

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 519.876.5; 622.2

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-1-171-181

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ АВТОСАМОСВАЛОВ ПРИ ИМИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ РАБОТЫ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Зиновьев Василий Валентинович^{1,2},
Николаев Петр Игоревич^{1,2},
Кузнецов Игорь Сергеевич^{1,2}

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

²Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

* для корреспонденции: is150794@mail.ru



Информация о статье

Поступила:

26 сентября 2025 г.

Одобрена после
рецензирования:

15 января 2026 г.

Принята к публикации:

12 февраля 2026 г.

Опубликована:

19 марта 2026 г.

Ключевые слова:

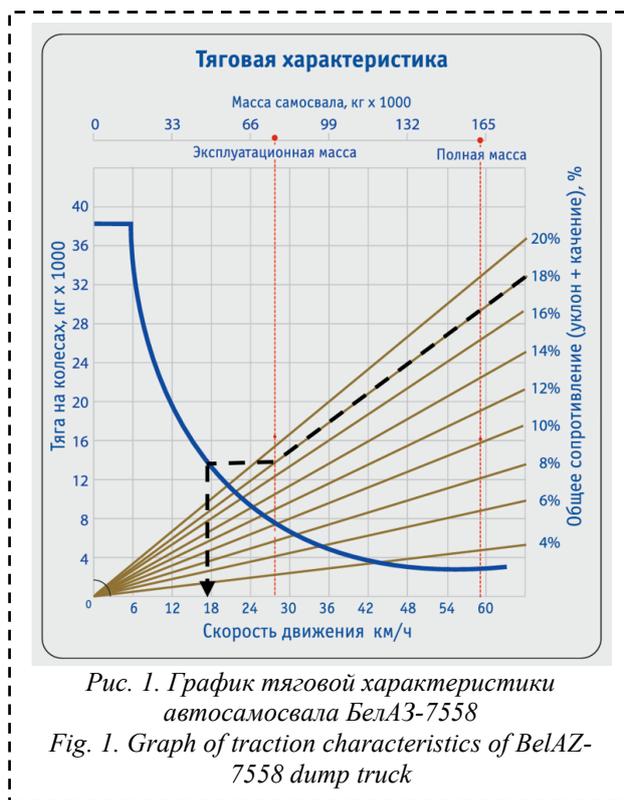
открытые горные работы,
экскаваторно-автомобильный
комплекс, аппроксимация,
скорость движения
автосамосвала, имитационное
моделирование

Аннотация.

При ведении открытых горных работ процессы транспортирования горной массы автосамосвалами в сумме занимают 43-82% от общей продолжительности рейса автосамосвала. Поэтому при имитационном моделировании работы экскаваторно-автомобильных комплексов (ЭАК) продолжительность движения автосамосвалов по участкам трассы оказывает значительное влияние на получаемую в результате вычислительных экспериментов эксплуатационную производительность ЭАК. Продолжительность определяется на основании скорости движения автосамосвалов. В статье рассмотрены два способа определения скорости – графический, основанный на использовании динамических тяговых характеристик автосамосвалов, и аналитический с использованием известной формулы. Произведено сопоставление этих способов и определено среднее отклонение значений скоростей движения автосамосвалов БелАЗ грузоподъемностью 90-360 тонн. При этом значения, полученные на основе тяговых характеристик из паспортов автосамосвалов, взяты за эталон. Определена функциональная связь между скоростью движения автосамосвалов различной грузоподъемности, определенной графически, и скорости, рассчитанной аналитически. Произведена аппроксимация функций. На основании этого получена уточненная формула для определения скорости движения автосамосвалов БелАЗ, с использованием которой определена величина отклонения значений технической скорости движения автосамосвалов, определенных графическим и аналитическим способами. Выявлено, что применение уточненной формулы позволяет уменьшить отклонение значений технической скорости движения автосамосвалов БелАЗ от значений, полученных графическим способом, по сравнению с применением известной аналитической формулы. Также на результатах вычислительных экспериментов при моделировании работы ЭАК в условиях одного из разрезов Кедровско-Крохалевского месторождения показано, что применение полученной уточненной зависимости позволяет увеличить точность определения эксплуатационной производительности ЭАК.

Для цитирования: Зиновьев В.В., Николаев П.И., Кузнецов И.С. Определение скорости движения автосамосвалов при имитационном моделировании работы экскаваторно-автомобильных комплексов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 1 (173). С. 171-181. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-1-171-181, EDN: MTJEGH

Введение. Кузнецкий угольный бассейн (Кузбасс) является одним из основных регионов угледобычи, на долю которого приходится более 50% от общей добычи угля в России [1]. Удельный вес открытого способа в общей добыче составляет около 75% и осуществляется, как правило, при помощи экскаваторно-автомобильных комплексов (ЭАК). Для транспортирования горной массы (уголь и/или вскрышная порода) от забоя до пункта разгрузки в подавляющем большинстве случаев используют автосамосвалы БелАЗ (серии 7558, 7513, 7530, 7531, 7560) с электромеханической трансмиссией грузоподъемностью от 90 до 360 тонн [2-6]. При этом процессы транспортирования горной массы автосамосвалами от забоя к пункту разгрузки (отвалы, угольные склады, обогатительные фабрики) и возврат к экскаватору в сумме занимают 43-82% от общей продолжительности рейса автосамосвала [7].



В Институте угля ФИЦ УУХ СО РАН разработана универсальная дискретно-стохастическая имитационная модель, позволяющая отображать взаимодействие автосамосвалов с экскаватором и определять эксплуатационную производительность ЭАК с различными рабочими и конструктивно-технологическими параметрами горных машин в разной комплектации [8]. Продолжительность движения автосамосвалов в грузе и в порожнем направлениях по участкам трассы в

этой модели определяется на основании массива хронометражных данных отчетов автоколонн разрезов. Однако такой способ становится невозможным при отсутствии хронометражных данных, например, вследствие проектирования нового участка разреза. В таком случае продолжительность движения автосамосвалов по участкам трассы необходимо рассчитывать аналитически на основании скорости. Применительно к автотранспорту различают конструктивную, техническую и эксплуатационную скорости движения. При тяговых расчетах автотранспорта пользуются технической скоростью, представляющей собой отношение длины данного участка дороги к времени его прохождения автосамосвалом [2].

Один из способов определения технической скорости автосамосвалов основан на использовании динамической тяговой характеристики, которая представляет из себя графическую зависимость динамического фактора D или силы тяги $F_{\text{тяг}}$ от скорости движения автосамосвала (Рис. 1).

Для нахождения скорости движения автосамосвала по тяговой характеристике необходимо на оси «Общее сопротивление (уклон + качение)» выбрать соответствующее значение, определенное исходя из параметров участка трассы (средневзвешенного продольного уклона, радиуса кривизны, типа покрытия и др.) [9]. Затем из этой точки шкалы переместиться по лучу влево и вниз до пересечения с вертикальной линией, соответствующей полной (или эксплуатационной) массе автосамосвала. После этого провести горизонтальную линию до пересечения с графиком тяги на колесах и опустить вертикальную линию до оси «Скорость движения».

Преимуществом такого графического способа определения технической скорости движения автосамосвала является высокая достоверность, т. к. тяговая характеристика получена на реальном объекте экспериментальным путем в результате заводских испытаний. Также тяговые характеристики позволяют учитывать режимы переключения передач в зависимости от общего сопротивления трассы перемещению горной породы и различную массу перевозимого груза (автосамосвалы одной и той же грузоподъемности могут выпускаться с разными кузовами) [8]. Но такой подход практически невозможно использовать в имитационной модели, отображающей работу ЭАК, вследствие отсутствия аналитического вида графиков тяговых характеристик, что потребует определять скорость движения автосамосвалов разной грузоподъемности «вручную».

Альтернативным способом определения технической скорости движения автосамосвалов является использование формул, в которых скорость $V_{\text{тех.ан}}$ прямо пропорциональна мощности двигателя $N_{\text{дв}}$, кВт и обратно пропорциональна силам сопротивления движению W , Н (равны силе тяги $F_{\text{тяг}}$, Н), зависящих от эксплуатационной массы автосамосвала $q_{\text{ас}}$, тонн, фактической загрузки автосамосвала $q_{\text{ф}}$, тонн и динамического фактора D [10-13].

$$V_{\text{тех.ан}} = \frac{3,6 \cdot N_{\text{дв}} \cdot k_{\text{тр}} \cdot k_{\text{оп}} \cdot k_{\text{кол}}}{k_{\text{сц}} \cdot F_{\text{тяг}}} = \frac{3,6 \cdot N_{\text{дв}} \cdot k_{\text{тр}} \cdot k_{\text{оп}} \cdot k_{\text{кол}}}{k_{\text{сц}} \cdot (q_{\text{ас}} + q_{\text{ф}}) \cdot D} = \frac{3,6 \cdot N_{\text{дв}} \cdot k_{\text{тр}} \cdot k_{\text{оп}} \cdot k_{\text{кол}}}{k_{\text{сц}} \cdot ((q_{\text{ас}} + q_{\text{ф}}) \cdot (\omega_0 \pm 0,001 \cdot g \cdot i + w_k))} \quad (1)$$

где: $k_{\text{тр}}$ – КПД трансмиссии; $k_{\text{оп}}$ – коэффициент отбора мощности на вспомогательные механизмы; $k_{\text{кол}}$ – КПД колеса; $k_{\text{сц}}$ – коэффициент сцепления колес с дорогой, зависящий от колесной формулы автосамосвала; ω_0 – основное удельное сопротивление движению, м/с²; i – средневзвешенный уклон дороги, %; w_k – средневзвешенное сопротивление движению от криволинейных участков, м/с²; g – ускорение свободного падения, м/с².

Преимущества аналитического способа заключаются в универсальности его

использования для автосамосвалов любой грузоподъемности и возможности ввода формулы для определения скорости их движения в имитационную модель. Но такая аналитическая зависимость априори обладает меньшей достоверностью, чем тяговые характеристики, полученные в результате заводских испытаний с использованием реальных автосамосвалов.

Задачей исследования является сопоставление графического (принятого за эталон) и аналитического способов определения технической скорости автосамосвалов БелАЗ с электромеханической передачей грузоподъемностью 90-360 тонн, а также корректировка аналитической зависимости с учетом преимуществ графического способа.

Основная часть. Для сопоставления графического и аналитического способов определения технической скорости движения автосамосвалов БелАЗ графики тяговых характеристик из паспортов автосамосвалов преобразованы в цифровой вид. Полученные значения скоростей движения автосамосвалов взяты за эталон, после чего произведено их сравнение с результатами аналитических расчетов. При этом верхнее ограничение на скорость движения автосамосвалов установлено не более 30 км/ч исходя из техники

Таблица 1. Средние отклонения значений технической скорости движения автосамосвалов БелАЗ, определенных графическим и аналитическим способами
Table 1. Average deviations of the values of the technical speed of BelAZ dump trucks, determined by graphical and analytical methods

Грузоподъемность автосамосвала, тонн	90	130	160	180	220	240	290	360	Среднее значение
Отклонение	2,05	4,20	2,54	2,10	2,88	3,97	4,52	5,51	3,47

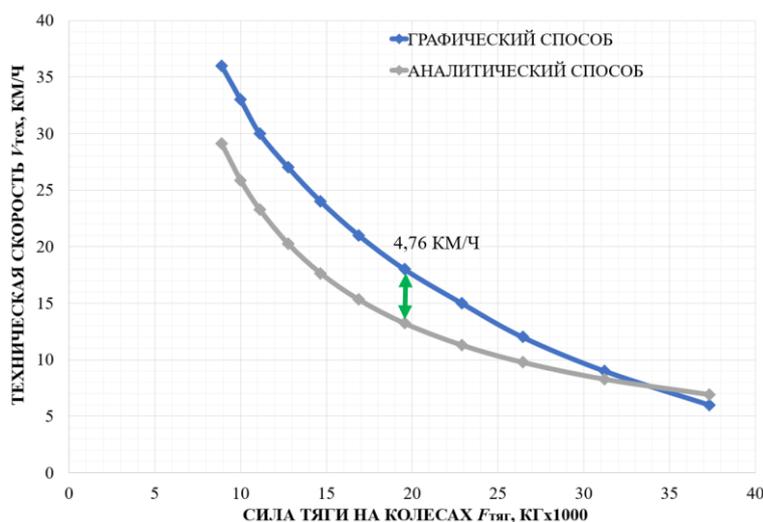


Рис. 2. Сравнение зависимостей скорости движения автосамосвала БелАЗ-7513 от силы тяги на колесах, полученных графическим и аналитическим способами
Fig. 2. Comparison of the dependences of the speed of the BelAZ-7513 dump truck on the traction force on the wheels, obtained by graphical and analytical methods.

безопасности, условий эксплуатации и свода правил СП 37.13330.2012 [14]. В результате рассчитано среднее отклонение значений скоростей движения автосамосвалов, определенных графическим и аналитическим способами (Таблица 1).

На Рис. 2 для примера представлено сравнение зависимостей технической скорости движения автосамосвала БелАЗ-7513 от силы тяги на колесах, полученных графическим и аналитическим способами.

На графике видно, что максимальное отклонение значений скорости, полученных разными способами, составляет 4,76 км/ч.

Гипотетически существует некоторая функциональная связь $F_{откл}$ между скоростью движения автосамосвала, определенной графически $V_{тех.гр}$, и скорости, рассчитанной аналитически $V_{тех.ан}$:

$$V_{тех.гр} = F_{откл}(V_{тех.ан}), \quad (2)$$

Для выявления вида такой функции отклонения $F_{откл}$ для каждого графика зависимости скорости движения автосамосвалов БелАЗ грузоподъемностью 90-360 тонн от силы тяги на колесах, полученных графическим и аналитическим способами, построены

зависимости $V_{тех.гр} = F_{откл}(V_{тех.ан})$. Затем при помощи табличного редактора MS Excel произведена их аппроксимация в ряд визуально подходящих функций: линейную, логарифмическую и степенную с определением достоверности соответствия $F_{откл}$ теоретической кривой (Таблица 2).

Для примера на Рис. 3 представлена функция отклонения $F_{откл}$ скорости движения автосамосвала БелАЗ-7513 грузоподъемностью 130 тонн, определенная графическим и аналитическим способами, и линейная аппроксимация этой функции.

Из Таблицы 2 видно, что наибольшую величину достоверности аппроксимации R^2 показали линейная: $y = a \cdot x_i + f$, ($R_{cp}^2 = 0,99$) и степенная $y = x^{s_i}$ ($R_{cp}^2 = 0,98$) функции, где x_i – некоторая i -я переменная; k – коэффициент наклона линии; f – свободный член, который показывает, где линия пересекается с осью ординат, s_i – показатель степени для i -ой переменной.

Приняв, что функция отклонения имеет смешанный линейно-степенной вид получим:

$$y = a \cdot \prod_{i=1}^n x_i^{s_i} + f, \quad (4)$$

а применительно к формуле (1), учитывая, что

Таблица 2. Достоверность R^2 соответствия $F_{откл}$ теоретическим кривым

Table 2. Reliability R^2 of compliance with $F_{откл}$ theoretical curves

Вид теоретической функции	Грузоподъемность автосамосвала								Среднее значение
	90	130	160	180	220	240	290	360	
Линейная	0,99	0,98	0,99	0,99	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99
Логарифмическая	0,93	0,99	0,97	0,94	0,99	0,98	0,94	0,96	0,96
Степенная	0,99	0,97	0,99	0,99	0,97	0,98	0,99	0,99	0,98

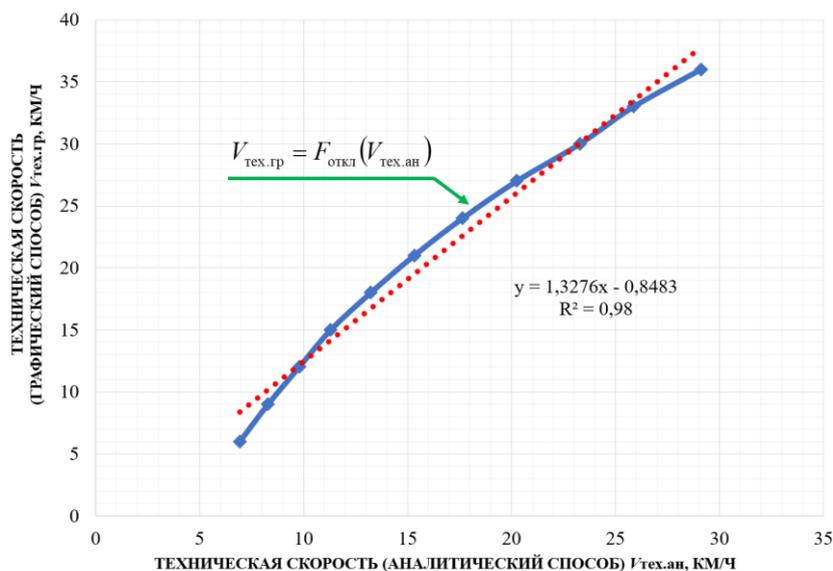


Рис. 3. Функция отклонения $F_{откл}$ при определении скорости движения БелАЗ-7513, определенной графическим и аналитическим способами и линейная аппроксимация функции

Fig. 3. Deviation function $F_{откл}$ in determining the speed of the BelAZ-7513, determined by graphical and analytical methods and linear approximation of the function

коэффициенты не являются переменными:

$$V'_{\text{тех.ан}} = a \cdot \frac{3,6 \cdot N_{\text{дв}}^{s_1} \cdot k_{\text{тр}} \cdot k_{\text{оп}} \cdot k_{\text{кол}}}{k_{\text{сц}} \cdot ((q_{\text{ac}} \cdot s_2 + q_{\text{ф}} \cdot s_3) \cdot D^{s_4})} + f. \quad (5)$$

Определение коэффициентов функции, а

также степени каждого множителя произведено в среде MS Excel с использованием метода эволюционного поиска решения, приняв размер начальной совокупности 2000 и скорость изменения 0,075 с ограничениями на множитель

Коэффициенты	Левая граница	Правая граница	Суммарная погрешность	
a	0,525	0	2	76,049
s1	1,025	0,5	1,5	
s2	0,989	0,5	1,5	
s3	0,800	0,5	1,5	
s4	0,822	0,5	1,5	
f	-2,450	-5	5	

Рис. 4. Определение коэффициентов функции отклонения $F_{\text{откл}}$ в MS Excel
 Fig. 4. Determination of coefficients of the deviation function $F_{\text{откл}}$ in MS Excel

Таблица 3. Отклонение значений технической скорости движения автосамосвалов БелАЗ, определенных графическим и аналитическим способами

Table 3. Deviation of the values of the technical speed of BelAZ dump trucks, determined by graphical and analytical methods

Грузоподъемность автосамосвала, тонн	90	130	160	180	220	240	290	360	Среднее значение
Отклонение	0,81	2,13	0,54	1,11	1,08	0,63	0,88	1,28	1,06

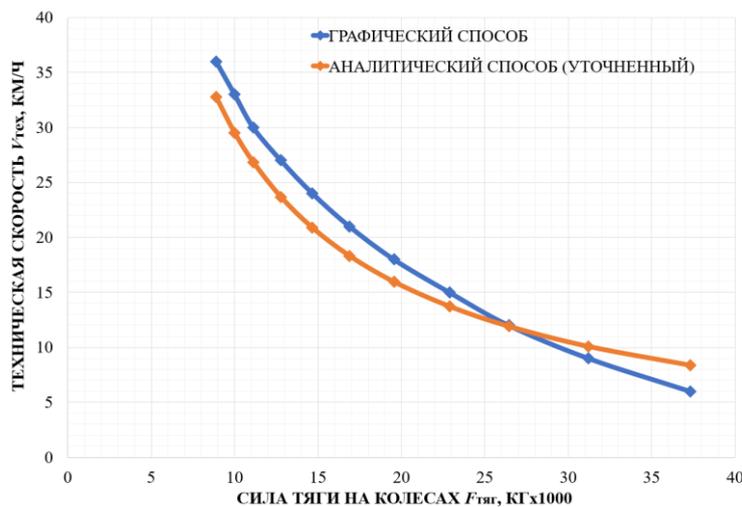


Рис. 5. Сравнение зависимостей скорости движения автосамосвала БелАЗ-7513 (грузоподъемность 130 тонн) от силы тяги на колесах, определенных графическим способом и аналитическим по уточненной формуле (6)

Fig. 5. Comparison of the dependences of the speed of the BelAZ-7513 dump truck (carrying capacity 130 tons) on the traction force on the wheels, determined graphically and analytically according to the specified formula (6)

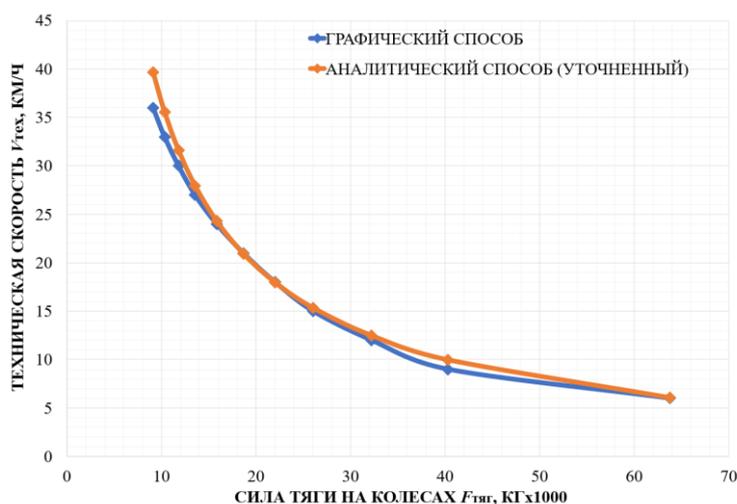


Рис. 6. Сравнение зависимостей скорости движения автосамосвала БелАЗ-7517 (грузоподъемность 160 тонн) от силы тяги на колесах, определенных графическим способом и аналитическим по уточненной формуле (6)

Fig. 6. Comparison of the dependences of the speed of a BelAZ-7517 dump truck (carrying capacity 160 tons) on the traction force on wheels, determined graphically and analytically according to the specified formula (6)

Таблица 4. Условия эксплуатации, физико-механические свойства вскрышной породы и параметры горных машин при функционировании ЭАК

Table 4. Operating conditions, physical and mechanical properties of the overburden and parameters of mining machines during the operation of the EAC

Физико-механические свойства вскрышной породы					
Плотность	2,40				Т/М ³
Коэффициент разрыхления	1,50				-
Условия эксплуатации					
Общая дальность транспортирования	3,60				км
Коэффициент экскавации	0,60				-
Фактическая загруженность автосамосвала	219,84				тонн
Требуемое число ковшей	9				шт
Количество мест для одновременной установки автосамосвалов	1				шт
Схема подъезда автосамосвала	Тупиковая				-
Высота уступа	12				м
Количество автосамосвалов, закрепленных за экскаватором	5				шт
Средневзвешенный продольный уклон участков трассы	Забойный	Карьерный	Траншейный	Отвальный	‰
	64	40	48	28	
Основное удельное сопротивление движению	0,6	0,35	0,30	1,2	м/с ²
Радиус кривизны	150	200	200	200	м
Коэффициент сцепления с трассой	0,65				-
Длина участков трассы	0,41	0,61	0,55	2,03	км
Параметры горных машин					
Вместимость ковша экскаватора	18				м ³
Грузоподъемность автосамосвала	220				тонн
Вместимость кузова автосамосвала с «шапкой»	141				м ³
Эксплуатационная масса автосамосвала	156,1				тонн
Колесная формула автосамосвала	4x2				-
Мощность двигателя	1715				кВт
КПД трансмиссии	0,71				-
Коэффициент отбора мощности на вспомогательные механизмы	0,87				-

Таблица 5. Время выполнения основных технологических процессов ЭАК

Table 5. The execution time of the main technological processes of the EAC

Технологический процесс	Время выполнения, мин
Маневры при погрузке	1,0
Погрузка	5,5
Маневры при разгрузке	0,7
Разгрузка	0,8

Таблица 6. Значения тяговых характеристик и скорости движения автосамосвалов

Table 6. Values of traction characteristics and speed of dump trucks

Параметр	Участки трассы			
	Забойный	Карьерный	Траншейный	Отвалный
Тяговая характеристика в груженом направлении, м/с ²	464,41	279,09	289,80	554,39
Тяговая характеристика в порожнем направлении, м/с ²	192,84	115,89	120,34	230,20
Скорость движения, груженный ход (графический способ), км/ч	10	12	11	8
Скорость движения, груженный ход (аналитический способ – формула 1), км/ч	19,50	19,97	19,23	10,05
Скорость движения, порожний ход (графический способ), км/ч	21	27	26	14
Скорость движения, порожний ход (аналитический способ – формула 1), км/ч	46,97	48,10	46,32	24,21
Скорость движения, груженный ход (аналитический способ – формула 6), км/ч	10,54	17,29	16,69	8,77
Скорость движения, порожний ход (аналитический способ – формула 6), км/ч	17,11	27,28	26,38	14,46

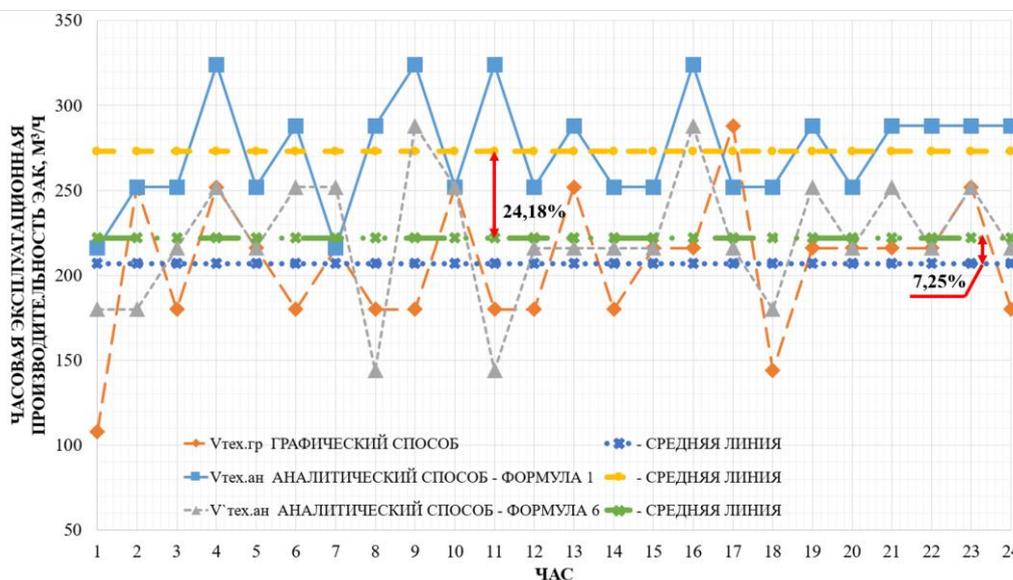


Рис. 7. Динамика изменения часовой эксплуатационной производительности ЭАК при имитационном моделировании

Fig. 7. Dynamics of changes in the hourly operational productivity of the EAC simulation

перед формулой – от 0 до 2, на свободное слагаемое – от -5 до 5, на степени переменных – от 0,5 до 1,5 (Рис. 4).

Подставив определенные коэффициенты в формулу 3, получили следующую уточненную зависимость для определения технической скорости движения автосамосвалов:

$$V'_{\text{тех.ан}} = 0,525 \cdot \frac{3,600 \cdot N_{\text{дв}}^{1,025} \cdot k_{\text{тр}} \cdot k_{\text{оп}} \cdot k_{\text{кол}}}{k_{\text{сц}} \cdot ((q_{\text{ас}}^{0,989} + q_{\text{ф}}^{0,800}) \cdot D^{0,822})} - 2,450. \quad (6)$$

С использованием этой зависимости для моделей автосамосвалов БелАЗ грузоподъемностью 90-360 тонн определена величина отклонения значений технической

скорости движения автосамосвалов БелАЗ, определенных графическим и аналитическим способами (Таблица 3).

На Рис. 5 и 6 представлено графическое отображение функций отклонения для худшего (БелАЗ-7513, 130 тонн) и лучшего (БелАЗ-7517) случаев аппроксимации.

Установлено, что применение уточненной зависимости (6) позволит уменьшить на 70% (с 3,47 до 1,06 км/ч) отклонение значений технической скорости движения автосамосвалов БелАЗ от значений, полученных графическим способом, по сравнению с применением известной аналитической формулы (1).

Для определения влияния использования уточненной зависимости расчета скорости движения автосамосвалов (6) на эксплуатационную производительность ЭАК при имитационном моделировании на разработанной ранее имитационной модели [8] проведены вычислительные эксперименты для условий одного из разрезов Кедровско-Крохалевского месторождения. Исследуемый ЭАК включает в себя экскаватор ЭКГ-18 и автосамосвалы БелАЗ-7530. Условия эксплуатации, физико-механические свойства вскрышной породы и параметры машин представлены в Таблице 4. Время выполнения основных процессов и скорости движения автосамосвалов представлены в Таблицах 5 и 6.

График, отображающий динамику изменения часовой эксплуатационной производительности ЭАК, построенный по результатам имитационных экспериментов, представлен на Рис. 7.

Установлено, что часовая эксплуатационная производительность ЭАК при использовании значений скорости движения автосамосвалов, рассчитанных аналитическим способом по формуле (1), повышена на 24,18% по сравнению с производительностью ЭАК с определением скорости движения автосамосвалов графическим способом. При использовании уточненной зависимости (6) расхождение между значениями производительности ЭАК, определенных графическим и аналитическим способами, уменьшается на 17% и составляет 7,25%.

Заключение. Таким образом, применение полученной уточненной аналитической зависимости позволит на 70% уменьшить отклонение значений технической скорости движения автосамосвалов БелАЗ грузоподъемностью от 90 до 360 тонн от значений, полученных графическим способом, по сравнению с применением известной аналитической формулы. Также использование такой уточненной зависимости позволит на 17% повысить точность определения эксплуатационной производительности

экскаваторно-автомобильных комплексов при имитационном моделировании их работы.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2026-0001 «Разработка комплексных геотехнологий добычи запасов угля в сложных горно-геологических условиях без постоянного присутствия людей в зонах ведения горных работ, а также методов повышения эффективности эксплуатации и контроля роботизированного оборудования» (рег. № 1023032000051-1-1.5.1;2.7.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мешков Г. Б., Петренко И. Е., Губанов Д. А. Итоги работы угольной промышленности России за 2023 год // Уголь. 2024. № 3. С.18-29. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-3-18-29>.
2. Воронов А. Ю. Оптимизация эксплуатационной производительности экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.06, 05.13.18 / Воронов Артем Юрьевич. КузГТУ. Кемерово, 2015. 195 с.
3. 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. № 3. С. 50-66.
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. Фурман А. С. Оценка эффективности эксплуатации экскаваторно-автомобильных комплексов на технологических трассах разрезов Кузбасса: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.06 / Фурман Андрей Сергеевич. КузГТУ. Кемерово, 2018. 137 с.
6. Дадонов М. В., Цариков П. Е., Гатальский Н. В. Анализ структуры простоев карьерных автосамосвалов, эксплуатируемых в условиях ООО СП «Барзасское товарищество» г. Березовский // XIII Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых с международным участием «Россия молодая». Кемерово : КузГТУ, 2021. С. 052317.1- 052317.
7. Ушаков Ю. Ю. Обоснование параметров системы технического обслуживания и ремонта карьерных автосамосвалов: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.06 / Ушаков Ю. Ю. ЮУрГУ, НИИОГР. Екатеринбург, 2016.139 с.
8. Зиновьев В. В. [и др.] 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.

9. Квагинидзе В. С., Козовой Г. И., Чакевадзе Ф. А., Антонов Ю. А., Корецкий В. Б. Автомобильный транспорт на карьерах. Конструкции, эксплуатация, расчет: Учебное пособие. М. : Издательство «Горная книга», 2012. 408 с.

10. Анистратов Ю. И. [и др.] Справочник по открытым горным работам. Москва : Горное дело, 2010. 725 с.

11. Буянкин А. В. [и др.] Карьерные перевозки. Технологические процессы : учебное пособие. Министерство науки и высшего образования, КузГТУ им. Т. Ф. Горбачева. Кемерово, 2020. 84 с. ISBN 978-5-00137-189-2.

12. Захаров А. Ю. Определение скорости движения карьерных автосамосвалов:

методические указания к практическим занятиям по дисциплинам «Карьерные транспортные машины и оборудование» и «Карьерный транспорт» [Электронный ресурс] для студентов специальности 21.05.04 Горное дело, специализаций 21.05.04.09 Горные машины и оборудование и 21.05.04.03 Открытые горные работы, всех форм обучения / сост.: А. Ю. Захаров. КузГТУ. Кемерово, 2019. 20 с.

13. Ерофеева Н. В. Упрощенная методика определения скорости движения карьерного автосамосвала // Сборник материалов XVI Всероссийской, научно - практической конференции молодых ученых с между народным участием «Россия молодая». Кемерово. 2024. С. 010904.1-010904.7

14. Свод правил: СП 37.13330.2012. Промышленный транспорт. Москва, 2012. 232 с.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Зиновьев Василий Валентинович, канд. тех. наук, доц., ведущий научный сотрудник, доцент, zv150671@gmail.com, Россия, Кемерово, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева

Николаев Петр Игоревич, канд. тех. наук, доцент, mrnikolaev@mail.ru, Россия, Кемерово, Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева

Кузнецов Игорь Сергеевич, канд. тех. наук, старший научный сотрудник, доцент, is150794@mail.ru, Россия, Кемерово, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева

Заявленный вклад авторов:

Зиновьев Василий Валентинович – постановка цели и задач исследования, формулировка аннотации и выводов, коррективировка текста.

Николаев Петр Игоревич – формулировка идеи исследования, анализ данных, разработка уточненной аналитической зависимости.

Кузнецов Игорь Сергеевич – формулировка идеи исследования, проведение вычислительных экспериментов, анализ результатов, редактирование материала.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DETERMINATION OF THE SPEED OF DUMP TRUCKS DURING SIMULATION OF OPERATION EXCAVATOR-DUMP TRUCK COMPLEXES

Vasily V. Sinoviev^{1,2}, Petr I. Nikolaev^{1,2}, Igor S. Kuznetsov^{1,2}

¹Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, ²T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: is150794@mail.ru

**Article info**

Received:

26 September 2025

Accepted for publication:

15 January 2026

Accepted:

12 February 2026

Published:

19 March 2026

Keywords: open-pit mining, excavator-dump truck complex, approximation, dump truck speed, simulation modeling

Abstract.

In opencast mining, the processes of transporting rock mass by dump trucks take up 43-82% of the total duration of a dump truck trip. Therefore, when simulating the operation of excavator-dump truck complexes (EDC), the duration of the movement of dump trucks along the route sections has a significant impact on the operational performance of the EAC obtained as a result of computational experiments. The duration is determined based on the speed of the dump trucks. The article considers two methods for determining the speed - a graphical method based on the use of dynamic traction characteristics of dump trucks, and an analytical method using a well-known formula. A comparison of these methods was made and the average deviation of the speed values of BelAZ dump trucks with a carrying capacity of 90-360 tons was determined. In this case, the values obtained on the basis of traction characteristics from dump trucks' passports are taken as a standard. A functional relationship between the speed of movement of dump trucks of different carrying capacity, determined graphically, and the speed calculated analytically is determined. Approximation of functions is performed. Based on this, a refined formula for determining the speed of movement of BelAZ dump trucks is obtained, using which the deviation of the values of the technical speed of movement of dump trucks, determined by graphical and analytical methods, is determined. It is revealed that the use of the refined formula allows to reduce the deviation of the values of the technical speed of movement of BelAZ dump trucks from the values obtained by the graphical method, compared with the use of the known analytical formula. Also, based on the results of computational experiments when modeling the operation of the EAC in the conditions of one of the open pits of the Kedrovsko-Krokhalevsky deposit, it is shown that the use of the obtained refined dependence allows to increase the accuracy of determining the operational performance of the EAC.

For citation: Sinoviev V.V., Nikolaev P.I., Kuznetsov I.S. Determination of the speed of dump trucks during simulation of operation excavator-dump truck complexes. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 1(173):171-181. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-1-171-181, EDN: MTJEGH

REFERENCES

1. Meshkov G.B., Petrenko I.E., Gubanov D.A. Russia's coal industry performance for 2023. *Ugol'*. 2024; 3:18-29. (In russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-3-18-29.
2. Voronov A.Yu. Optimization of operational performance of excavator-automobile complexes of sections: diss. ... PhD (Engineering), 05.05.06., 05.13.18 / Voronov Artem Yurievich; T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 2015, 195 p. (in Russ.).
3. Dubinkin D.M., Sadovets V.Yu., Kotiev G.O., Kartashov A.V. Overburden and coal transportation research at open pit mines. *Journal of mining and geotechnical engineering*. 2019; 4(7):50.
4. Khoreshok A.A., Dubinkin D.M., Markov S.O., Tyulenev M.A. Estimation of the degree of mutual influence of the excavator bucket capacity and haul truck body. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2021; 3(145):104-112.
5. Furman A.S. Evaluation of the efficiency of operation of excavator-automobile complexes on technological routes of Kuzbass sections: dis. ... PhD (Engineering), 05.05.06 / Furman Andrey Sergeevich; T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 2018. 137 p. (in Russ.).
6. Dadonov M.V., Tsarikov P.E., Gatalsky N.V. Analysis of the downtime structure of dump trucks operated in the conditions of LLC JV "Barzassky Partnership" Berezovsky. *XIII All-Russian scientific and practical Conference of young scientists with international participation "Young Russia"*. Kemerovo: KuzSTU; 2021. From 052317.1-052317.
7. Ushakov Yu.Yu. Justification of the parameters of the system of maintenance and repair of mining dump trucks: dis. ... PhD (Engineering): 05.05.06 / Ushakov Yu.Yu. SUSU, NIOGR. Yekaterinburg, 2016. 139 p. (in Russ.).
8. Sinoviev V.V., Kuznetsov I.S., Nikolaev P.I., Starodubov A.N. Simulation modelling of robotic open and underground coalmining systems. *Russian Mining Industry*. 2023;(S2):65-76. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-S2-65-76.
9. Kvaginidze V.S., Kozovoy G.I., Chakvetadze F.A., Antonov Yu.A., Koretsky V.B. Motor transport in quarries. Constructions, operation, calculation: A textbook. Moscow: Gornaya Kniga Publishing House; 2012. 408 p.

10. Anistratov Yu. I. [et al.] Handbook of open-pit mining. Moscow: Mining; 2010. 725 p.

11. Buyankin A.V. [et al.] Quarry transportation. Technological processes : a textbook. Ministry of Science and Higher Education, KuzSTU named after T. F. Gorbachev. Kemerovo, 2020. 84 p. ISBN 978-5-00137-189-2.

12. Zakharov A.Y. Determination of the speed of movement of quarry dump trucks: methodological guidelines for practical classes in the disciplines of "Quarry transport vehicles and equipment" and "Quarry transport" [Electronic resource] for students of specialty

21.05.04 Mining, specializations 21.05.04.09 Mining machinery and equipment and 21.05.04.03 Open-pit mining, all forms of education / comp.: A.Y. Zakharov; KuzSTU, Kemerovo, 2019. 20 p.

13. Yerofeeva N.V. Simplified methodology for determining the speed of movement of a quarry dump truck. *Collection of materials of the XVI All-Russian scientific and practical conference of young scientists with international participation "Young Russia"*. Kemerovo, 2024. Pp. 010904.1-010904.7

14. Code of rules: SP 37.13330.2012. Industrial transport. Moscow. 2012. 232 p.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Vasily V. Sinoviev, PhD of Engineering Sciences, docent, leading researcher, docent, zv150671@gmail.com, Russia, Kemerovo, Federal State Budget Scientific Centre «The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

Petr I. Nikolaev, PhD of Engineering Sciences, docent, mnikolaev@mail.ru, Russia, Kemerovo, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

Igor S. Kuznetsov, PhD of Engineering Sciences, senior researcher, docent, is150794@mail.ru, Russia, Kemerovo, Federal State Budget Scientific Centre «The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

Contribution of the authors:

Vasily V. Sinoviev – statement of the purpose and objectives of the study, formulation of the abstract and conclusions, correction of the text.

Petr I. Nikolaev – formulation of the research idea, data analysis, development of a refined analytical dependence.

Igor S. Kuznetsov – formulation of the research idea, conducting computational experiments, analyzing the results, editing the material.

All authors have read and approved the final manuscript.

