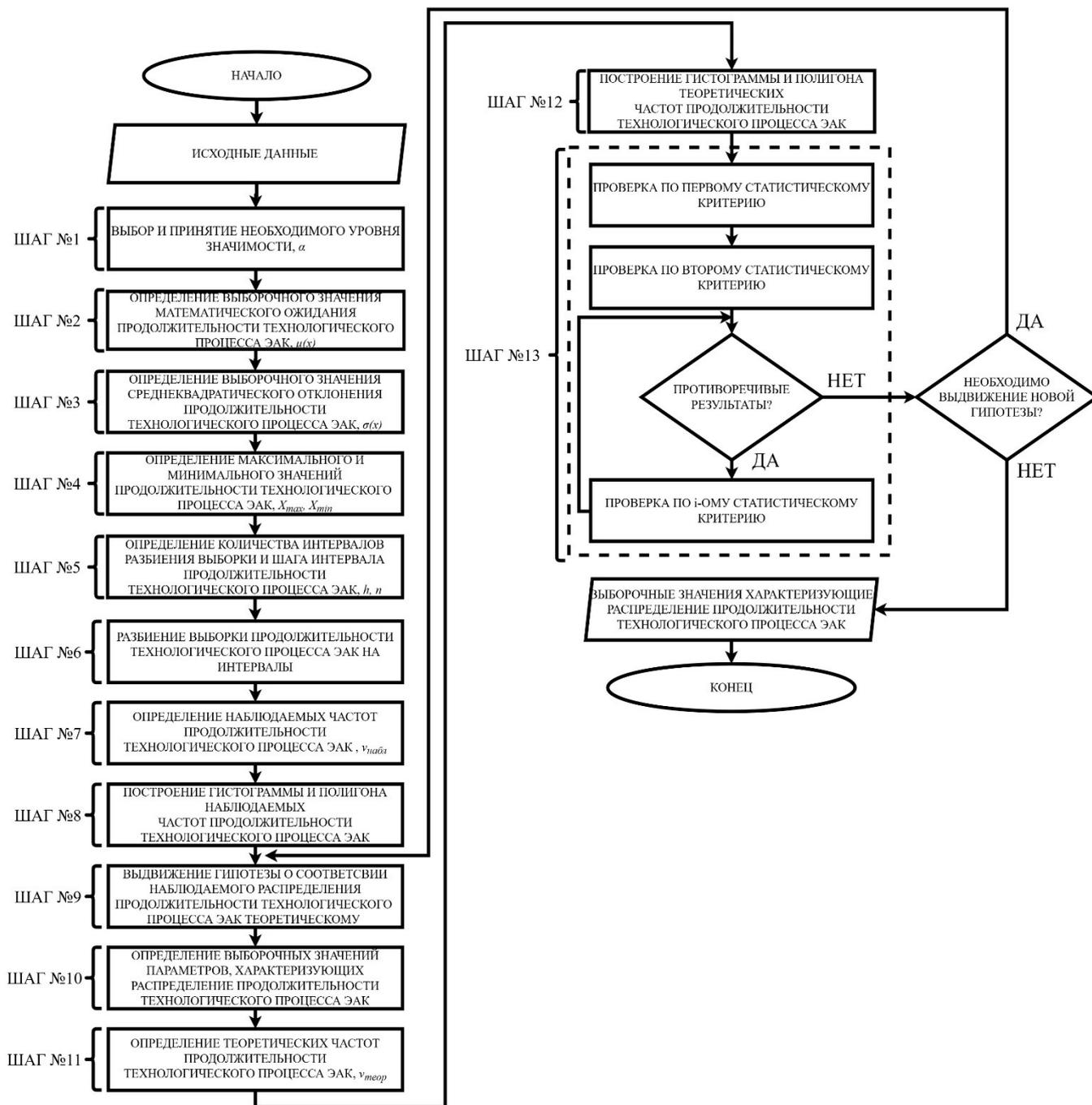


Рис. 3. Алгоритм выявления вида вероятностных законов распределения основных технологических процессов функционирования ЭАК при производстве вскрышных работ на разрезах Кузбасса

Fig. 3. Algorithm for identifying probabilistic laws of distribution of the main technological processes of EAC during stripping operations in Kuzbass open-pit mines

В качестве программного продукта для реализации представленного алгоритма целесообразно использовать MS Excel, поскольку он:

- является одним из самых распространенных продуктов для выполнения аналитических расчетов операций;
- не требует профессиональных навыков программирования;
- имеет простой и понятный интерфейс;



- имеет возможность применения любого метода при проведении расчетов.

Согласно алгоритму (Рис. 3), на первом шаге выбирается уровень значимости принятия или отвержения гипотезы в зависимости от требуемого уровня значимости (α). Как правило, уровень значимости выбирается в интервале $0,1 \geq \alpha \geq 0,01$ [12].

На втором шаге определяется выборочное значение математического ожидания продолжительности технологического процесса функционирования ЭАК $\mu(x)$, приблизительно равное выборочному среднему X_{cp} [12,13]:

$$\mu(x) = X_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}, \quad (5)$$

где x_i – значение i -го элемента выборки; i – номер элемента выборки; N – размер выборки (количество элементов в выборке).

На третьем шаге определяется выборочное значение среднеквадратического отклонения продолжительности технологического процесса при функционировании ЭАК $\sigma(x)$ [12, 13]:

$$\sigma(x) = \sqrt{D} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - X_{cp})^2}, \quad (6)$$

где D – выборочная дисперсия; x_i – значение i -го элемента выборки; i – номер элемента выборки; N – размер выборки (количество элементов в выборке); X_{cp} – выборочное среднее.

Затем определяется максимальное (X_{max}) и минимальное (X_{min}) значения продолжительности технологического процесса функционирования ЭАК. В MS Excel для этого используются встроенные функции:

$$X_{max} = МАКС(x_1, x_2 \dots x_i), \quad (7)$$

$$X_{min} = МИН(x_1, x_2 \dots x_i), \quad (8)$$

где x_1 – значение 1-го элемента выборки; x_2 – значение 2-го элемента выборки; x_i – значение i -го элемента выборки.

На пятом шаге производится расчет числа групп интервалов (n) и значение шага интервала продолжительности технологического процесса ЭАК (h) по формулам [3,12,13]:

$$h = \frac{X_{max} - X_{min}}{n} = \frac{X_{max} - X_{min}}{1 + 3,322 + Lg(N)}, \quad (9)$$

где X_{max} – максимальное значение продолжительности технологического процесса ЭАК; X_{min} – минимальное значение продолжительности технологического процесса ЭАК; n – число групп интервалов; N – размер выборки (количество элементов в выборке).

На шестом шаге производится разбиение выборки значений продолжительности технологического процесса функционирования ЭАК на требуемое количество интервалов.

На следующем шаге определяются наблюдаемые частоты, т.е. количество элементов выборки, которые попали в заданный интервал.

Затем производится построение гистограммы и полигона наблюдаемых частот.

На девятом шаге выдвигается нулевая гипотеза (H_0) о соответствии наблюдаемого распределения теоретическому, исходя из вида построенной гистограммы и полигона наблюдаемых частот.

Следующий шаг посвящен определению выборочных значений, характеризующих конкретное распределение продолжительности технологического процесса функционирования ЭАК.

На одиннадцатом шаге рассчитываются теоретические частоты значений продолжительности технологического процесса ЭАК, т.е. количество элементов выборки, которые попали в заданный интервал согласно функции плотности теоретического распределения. Для этого используются формулы:

- для первого интервала:



$$v_{теор}^1 = F(x) \cdot N, \quad (10)$$

- для второго и последующих интервалов:

$$v_{теор}^i = (F_i(x) \cdot F_{i-1}(x)) \cdot N, \quad (11)$$

где $v_{теор}^1$ – значение теоретической частоты на первом интервале; $F(x)$ – значение функции плотности теоретического распределения; N – размер выборки; $F_i(x)$ – значение функции плотности теоретического распределения на текущем i -ом интервале; $F_{i-1}(x)$ – значение функции плотности теоретического распределения на предыдущем интервале.

На предпоследнем шаге производится построение гистограммы и полигона теоретических частот значений продолжительности технологического процесса функционирования ЭАК.

На заключительном шаге выполняется проверка достоверности выдвигаемой гипотезы с использованием статистических критериев.

Как правило, при проверке вида закона распределения априори выбирают единственный теоретический статистический критерий [3, 7, 14, 15]. При этом существует вероятность совершения ошибки первого рода, когда можно отвергнуть верную гипотезу, и ошибки второго рода, когда можно принять неверную гипотезу. Поэтому для повышения точности и достоверности выводов о виде распределения в данной статье предлагается использовать как минимум три критерия (нечетное число обусловлено тем, что один критерий может подтвердить нулевую гипотезу о законе распределения, а второй ее отвергнуть, что затруднит принятие решения о выборе вида распределения) [16].

Для проверки гипотезы о виде вероятностного распределения продолжительностей технологических процессов ЭАК выбраны статистические критерии: Пирсона, Крамера-Мизеса-Смирнова и Колмогорова, поскольку эти критерии [3, 12, 13, 17]:

- обладают высокой математической мощностью;
- применимы к имеющимся размерам выборок;
- подходят для проверки любого вида вероятностного распределения;
- основаны на разных статистических подходах.

Статистика критериев проверки гипотез, а также теоретические критические значения при различных уровнях значимости α , представлены в Таблице 11.

Таблица 11. Статистика выбранных критериев проверки гипотез
Table 11. Statistics of selected criteria for testing hypotheses

Критерий	Статистика критерия	Теоретические критические значения при различных α		
Пирсона	$\chi_{набл}^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(v_{набл} - v_{теор})^2}{v_{теор}}, \quad (12)$	$\chi_{крит}^2 = f(\alpha, df), \quad (15)$ $df = k - r - 1. \quad (16)$		
Колмогорова	$\lambda = \frac{\sup v_{набл}^{накоп} - v_{теор}^{накоп} }{\sqrt{N}}, \quad (13)$	0,99	0,95	0,90
		1,66	1,36	1,22
Крамера-Мизеса-Смирнова	$n\omega^2 = \frac{1}{12 \cdot N} + \sum_{i=1}^N \left(F(x) - \left(\frac{2 \cdot i - 1}{2 \cdot N} \right) \right)^2 \quad (14)$	0,99	0,95	0,90
		0,74	0,46	0,35

где df – число степеней свободы (определяется по формуле 15); k – количество интервалов после группирования со значениям наблюдаемых и теоретических частот ≤ 5 ; r – количество параметров, характеризующих конкретное теоретическое распределение; $v_{набл}$ – наблюдаемое значение частоты; $v_{теор}$ – теоретическое значение частоты; $v_{набл}^{накоп}$ – накопленное значение



наблюдаемой частоты; $v_{теор}^{накоп}$ – накопленное значение теоретической частоты; $F(x)$ – значение функции плотности теоретического распределения; N – размер выборки; i – номер элемента выборки.

В случае отвержения выдвинутой нулевой гипотезы H_0 , производится формулировка альтернативной гипотезы H_1 и возвращение к девятому шагу алгоритма. В противном случае принимается выдвинутая гипотеза и выборочные значения параметров, характеризующие принятое теоретическое распределение продолжительности технологического процесса функционирования ЭАК.

Из общего массива хронометражных данных, полученных с шести разрезов Кузбасса, сформированы 280 выборок размером от 50 до 300 показателей. Эти выборки характеризуют технологические процессы, выполняемые конкретными горными машинами, при ведении вскрышных горных работ с породами I – V категорий по блочности в условиях конкретного разреза. Сформированные выборки являются исходными данными для выявления видов вероятностных распределений продолжительностей технологических процессов.

В качестве примера представлен процесс выявления вида распределения продолжительности технологического процесса погрузки вскрышной породы III категории по блочности экскаватором Hitachi EX-1900 в автосамосвалы БелАЗ-7513 при разработке Кедровско-Крохалевского каменноугольного месторождения. Параметры эксплуатации, по которым сформированы выборки, представлены в Таблице 12.

Таблица 12. Параметры производства вскрышных работ с использованием экскаватора Hitachi EX-1900 и автосамосвалов БелАЗ-7513 при разработке Кедровско-Крохалевского каменноугольного месторождения

Table 12. Operating parameters for stripping operations using a Hitachi EX-1900 excavator and BelAZ-7513 dump trucks during the development of the Kedrovsko-Krokhalevsky coal deposit

Группа параметров	Параметры	Значение, ед. изм
Рабочие и технологические параметры экскаватора Hitachi EX-1900	Максимальный радиус черпания на уровне стояния	14,14 м
	Максимальный радиус черпания	15,25 м
	Максимальная высота черпания	14,14 м
	Вместимость ковша	12 м ³
Конструктивно-технологические параметры автосамосвала БелАЗ-7513	Максимальная грузоподъемность	130 т
	Вместимость кузова с «шапкой»	71,2 м ³
	Номинальная вместимость кузова	45,2 м ³
	Минимальный радиус поворота	13 м
	Эксплуатационная масса автосамосвала	109,5 т
Физико-механические свойства вскрышной породы	Плотность вскрышной породы	2 т/м ³
Горнотехнические условия эксплуатации	Дальность транспортирования	2,92 км
	Высота вскрышного уступа	15 м
	Тип забоя	Траншейный
	Средний коэффициент разрыхления вскрышной породы в ковше	1,35
	Вид заходки	Широкая
	Схема подъезда автосамосвала	Тупиковая
	Средний угол поворота экскаватора	90 град
	Коэффициент экскавации	0,70
	Ширина траншеи по низу	35,50 м
Число машин, одновременно находящихся под погрузкой	1 шт	

Фрагмент выборки, характеризующей продолжительность процесса погрузки, представлен в Таблице 13.



Таблица 13. Фрагмент выборки, характеризующей продолжительность процесса погрузки вскрышной породы

Table 13. Fragment of the sample characterizing the loading of overburden

Номер элемента выборки	Значение элемента выборки, сек
1	94
2	99
3	109
...	
153	379

Далее с использованием формул 4-8 определены необходимые параметры (шаги 2-5 алгоритма, представленного на Рис. 2), построена гистограмма и полигон наблюдаемых частот с использованием MS Excel (шаги 6-8). Результаты расчетов сведены в Таблицах 14, 15 и представлены на Рис. 4.

Таблица 14. Параметры выборки, характеризующей продолжительность процесса погрузки вскрышной породы

Table 14. Sample parameters obtained as a result of the analysis – «overburden loading duration»

Параметр	Значение	Ед. изм.
Выборочное среднее, X_{cp}	192	с
Выборочное математическое ожидание, $\mu(x)$		
Выборочное среднееквадратическое отклонение, $\sigma(x)$	42	с
Максимальное значение выборки, X_{max}	379	с
Минимальное значение выборки, X_{min}	94	с
Число групп интервалов, n	8	шт
Шаг интервала, h	36	с
Размер выборки, N	153	шт

Таблица 15. Наблюдаемые частоты

Table 15. Frequencies observed

Интервал	Наблюдаемая частота	Интервал	Наблюдаемая частота
94 – 130	5	274 – 310	1
130 – 166	36	310 – 346	1
166 – 202	61	346 – 382	2
202 – 238	29	Сумма	153
238 – 274	18		

Исходя из вида гистограммы и полигона наблюдаемых частот (Рис. 4), выдвигается нулевая гипотеза H_0 о соответствии наблюдаемой частоты теоретическому Гамма-распределению. В качестве альтернативных гипотез о соответствии выдвигается H_1 – Гаусса-распределение и H_2 – Бета-распределение (шаг 9) [13, 18].

С использованием формул 5, 6, 17-20 определены параметры, характеризующие предполагаемые распределения (шаг 10). Результаты расчетов сведены в Таблице 16.

Гамма-распределение характеризуется двумя параметрами: выборочной формой кривой (α_γ) и выборочным масштабом (β_γ). Определялись данные параметры по формулам 17 и 18 [19]:

$$\alpha_\gamma = \frac{\mu(x)^2}{\sigma(x)^2}, \quad (17)$$

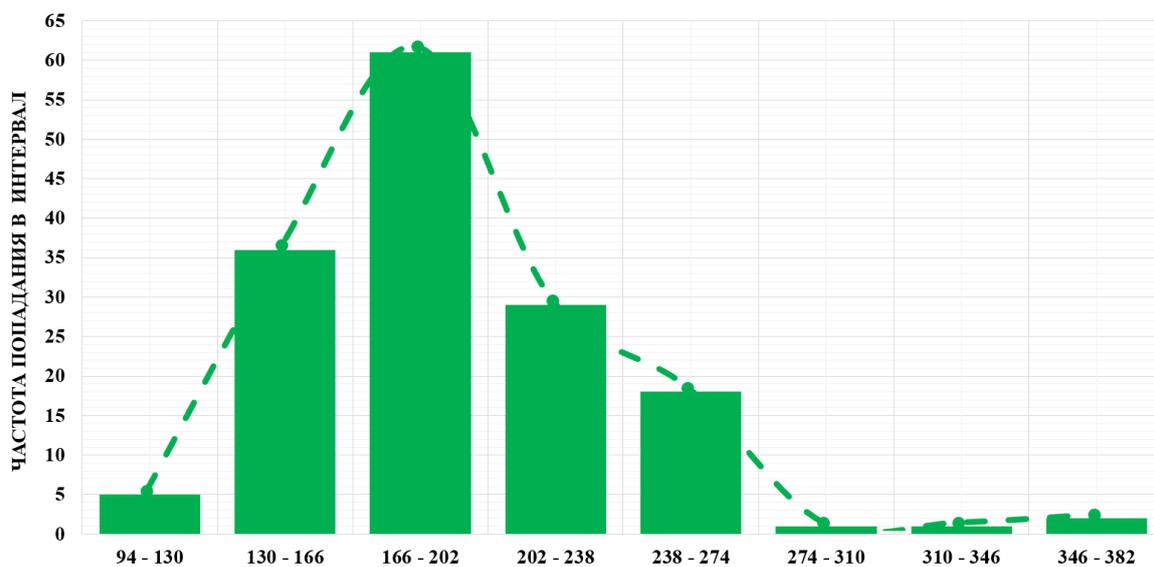
$$\beta_\gamma = \frac{\sigma(x)^2}{\mu(x)}, \quad (18)$$

где $\mu(x)$ – выборочное математическое ожидание; $\sigma(x)$ – выборочное среднееквадратическое отклонение.



Таблица 16. Расчет параметров, характеризующих законы распределения
 Table 16. Calculation of parameters characterizing the laws of distribution

Гамма-распределение	
Выборочная форма кривой, α	20,898
Выборочный масштаб, β	9,145
Гаусса распределение	
Выборочное математическое ожидание, $\mu(x)$	192
Выборочное среднеквадратическое отклонение $\sigma(x)$	42
Бета-распределение	
Выборочная форма кривой, α	3,274
Выборочный масштаб, β	7,647
Максимальное значение интервала, Max	94
Минимальное значение интервала, Min	382



ИНТЕРВАЛЫ ВРЕМЕНИ ПОГРУЗКИ ВСКРЫШНОЙ ПОРОДЫ III КАТЕГОРИИ
 ЭКСКАВАТОРОМ Hitachi EX-900 В АВТОСАМОСВАЛЫ БЕЛАЗ-7513, СЕК

Рис. 4. Гистограмма и полигон наблюдаемых частот

Fig. 4. Histogram and range of observed frequencies

Гаусса-распределение характеризуется двумя параметрами: выборочным математическим ожиданием $\mu(x)$ и выборочным среднеквадратическим отклонением $\sigma(x)$. Определялись данные параметры по формулам 5 и 6.

Бета-распределение характеризуется двумя параметрами: выборочной формой кривой (α_β) и выборочным масштабом (β_β). Определялись данные параметры по формулам [19,20]:

$$\alpha_\beta = \frac{\mu(x) - Min}{Max - Min} \cdot \frac{(\mu(x) - Min) \cdot (Max - Min) - (\mu(x) - Min)^2 - \sigma(x)^2}{\sigma(x)^2}, \quad (19)$$

$$\beta_\beta = \frac{((\mu(x) - Min) \cdot (Max - Min) - (\mu(x) - Min)^2 - \sigma(x)^2)}{\sigma(x)^2} \cdot \left(1 - \frac{\mu(x) - Min}{Max - Min}\right), \quad (20)$$

где Max – максимальное значение интервала; Min – минимальное значение интервала.

С использованием формул 10 и 11 определены теоретические частоты для каждого интервала и построены гистограммы и полигоны теоретических частот с использованием MS Excel (шаги 10-12). Результаты расчетов сведены в Таблице 17 и представлены на Рис. 5.



Таблица 17. Теоретические частоты
Table 17. Theoretical frequencies

Интервал, с	Распределение		
	Гамма	Гаусса	Бета
94 – 130	8	10	12
130 – 166	35	30	48
166 – 202	52	50	51
202 – 238	37	41	30
238 – 274	16	17	10
274 – 310	4	4	2
310 – 346	1	0	0
346 – 382	0	0	0
Сумма	153	152	153

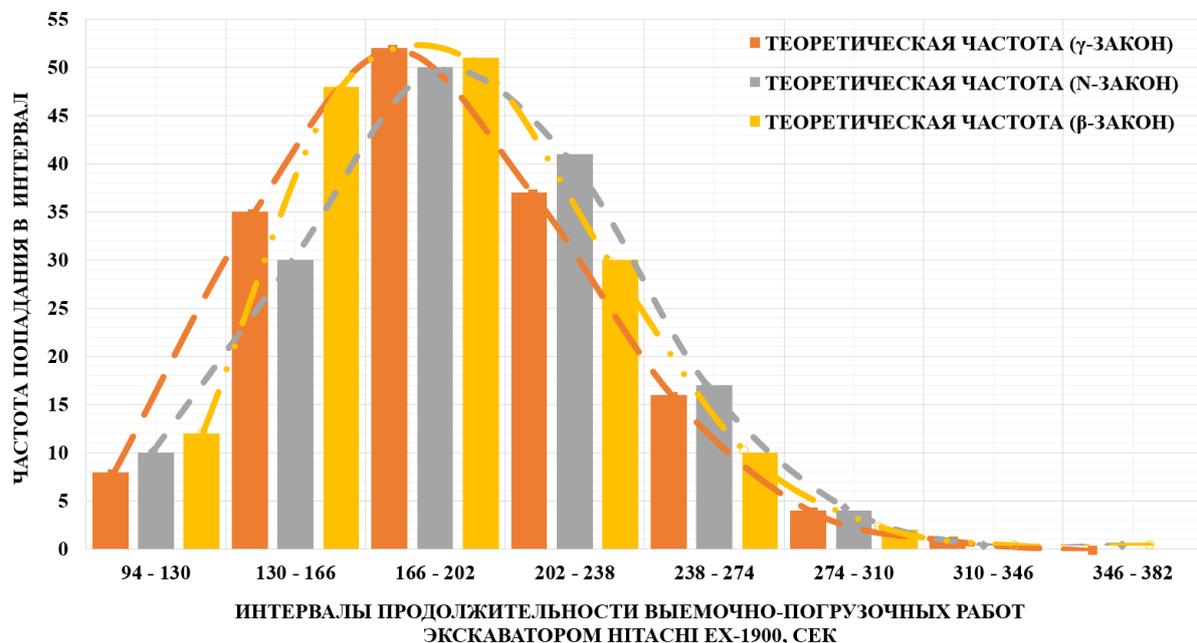


Рис. 5. Гистограмма и полигон теоретических частот
Fig. 5. Histogram and theoretical frequency polygon

С использованием формул 12-16 выполнена проверка выдвигаемых гипотез с использованием MS Excel. Результаты расчетов сведены в Таблицах 18-20.

Из Таблиц 18-20 видно, что все три критерия отвергли предположение о бета-распределении продолжительности погрузки вскрышной породы в кузов автосамосвала. При этом два критерия – Крамера-Мизеса-Смирнова и Колмогорова (Таблицы 18 и 19) – подтвердили обе гипотезы о соответствии наблюдаемых частот, теоретическим гамма-распределению и Гаусса-распределению. Применение третьего критерия Пирсона (Таблица 20) позволяет сделать вывод о принятии гипотезы, которая подтверждает, что случайная величина – продолжительность погрузки вскрышной породы III категории по блочности экскаватором Hitachi EX-1900 в автосамосвал БелАЗ-7513 – распределена в соответствии с гамма-распределением.

Аналогичным образом выявлены виды распределений продолжительностей основных технологических процессов, выполняемых при производстве вскрышных работ в условиях шести разрезов Кузбасса.



Таблица 18. Проверка гипотез $H_0 - H_2$ по критерию Колмогорова (λ -критерий)
 Table 18. Testing hypotheses $H_0 - H_2$ using the Kolmogorov criterion (λ -criterion)

$\nu_{набл}^{накоп}$	1	5	41	102	131	149	150	151	153
$\nu_{теор}^{накоп} (\gamma-распр)$	0	8	43	95	132	148	152	153	153
$sup \nu_{теор}^{накоп} - \nu_{набл}^{накоп} $	7								
$\lambda_{набл}$	0,57								
$\lambda_{крит}$	$\lambda_{крит} = 1,36$, при $\alpha = 0,95$								
Вывод	$\lambda_{набл} (0,57) < \lambda_{крит} (1,36)$ – гипотеза H_0 принимается								
$\nu_{теор}^{накоп} (N-распр)$	1	10	40	90	131	148	152	152	152
$sup \nu_{теор}^{накоп} - \nu_{набл}^{накоп} $	12								
$\lambda_{набл}$	0,97								
$\lambda_{крит}$	$\lambda_{крит} = 1,36$, при $\alpha = 0,95$								
Вывод	$\lambda_{набл} (0,97) < \lambda_{крит} (1,36)$ – гипотеза H_1 принимается								
$\nu_{теор}^{накоп} (\beta-распр)$	0	12	60	111	141	151	153	153	153
$sup \nu_{теор}^{накоп} - \nu_{набл}^{накоп} $	19								
$\lambda_{набл}$	1,54								
$\lambda_{крит}$	$\lambda_{крит} = 1,36$, при $\alpha = 0,95$								
Вывод	$\lambda_{набл} (1,54) > \lambda_{крит} (1,36)$ – гипотеза H_2 отвергается								

где $\nu_{набл}^{накоп}$ – накопленная наблюдаемая частота; $\nu_{теор}^{накоп}$ – теоретическая наблюдаемая частота; $\lambda_{набл}$ – наблюдаемое значение λ -критерия; $\lambda_{крит}$ – критическое значение λ -критерия; α – уровень достоверности.

Таблица 19. Проверка гипотез $H_0 - H_2$ по критерию Крамера-Мизеса-Смирнова ($n\omega^2$ -критерий)
 Table 19. Testing of hypotheses $H_0 - H_2$ according to the Cramer-Mises-Smirnov criterion ($n\omega^2$ -criterion)

i	1	2	3	...	153	Σ
x_i	94	99	109		379	
Расчет $n\omega^2 (\gamma-распр)$	1,23E-06	3,52E-05	3,15E-05		9,57E-06	1,38E-01
$n\omega^2_{набл} (\gamma-распр)$	$n\omega^2_{набл} = 0,14$ при $\alpha = 0,95$					
Вывод	$n\omega^2_{набл} (0,14) < n\omega^2_{набл} (0,46)$ – гипотеза H_0 принимается					
Расчет $n\omega^2 (N-распр)$	3,99E-05	1,09E-05	5,28E-05	...	1,07E-05	2,76E-01
$n\omega^2_{набл} (N-распр)$	$n\omega^2_{набл} = 0,28$ при $\alpha = 0,95$					
Вывод	$n\omega^2_{набл} (0,28) < n\omega^2_{набл} (0,46)$ – гипотеза H_1 принимается					
Расчет $n\omega^2 (\beta-распр)$	1,07E-05	9,18E-05	9,13E-05	...	1,07E-05	1,31E+00
$n\omega^2_{набл} (\beta-распр)$	$n\omega^2_{набл} = 1,31$ при $\alpha = 0,95$					
Вывод	$n\omega^2_{набл} (1,31) > n\omega^2_{набл} (0,46)$ – гипотеза H_2 отвергается					
$n\omega^2_{крит}$	0,46 при $\alpha = 0,95$					

где $n\omega^2_{набл}$ – наблюдаемое значение $n\omega^2$ -критерия; $n\omega^2_{крит}$ – критическое значение $n\omega^2$ -критерия; α – уровень достоверности.



Таблица 20. Проверка гипотез $H_0 - H_2$ по критерию Пирсона (критерий- χ^2)
Table 20. Testing hypotheses $H_0 - H_2$ using the Pearson criterion (χ^2 -test)

n	94-130	130-166	166-202	202-238	238-274	274-310	310-346	346-382	Σ
$v_{набл}$	5	36	61	29	18	1	1	2	153
$v_{теор} (\gamma-распр)$	8	35	52	37	16	4	1	0	153
$\chi^2_{набл}$	1,13	0,03	1,56	1,73	0,05				4,49
$\chi^2_{крит}$	$\chi^2_{крит} = 5,99$, при $\alpha = 0,95$ и $df = 2$								
Вывод	$\chi^2_{набл} (4,99) < \chi^2_{крит} (5,99)$ – гипотеза H_0 принимается								
$v_{теор} (N-распр)$	10	30	50	41	17	4	0	0	152
$\chi^2_{набл}$	2,50	1,20	2,42	3,51	0,05				9,68
$\chi^2_{крит}$	$\chi^2_{крит} = 5,99$, при $\alpha = 0,95$ и $df = 2$								
Вывод	$\chi^2_{набл} (9,68) > \chi^2_{крит} (5,99)$ – гипотеза H_0 отвергается								
n	94-130	130-166	166-202	202-238	238-274	274-310	310-346	346-382	Σ
$v_{теор} (\beta-распр)$	12	48	51	30	10	2	0	0	153
$\chi^2_{набл}$	4,08	3,00	1,96	0,03	8,33				17,41
$\chi^2_{крит}$	$\chi^2_{крит} = 5,99$, при $\alpha = 0,95$ и $df = 2$								
Вывод	$\chi^2_{набл} (17,41) > \chi^2_{крит} (5,99)$ – гипотеза H_0 отвергается								

где $\chi^2_{крит}$ – критическое значение критерия- χ^2 ; $\chi^2_{набл}$ – наблюдаемое значение критерия- χ^2 ; $v_{набл}$ – наблюдаемое значение частоты; $v_{теор}$ – теоретическое значение частоты; α – уровень значимости (достоверности); df – число степеней свободы.

Вывод

В результате проведенного анализа чувствительности к изменению закона распределения продолжительности технологических процессов при имитационном моделировании вскрышных горных работ установлено, что изменение вида вероятностного распределения может оказывать влияние на показатели эффективности работы ЭАК в среднем на 60%. Следовательно, вид распределения является значимым фактором при имитационном моделировании вскрышных горных работ.

В результате исследования 280 выборок значений продолжительностей основных технологических процессов функционирования ЭАК для условий шести разрезов Кузбасса и выявления вида вероятностных распределений этих значений установлено, что 62% выборок соответствуют Гамма-распределению, 33% – Гаусса-распределению, 4% – Бета-распределению. Идентификацию закона распределения 1% выборок провести не удалось по причинам малого их размера ($N < 50$) и большого разброса данных. Известно, что Гамма-распределение и Гаусса-распределение схожи. Более того, при достаточно больших значениях α (параметр формы) Гамма-распределение совпадает с Гаусса-распределением. С практической точки зрения продолжительность технологического процесса не может принимать отрицательные значения, а также стремиться к $+\infty$. Исходя из этого, при моделировании технологических процессов применяют гамма-распределение, ограниченное с левой стороны осью ординат, а с правой стороны границей, определяемой по правилу «трех сигм», в соответствии с которым выборочное



математическое ожидание не превышает утроенного выборочного среднего квадратического отклонения [12, 13, 23, 24].

Таким образом, с достоверностью 0,95 можно утверждать, что для отображения основных технологических процессов функционирования ЭАК при имитационном моделировании вскрышных горных работ на разрезах Кузбасса необходимо использовать Гамма-распределение с ограниченной правосторонней областью.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2021-0002 «Разработка эффективных технологий добычи угля роботизированными горнодобывающими комплексами без постоянного присутствия людей в зонах ведения горных работ, систем управления и методов оценки технического состояния и диагностики их ресурса и обоснование обеспечения воспроизводства минерально-сырьевой базы» (рег. № АААА-А21-121012290021-1).

Информация об авторах

Кузнецов Игорь Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник
e-mail: is150794@mail.ru

Зиновьев Василий Валентинович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент
e-mail: zv150671@mail.ru

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, 650065, Россия, г. Кемерово, пр. Советский, 18.
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

Кузнецова Алла Валерьевна, кандидат технических наук, доцент
e-mail: cherednichenkoav@kuzstu.ru

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

Список литературы

1. Сысоев А.А. Оценка граничного коэффициента вскрыши на стадии предпроектных исследований // Вестник КузГТУ. 2004. № 4. С. 46–48.
2. 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. С. 65–76. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-S2-65-76.
3. 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.
4. Хорешок А. А., Дубинкин Д. М., Марков С. О., Тюленев М. А. Оценка степени взаимовлияния вместимости ковша экскаватора и кузова автосамосвала // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2021. № 3. С. 104–112.
5. Дубинкин, Д. М., Садовец В. Ю., Котиев Г. О., Карташов А. В. Исследование процесса транспортирования вскрышных пород и угля на разрезах // Техника и технология горного дела. 2019. № 4. С. 50–66.
6. Бахтурин Ю. А. Моделирование работы сложных транспортных систем карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 1. С. 82–90.
7. Фурман А. С. Оценка эффективности эксплуатации экскаваторно-автомобильных комплексов на технологических трассах разрезов Кузбасса: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.06. Кемерово, 2018. 137 с.



8. Стенин Ю. В., Ганиев Р. С. К вопросу оценки технологического риска при планировании производительности экскаваторно-автомобильного комплекса карьера // Проблемы недропользования. 2014. № 2. С.135–141.
9. Томашевский В. Н., Жданова Е. Г. Имитационное моделирование в среде GPSS. М. : Бестселлер, 2003. 412 с.
10. Кузнецова А. В., Грибанов Е. Н., Николаева Е. А., Гутова Е. В. Теория вероятностей: методы и способы решения задач: учебное пособие. Кемерово : КузГТУ, 2020. 111 с.
11. Тынкевич М. А., Пимонов А. Г., Славолубова Я. В. Введение в статистический анализ данных (Теория и практика): учеб. пособие. Кемерово : КузГТУ, 2021. 157 с.
12. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных сотрудников. М. : Физматлит, 2006. 816 с.
13. Гмурман В. Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: Учебное пособие для студентов вузов. 6-е изд., доп. М. : Высш.шк., 2002. 405 с.
14. Петухов С. В., Ляхомский А. В., Кузнецова А. И. Энерготехнологические профили экскаваторных работ при разработке угольных месторождений // Горное оборудование и электромеханика. 2017. № 6 (133). С. 30–33.
15. Соболева А. В., Трушина Г. С. Пути снижения себестоимости добычи угля за счет совершенствования организации работы технологического транспорта открытых горных работ // Сборник материалов II Всероссийской, научно-практической конференции «Россия молодая». 2010. С. 166–170.
16. Кузнецов И. С., Зиновьев В. В., Кузнецова А. В. Повышение точности и достоверности идентификации законов распределения хронометражных данных при моделировании экскаваторно-автомобильного комплекса // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2021. № 3. С. 113–119.
17. Лемешко Б. Ю., Лемешко С. Б., Постовалов С. Н., Чимитова Е. В. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход: монография. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. 888 с.
18. Мицель А. А. Прикладная математическая статистика. Томск : ТУСУР, 2022. 118 с.
19. Орлов А. И. Теория принятия решений: учеб. пособие. М. : Экзамен, 2005. 656 с.
20. Алиев Т. И. Основы моделирования дискретных систем. СПб : СПбГУ ИТМО, 2009. 363 с.
21. Миронюк В. П., Мельников Д. А. Обработка распределения времени обслуживания автомобилей при перевалке контейнеров // Инженерный вестник Дона. 2011. № 4 (47). С. 568–572.
22. Сенатов В. В. Центральная предельная теорема. Точность аппроксимации и асимптотические разложения. М. : Либроком, 2009. 352 с.
23. Беликова Г. И., Витковская Л. В. Основы теории вероятностей и элементы математической статистики. Учебное пособие. СПб. : РГГМУ, 2018. 160 с.
24. Ершова Т. Б. Статистика: учебное пособие. В 2 ч. Ч.2. Комсомольск-на-Амуре : Изд-во АмГПГУ, 2015. 74 с.



IDENTIFICATION OF THE TYPE OF PROBABILISTIC DISTRIBUTION OF THE MAIN TECHNOLOGICAL PROCESSES DURATION WHEN MODELING STRIPPING OPERATIONS AT KUZBASS OPEN-PIT MINES

Igor S. Kuznetsov^{1,2}, Vasily V. Zinoviev^{1,2}, Alla V. Kuznetsova²

¹ Federal State Budget Scientific Centre «The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences»

² T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University



Article info

Received:
11 January 2024

Revised:
08 April 2024

Accepted:
29 April 2024

Keywords: development of coal deposits, surface mining, rope shovel, simulation modeling, excavator-vehicle complex, stripping works, hydraulic shovel, probability distributions.

Abstract.

The article presents the results of sensitivity analysis to the change of the probability distribution type of the duration of technological processes in the simulation modeling of stripping mining operations for the conditions of six open-cut mines in Kuzbass, as well as the results of the study of 280 samples of the duration values of the main technological processes of excavator-automobile complexes and the identification of the distribution laws of these values. Examples of analyzing the sensitivity of the model to changes in the distribution law of the main technological processes, as well as identifying the type of distribution in the modeling of stripping mining operations in the conditions of Kedrovsko-Krokhalevsky coal deposit are described in detail.

For citation: Kuznetsov I.S., Zinoviev V.V., Kuznetsova A.V. Identification of the type of probabilistic distribution of the main technological processes duration when modeling stripping operations at Kuzbass open-pit mines, *Journal of mining and geotechnical engineering*, 2(25):79. DOI: 10.26730/2618-7434-2024-2-79-103, EDN: SBMZUH

References

1. Sysoev A.A. Estimation of the boundary stripping ratio at the stage of pre-project studies. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Kuzbass State Technical University*. 2004; 4:46–48. [In Russ.]
2. Zinoviev V.V., Kuznetsov I.S., Nikolaev P.I., Starodubov A.N. Simulation modelling of robotic open and underground coalmining systems. *Gornaya promyshlennost' = Russian Mining Industry*. 2023; S2:65–76. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-S2-65-76. [In Russ.]
3. Voronov A.Yu. Optimization of operational productivity of excavator-automobile complexes of surface mines: PhD thesis: 05.05.06, 05.13.18. KuzSTU, Kemerovo, 2015. 195 p. [In Russ.]
4. Khoreshok A.A. [et al.] Estimation of the degree of mutual influence of the excavator bucket capacity and haul truck body. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Kuzbass State Technical University*. 2021; 3:104–112. [In Russ.]
5. Dubinkin D.M., Sadovets V.Yu., Kotiev G.O., Kartashov A.V. Overburden and coal transportation research at open pit mines. *Tekhnika i tekhnologiya gornogo dela = Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2019; 4:50–66. [In Russ.]
6. Bakhturin Yu.A. Modeling of the complex transport systems operation in the quarries. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' = Mining information and analytical bulletin*. 2011; 1:82–90. [In Russ.]



7. Furman A.S. Evaluation of the efficiency of excavator-automobile complexes operation on technological routes of Kuzbass surface mines: PhD thesis: 05.05.06 . Kemerovo, 2018. 137 p. [In Russ.]
8. Stenin Yu.V., Ganiev R.S. On the issue of technological risk assessment when planning the productivity of the excavator-automobile complex of the quarry. *Problemy nedropol'zovaniya = Problems of subsoil use*. 2014; 2:135–141. [In Russ.]
9. Tomashevskiy V.N., Zhdanova E.G. Imitation modeling in GPSS software. Moscow: Bestseller Publishing House; 2003. 412 p. [In Russ.]
10. Kuznetsova A.V., Griбанov E.N., Nikolaeva E.A., Gutova E.V. Probability theory: methods and ways of solving problems: textbook. Kemerovo: KuzSTU Publishing House; 2020. 111 p. [In Russ.]
11. Tynkevich M.A., Pimonov A.G., Slavolyubova Ya.V. Introduction to statistical data analysis (Theory and practice): textbook. Kemerovo: KuzSTU Publishing House; 2021. 157 p. [In Russ.]
12. Kobzar' A.I. Applied mathematical statistics. For engineers and research workers. Moscow: Fizmatlit Publishers; 2006. 816 p. [In Russ.]
13. Gmurman V.E. Guide to solving problems in probability theory and mathematical statistics: A textbook for university students. 6th ed. Moscow: Higher School Publishing; 2002. 405 p. [In Russ.]
14. Petukhov S.V., Lyakhomskiy A.V., Kuznetsova A.I. Energy-technological profiles of excavator operations in the development of coal deposits. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining equipment and electromechanics*. 2017; 6(133):30–33. [In Russ.]
15. Soboleva A.V., Trushina G.S. Ways to reduce the cost of coal production by improving the organization of technological transport of open mining. *Proceedings of the II All-Russian, scientific and practical conference «Russia Young»*. 2010. Pp. 166–170. [In Russ.]
16. Kuznetsov I.S., Zinov'ev V.V., Kuznetsova A.V. Increase of accuracy and reliability of identification of the laws of distribution of the timing data at modeling of the excavator-automobile complex. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Kuzbass State Technical University*. 2021; 3:113–119. [In Russ.]
17. Lemeshko B.Yu. [et al.] Statistical data analysis, modeling and research of probabilistic regularities. Computer approach. Novosibirsk: NGTU Publishing House; 2011. 888 p. [In Russ.]
18. Mitsel' A.A. Applied mathematical statistics. Tomsk: TUSUR Publishing; 2022. 118 p. [In Russ.]
19. Orlov A.I. Decision-making theory: textbook. Moscow: Ekzamen Publishing; 2005. 656 p. [In Russ.]
20. Aliev T.I. Fundamentals of modeling discrete systems. Saint-Petersburgh: SPBSU ITMO Publishing; 2009. 363 p. [In Russ.]
21. Mironyuk V.P., Mel'nikov D.A. Processing of car service time distribution during container transshipment. *Inzhenernyy vestnik Dona = Engineering journal of Don*. 2011; 4(47):568–572. [In Russ.]
22. Senatov V.V. Central limit theorem. Accuracy of approximation and asymptotic decompositions. Moscow: Librokom Publishing; 2009. 352 p. [In Russ.]
23. Belikova G.I., Vitkovskaya L.V. Fundamentals of Probability Theory and Elements of Mathematical Statistics. Textbook. Saint-Petersburgh: RGGMU Publishin; 2018.160 p. [In Russ.]
24. Ershova T.B. Statistics: textbook. In 2 parts. Pt. 2. Komsomol'sk-na-Amure: Amur State University of Humanities and Pedagogy Publishing House; 2015. 74 p. [In Russ.]

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Information about the authors

Igor S. Kuznetsov, PhD (Eng.), Senior Researcher; Associate Professor of the Department of Open Pit Mining
e-mail: is150794@mail.ru

Vasily V. Zinoviev, PhD (Eng.), Senior Researcher; Associate Professor of the Department of Information and Computer-aided Manufacturing System
e-mail: zv150671@gmail.com

Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 18

Sovetskiy Ave., Kemerovo, 650000, Russian Federation

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 Vesennaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation

Alla V. Kuznetsova, PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Mathematics

e-mail: cherednichenkoav@kuzstu.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 Vesennaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation

