

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 622.68 (075.3)

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-163-171

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАСХОДА ТОПЛИВА КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ НА ОСНОВЕ ПРИВЕДЕНИЯ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ К ЕДИНУМУ ПОКАЗАТЕЛЮ

Вашлаев Иван Иванович^{1,2*}, Михайлов Александр Геннадьевич^{1,2},
Демченко Игорь Иванович², Игнатова Ольга Сергеевна²

¹ Институт химии и химической технологии – Обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр» СО РАН

² Сибирский федеральный университет

* для корреспонденции: vash49@gmail.com



Информация о статье

Поступила:

28 марта 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

22 сентября 2025 г.

Принята к публикации:

30 сентября 2025 г.

Опубликована:

23 октября 2025 г.

Ключевые слова:

нормирование расхода
топлива, карьерные
автосамосвалы,
энергетический критерий,
транспортная работа

Аннотация.

Карьерные автосамосвалы – ключевой элемент транспортной системы горнодобывающих предприятий. Их эффективность напрямую влияет на себестоимость добычи полезных ископаемых. Одним из важнейших показателей эксплуатационной экономичности является расход топлива, отражающий затраты энергии на единицу выполненной работы. Энергетический критерий позволяет учесть не только объем потребляемого топлива, но и энергетические потери, связанные с условиями эксплуатации, что делает расчеты более точными и адаптивными. Целью данной работы является разработка надежной и универсальной методики определения расхода топлива большегрузными автосамосвалами. В качестве метода исследования использован аналитический метод: физические законы. На основе приведения горнотехнических параметров транспортирования горной массы к единому показателю, которым является приведенное к горизонтальному эквиваленту расстояние транспортирования маршрута, разработана методика определения расхода топлива карьерными автосамосвалами по энергетическому критерию (транспортной работе). Приведенное расстояние транспортирования учитывает следующие параметры: качество дорожного полотна, длину и величину уклона каждого участка трассы, коэффициенты использования грузоподъемности и тары самосвала, КПД двигателя и трансмиссии. Разработанная методика повышает надежность расчета расхода топлива и может быть встроена в автоматизированную систему управления карьером и использована для решения различных задач: нормирование расхода топлива для любых типов автосамосвалов с любыми горнотехническими условиями, планирование горных работ, определение качества дорог в течение смены и т. д.

Для цитирования: Вашлаев И.И., Михайлов А.Г., Демченко И.И., Игнатова О.С. Методика расчета расхода топлива карьерных автосамосвалов на основе приведения горнотехнических факторов к единому показателю // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 5 (171). С. 163-171. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-163-171, EDN: QPKZXV

Благодарность

Исследование выполнено при поддержке проекта №. FWES-2021-0014 Фундаментальные исследования ИХХТ СО РАН

Введение

В структуре затрат на добычу полезного ископаемого затраты на автомобильный транспорт могут достигать 50 – 60 % и более, поэтому повышение эффективности добычи полезных ископаемых неразрывно связано со снижением расходов на транспортирование горных пород. Таким образом, снижение затрат на транспортирование является одним из основных резервов повышения эффективности добычи полезных ископаемых. Карьер является сложной динамичной системой, параметры которой непрерывно изменяются с течением времени по мере отработки карьера, и эти изменения необходимо учитывать в деятельности горного предприятия. От повышения надежности функционирования всей системы зависит эффективность работы горного предприятия в целом. В данной работе рассматриваются вопросы транспортирования горной массы карьерными автосамосвалами. Подсистема карьерного автотранспорта неразрывно связана с учетом влияния сложности горнотехнических и дорожных условий эксплуатации, которые влияют на результирующие показатели (расход дизельного топлива, производительность, себестоимость транспортирования и др.).

Объективной оценкой затрат по горным процессам является энергетический параметр, в том числе это относится к транспортированию горных пород. Именно с этих позиций как наши, так и зарубежные исследователи изучали процесс транспортирования [1-16]. Энергетический критерий учитывает не только количество топлива, но и энергетические затраты на выполнение работы, что делает расчеты более точными. Однако различные методики обладают различной точностью расчетов. Авторы Аксенов В. Б. и др. [6] сделали сравнительный анализ различных методик и пришли к выводу, что только одна из пяти методик обладает необходимой точностью. Для более достоверного вывода требуется проведение дополнительных экспериментов. В различных методиках не рассматриваются случаи параметров трасс, в которых могут быть элементарные участки в маршруте на подъем и на спуск. Поэтому задача повышения надежности и точности расчета расхода топлива автосамосвалами является актуальной задачей.

Постановка цели и задач

Целью работы является разработка более универсальной и надежной методики расчета расхода топлива карьерных автосамосвалов.

Для достижения цели должны быть решены следующие задачи:

- приведение горнотехнических параметров транспортирования к интегральному показателю (приведенное расстояние

транспортирование) через коэффициенты приведения транспортирования на подъем и спуск горной массы;

- расчет физической работы транспортного средства за рейс и расход топлива.

Методы исследования

Для достижения поставленной цели и решения перечисленных выше задач были применены следующие методы:

- аналитический метод определения транспортной работы перемещения груза автосамосвалом на основе физических законов движения, технических характеристик автосамосвалов, параметров трассы маршрута и качества дорожного полотна;
- определение расхода дизельного топлива на основе энергетического параметра.

Содержание исследования

Расход топлива автосамосвалами на горных предприятиях нормируется в л/100 км пробега г/ткм [21]. При этом принимаются усредненные условия эксплуатации. Линейные нормы расхода топлива на 100 км пробега для автосамосвалов БелАЗ пригодны лишь для укрупненного планирования его расхода, но они не приемлемы для конкретных условий эксплуатации. В 80-е годы были разработаны временные нормы расхода топлива автосамосвалов грузоподъемностью 75–180 т, которые не были утверждены вышестоящими инстанциями. В отраслевых нормах учтены конкретные горнотехнические и климатические условия, поэтому такие нормы называют дифференцированными.

Однако при современных масштабах горных работ, многообразии условий эксплуатации мощных дорогостоящих автосамосвалов даже дифференцированные нормы расхода топлива не могут полностью отразить конкретные, только им присущие условия крупных карьеров, их особенности. Поэтому для таких карьеров нужно иметь свои нормативы расхода топлива. Естественно, потребность в нормативах возникает для новых моделей автосамосвалов. Нормативы разрабатываются на основании экспериментальных исследований. В существующих нормативах [19] расход топлива для каждой марки автомобиля определен для средних дорожных условий, для расстояния транспортирования от 0,5 до 10 км с градиацией через 0,5 км до 5 км и через 1 км от 5 до 10 км, высоты подъема (спуска горной массы до 400 м с градиацией через 25 м). Хотя в приложении к нормам не приводится даже краткая методика их получения, очевидно, найти дорожные условия для всего диапазона вышеуказанных параметров практически невозможно. Следовательно, применялись какие-то расчетные методы. Существенным недостатком таких норм является

отсутствие учета коэффициента использования грузоподъемности автомобиля.

Многие авторы предлагают при определении расхода топлива приводить расстояние транспортирования к горизонтальному эквиваленту, после этого расчеты намного упрощаются. В общем виде формула приведенного расстояния транспортирования выражается как функция высоты подъема (спуска) груза

$$L_{\text{пр}} = L_{\text{ф}} + f(H_{\text{п}}) + f(H_{\text{с}}) \quad (1)$$

где $L_{\text{пр}}$, $L_{\text{ф}}$ – приведенное и фактическое расстояния транспортирования, м; $f(H_{\text{п}})$, $f(H_{\text{с}})$ – приращения пути как функции высоты подъема и спуска груза, м,

$$f(H_{\text{п}}) = \Theta_{\text{п}} H_{\text{п}},$$

$$f(H_{\text{с}}) = \Theta_{\text{с}} H_{\text{с}};$$

$H_{\text{п}}$, $H_{\text{с}}$; – высота подъема и спуска груза, м; $\Theta_{\text{п}}$, $\Theta_{\text{с}}$ – горизонтальные эквиваленты (коэффициент приведения) подъема и спуска горной массы, м/м подъема (спуска). Тогда формула (1) примет вид

$$L_{\text{пр}} = L_{\text{ф}} + \Theta_{\text{п}} H_{\text{п}} + \Theta_{\text{с}} H_{\text{с}}, \quad (2)$$

Коэффициенты приведения рядом авторов [1, 2, 10, 11] предложено определять по различным критериям: по времени движения, расходу топлива и стоимости транспортирования. Недостатками данных способов являются необходимость в проведении большого объема экспериментальных работ, полученные значения эквивалентов имеют частный характер, т. к. определены для конкретных горнотехнических параметров и дорожных условий. А так как карьер – это динамично развивающаяся система, то для новых параметров трассы или изменившихся дорожных условий вновь требуется уточнение значений коэффициентов приведения. Возникают затруднения при принятии значений эквивалентов в процессе проектирования горных работ, когда невозможно провести экспериментальные работы.

Объективным является определение значения горизонтального эквивалента, исходя из равенства энергий, затрачиваемых на преодоление наклонного участка пути в грузовом и порожнем направлениях для подъема (спуска) горной массы на 1 м высоты и на эквивалентном горизонтальном участке. На основании вышеизложенного выведены формулы горизонтальных эквивалентов на подъем и спуск груза с учетом качества дорожного полотна, уклона элемента участка трассы, параметра автосамосвала (коэффициент тары) и массы перевозимой горной массы, выраженной через коэффициент использования грузоподъемности [21].

Коэффициенты приведения на подъем груза $\Theta_{\text{п}}$, и спуск $\Theta_{\text{с}}$ на участке трассы с уклоном i (%) и удельным основным сопротивлением движению $\omega_{\text{о}}$, (Н/кН):

■ при $i \leq \omega_{\text{о}}$

$$\Theta_{\text{п}} = \frac{1000 K_{\text{г}}}{\omega_{\text{о}} (K_{\text{г}} + K_{\text{т}})}, \text{ м/м} \quad (2)$$

$$\Theta_{\text{с}} = - \frac{1000 K_{\text{г}}}{\omega_{\text{о}} (K_{\text{г}} + K_{\text{т}})}, \text{ м/м} \quad (3)$$

■ при $i > \omega_{\text{о}}$

$$\Theta_{\text{п}} = \frac{1000 (K_{\text{г}} + K_{\text{т}} (1 - \frac{\omega_{\text{о}}}{i}))}{\omega_{\text{о}} (K_{\text{г}} + 2K_{\text{т}})}, \text{ м/м} \quad (4)$$

$$\Theta_{\text{с}} = \frac{1000 (K_{\text{т}} - (K_{\text{г}} + K_{\text{т}}) \frac{\omega_{\text{о}}}{i})}{\omega_{\text{о}} (K_{\text{г}} + 2K_{\text{т}})}, \text{ м/м} \quad (5)$$

где $K_{\text{т}}$ – коэффициент тары автосамосвала; $K_{\text{г}}$ – коэффициент использования грузоподъемности.

В итоге формула (2) приведенного расстояния трассы примет следующий вид

$$L_{\text{пр}} = \sum_{j=1}^n L_j + 0.001 \sum_{j=1}^n i_j L_j \Theta_j, \text{ м}, \quad (6)$$

L_j , i_j , Θ_j – соответственно длина, уклон и коэффициент приведения j -го участка трассы, $j = \overline{1, n}$; $\omega_{\text{б}}$ – базовое (эталонное) удельное основное сопротивление движению, Н/кН; $\omega_{\text{о ср}}$ – среднее удельное основное сопротивление движению.

Для сопоставимости трасс с различными дорожными характеристиками и оценки транспортной работы можно приводить приведенное расстояние к базовому (эталонному) значению

$$L_{\text{пр}}^{\text{б}} = L_{\text{пр}} \omega_{\text{о ср}} / \omega_{\text{об}}, \text{ м}, \quad (7)$$

где $L_{\text{пр}}^{\text{б}}$ – базовое (эталонное) приведенное расстояние транспортирования относительно дорожного полотна с принятым удельным

сопротивлением $\omega_{\text{об}}$, м; $L_{\text{пр}}$ – приведенное расстояние транспортирования, учитывающее фактическое состояние дорожного полотна трассы, м. Величина базового (эталонного) удельного сопротивления принимается специалистом, выполняющим расчет, исходя из поставленных целей и необходимости. Например, можно принять значение базового удельного сопротивления для дорожного

полотна со щебеночным покрытием или другим покрытием. $\omega_{\text{о ср}}$ – средневзвешенное удельное сопротивление качению трассы, Н/кН

$$\omega_{\text{о ср}} = \left(\sum_{j=1}^n \omega_{\text{о } j} L_j + 0.001 \sum_{j=1}^n \omega_{\text{о } j} i_j L_j \Delta_j \right) / L_{\text{пр}}, \text{ Н/кН} \quad (8)$$

$\omega_{\text{о } j}$ – удельное основное сопротивление движению j -го участка трассы, $j = 1, n$, Н/кН.

поэтому целесообразно определять расход топлива также в зависимости от приведенного расстояния транспортирования. В данном показателе учтены качество дорожного покрытия, уклон трассы, высота подъема (спуска), коэффициент грузоподъемности и коэффициент тары автосамосвала.

Расчетным методом расход топлива наиболее достоверно может быть установлен по работе, затрачиваемой автомобилем на транспортирование груза за рейс [20]

$$A = (q + q_{\text{т}}) \omega_{\text{о}} L_{\text{пр}} g + q \omega_{\text{о}} L_{\text{пр}} g, \text{ Дж}, \quad (9)$$

где q – масса перевозимого груза, т; $q_{\text{т}}$ – масса порожнего автосамосвала, т; g – ускорение свободного падения, м/с².

Выразив q и $q_{\text{т}}$ через коэффициенты грузоподъемности и тары ($K_{\text{г}}$, $K_{\text{т}}$), получим

$$A = L_{\text{пр}} \omega_{\text{о}} g q (K_{\text{г}} + 2K_{\text{т}}), \text{ Дж}. \quad (10)$$

Тогда расчетный расход топлива за один рейс, кг

$$E_{\text{р}} = L_{\text{пр}} \omega_{\text{о}} g q (K_{\text{г}} + 2K_{\text{т}}) / (q_{\text{т.с}} \eta_{\text{дв}} \eta_{\text{тр}}), \text{ кг} \quad (11)$$

где $q_{\text{т.с}} = 41\,868 \cdot 10^3$ Дж/кг – удельная теплота сгорания дизельного топлива; $\eta_{\text{дв}}$ – КПД двигателя внутреннего сгорания; $\eta_{\text{тр}}$ – КПД трансмиссии.

Расчетный расход топлива конкретного автосамосвала с учетом климатических условий, изношенности двигателя и высоты расположения карьера над уровнем моря составит

$$E_{\text{рф}} = E_{\text{р}} k_{\text{з}} k_{\text{и}} k_{\text{у}}, \text{ кг}, \quad (12)$$

где $k_{\text{з}}$ – коэффициент, учитывающий повышение расхода топлива в зимний период ($k_{\text{з}} = 1.20$ Крайний Север, 1.15 – северная зона,

умеренный климат, 1.05 – южная зона); $k_{\text{и}}$ – коэффициент, учитывающий степень изношенности двигателя: при моторесурсе до 500 ч он равен 0.88, 500-1000 ч – 0.92, 1000-1500 ч – 0.96, 1500-2000 ч – 1.00, 2000-2500 ч – 1.04, 2500-3000 ч – 1.08, 3000-3500 ч – 1.12 и более 3500 ч – 1.16; $k_{\text{у}}$ – коэффициент, учитывающий высоту расположения карьера над уровнем моря, при высоте более 1500 м принимается равным 1.1.

Удельный расход топлива на единицу транспортной работы (ткм) с учетом фактического расстояния транспортирования определяется по формуле

Таблица 1. Параметры трассы для расчета расхода топлива

Table 1. Route parameters for fuel consumption calculation

№ участка	Высота над уровнем моря, м		Высота участка, м	Уклон, ‰	Удельное сопротивление качению, Н/кН	Длина участка, м	Суммарная длина трассы, м
1-2	42,0	67,9	25,9	59,1	60,0	438	438
2-3	67,9	81,6	13,7	109,6	35,0	125	563
3-4	81,6	101	19,4	77,6	35,0	250	813
4-5	101,0	205,8	104,8	104,8	35,0	1000	1813
5-6	205,8	242,8	37,0	64,3	35,0	575	2388
6-7	242,8	260	17,2	45,9	120,0	375	2763

Таблица 2. Исходные [6] и расчетные данные расхода топлива для автосамосвала БелАЗ-75306

Table 2. Initial [6] and design fuel consumption data for BelAZ-75306 dump truck

$L_{\text{пр}}$, м	$\omega_{\text{о ср}}$, ‰	g , м/с ²	q , т	$K_{\text{г}}$	$K_{\text{т}}$	A , Дж	$E_{\text{р}}$, кг	$E_{\text{р}}$, л	$e_{\text{рф}}$, г/ткм	$e_{\text{пр}}$, г/ткм	$e_{\text{ф}}$, г/ткм
5952	43,8	9,81	220,0	0,95	0,71	1 333 451 018	101,1	120,4	175,9	81,7	
С учетом маневров и работы на холостом ходу							107,1	127,5	186,4	86,5	116,93

$$e_{рф} = 10^6 E_p / q_{г} L_{ф}, \text{ г/ткм}, \quad (13)$$

где $q_{г}$ – масса перевозимого груза в кузове автосамосвала.

Аналогично определяется удельный расход топлива для приведенного расстояния транспортирования (т. е. при движении по горизонтальной дороге):

$$e_{рпр} = 10^6 E_p / q_{г} L_{пр}, \text{ г/ткм}. \quad (14)$$

Обсуждение результатов

Для проверки предложенной методики воспользуемся данными, приведенными в работе [6], и преобразуем их к виду соответствующим нашей методики (Таблица 1).

Приведенная длина трассы, рассчитанная на основании данных Таблицы 1 по формуле (6), составляет 5952 м. Затем произведен расчет параметров по формулам (10-14) и сведен в Таблицу 2, где E_p – расход горючего за рейс в кг и литрах; $e_{ф}$ – удельный расход топлива на основании отчетных или экспериментальных данных, г/ткм.

Отклонение расхода по методике Подпорина Т. Ф. [6] и нами предложенной методикой составляет в среднем 5% (по данным [6] значения расхода топлива. 116,5 – 148,7 л/рейс и 127,5 л/рейс (см. Таблицу 2), рассчитанное по формулам (10-12). По остальным методикам расхождение составляет от –34 до +24%.

Аналогичные расчеты, выполненные для БелАЗ-75191 по отчетным данным на карьере Удачный, также подтверждают надежность предложенной методики расчета топлива (Таблица 3, Таблица 4). На вскрыше (см. Таблицу 3) $e_{рф} = 132,3$ г/ткм (без учета

климатических условий). С учетом климатических условий необходимо удельный расход увеличить на 10%, тогда удельный расход составит 145,2 г/ткм (по отчетным данным 146,7 г/ткм). При транспортировании руды этот показатель также с учетом климатических условий составит 148,1 г/ткм.

Удельный расход значительно зависит от коэффициента тары автосамосвала. Например, у самосвала БелАЗ-548 ($K_r=0,66$) для горнотехнических условий Ирбинского рудника он равен 66,7 г/ткм.

Расчеты, выполненные по данной методике для БелАЗ-548 для летнего периода и дороги с удельным сопротивлением 35 Н/кН, показали, что отклонения от дифференциальных норм [19] находятся в пределах $\pm(5-15)\%$. Сравнение удельного расхода топлива для БелАЗ-549, рассчитанного по выше приведенной методике, с данными исследований Казарева А. Н. и Кулешова А. А. [23] выявило также хорошую сходимость результатов.

Таким образом, данную методику расчета расхода топлива можно встроить в автоматизированную систему управления автомобильным транспортом и получать более достоверную оценку расхода топлива, как для отдельного автосамосвала, так и для всего парка машин для различных периодов времени. Это важно при оперативном и долгосрочном планировании горных работ. Зная расход топлива за рейс или на отдельном участке маршрута (благодаря современным техническим средствам позволяют это делать в реальном времени), можно определять качество дороги путем решения обратной задачи вычисления

Таблица 3. Исходные и расчетные данные расхода топлива для автосамосвала БелАЗ-75191 на вскрыше (карьер Удачный)
Table 3. Initial and Design Fuel Consumption Data for BelAZ-75191 Dump Truck on Overburden (Udachny Borrow Pit)

$L_{пр}, \text{ м}$	$\omega_o, \text{ ср}, \%$	$g, \text{ м/с}^2$	$q, \text{ т}$	K_r	K_t	$A, \text{ Дж}$	$E_p, \text{ кг}$	$E_p, \text{ л}$	$e_{рф}, \text{ г/ткм}$	$e_{пр}, \text{ г/ткм}$	$e_{ф}, \text{ г/ткм}$
7750	42,0	9,81	100	1,00	0,85	858 958 695	65,13	82,54	122,9	84,0	
С учетом маневров и работы на холостом ходу							70,1	83,5	132,3	90,5	146,7

Таблица 4. Исходные и расчетные данные расхода топлива для автосамосвала БелАЗ-75191 на добыче (карьер Удачный)
Table 4. Initial and calculated fuel consumption data for the BelAZ-75191 dump truck in production (Udachny Borrow Pit)

$L_{пр}, \text{ м}$	$\omega_o, \text{ ср}, \%$	$g, \text{ м/с}^2$	$q, \text{ т}$	K_r	K_t	$A, \text{ Дж}$	$E_p, \text{ кг}$	$E_p, \text{ л}$	$e_{рф}, \text{ г/ткм}$	$e_{пр}, \text{ г/ткм}$	$e_{ф}, \text{ г/ткм}$
10810	39,0	9,81	100	1,00	0,85	1 116 665 433	84,67	100,8	127,5	78,3	
С учетом маневров и работы на холостом ходу							89,4	106,4	134,6	82,7	149,6

удельного сопротивления качению и принимать решение о необходимости улучшения качества дорожного полотна (например, грейдерование и др.). Приведение горнотехнических параметров транспортирования к интегральному показателю дает возможность более эффективно управлять погрузочно-транспортным комплексом, оптимизировать грузопотоки в карьере [22]. В дальнейшем нами планируется провести исследование по оптимизации высоты яруса бульдозерного отвала по энергетическому критерию.

Выводы

Разработана новая методика нормирования расхода дизельного топлива карьерными автосамосвалами, созданная с применением аналитического метода определения транспортной работы перемещения груза на основе физических законов движения, технических характеристик автосамосвалов, параметров трассы маршрута и качества дорожного полотна. Методика характеризуется комплексным учетом горнотехнических и дорожно-транспортных параметров карьера, конструктивных параметров карьерных автосамосвалов, что обеспечивает более обоснованные и надежные результаты расчетов, которые необходимы при принятии решений.

Расчет удельного расхода топлива по энергетическому критерию позволяет учесть комплекс факторов, влияющих на эффективность работы карьерных автосамосвалов. Использование данной методики способствует снижению эксплуатационных затрат и повышению экологической устойчивости горнодобывающих предприятий. Методику рекомендуется использовать для расчета норм расхода топлива для различных типов автосамосвалов, при оперативном и долгосрочном планировании горных работ, оптимизации грузопотоков в карьере.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на интеграцию энергетических моделей с системами искусственного интеллекта для прогнозирования и оптимизации режимов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Развитие идей член-корр. РАН В. Л. Яковлева по учету влияния горнотехнических условий эксплуатации на показатели карьерного автотранспорта // Проблемы недропользования. 2014. № 3. С. 136–144.
2. Арефьев С. А. Оценка и обоснование рациональных дорожных условий эксплуатации карьерных автосамосвалов большой грузоподъемности / диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Специальность: 25.00.22 – «Геотехнология» (подземная, открытая и строительная) // Екатеринбург, 2015.
3. Лель Ю. И., Арефьев С. А., Глебов А. В., Ильбульдин Д. Х. К вопросу оценки качества карьерных автодорог // Известия УГТУ. 2016. Вып. 3(43). С. 70–73. DOI: 10.21440/2307-2091-2016-3-70-73.
4. Журавлев А. Г., Исаков М. В. Экспериментальные исследования работы карьерных автосамосвалов в условиях эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 3-1. С. 530–542. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-530-542.
5. Журавлев А. Г. Вопросы оптимизации параметров транспортных систем карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 3-1. С. 583–601. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-583-601.
6. Аксенов В. В., Пашков Д. А., Дубинкин С. Д. Методики расчета расхода топлива карьерных самосвалов // Уголь. 2024. № 11S. С. 102–107. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11S-102-107.
7. Dubinkin D. M., Golofastova N. N. Increasing technological sovereignty in dump trucks production facing economic sanction // E3S Web of Conferences. 2024. № 549. 01008. DOI: 10.1051/e3sconf/202454901008.
8. Анализ факторов, влияющих на повышенный расход топлива карьерных автосамосвалов марки БЕЛАЗ на ООО «Восточно-Бейский разрез» // Ресурсосберегающие технологии в контроле, управлении качеством и безопасностью. Сборник научных трудов XI Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых. Томск, 2023.
9. Гартман А. А., Андреев Ю. Г., Горбунов А. Ю., Захаров С. И. Методика статистического анализа удельного расхода дизельного топлива в процессе транспортирования горной массы автосамосвалами на предприятиях открытого способа добычи угля // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. № 5 (153). С. 72–80. DOI: 10.26730/1999-4125-2022-5-72-80.
10. Лель Ю. И., Зырянов И. В., Ильбульдин Д. Х. Методика нормирования расхода топлива автосамосвалами в глубоких карьерах // Известия Уральского государственного горного университета. 2017. № 4 (48). С. 66–71.
11. Лель Ю. И., Салахияев Р. Г., Арефьев С. А., Сандригайло И. Н. Совершенствование нормирования расхода топлива карьерными автосамосвалами на основе горизонтальных эквивалентов вертикального перемещения горной массы // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2014. № 2. С. 107–115.
12. Вишняков Г. Ю., Ботян Е. Ю., Розов Р. А., Пушкарев А. Е. Уточнение методики нормирования расхода топлива карьерных автосамосвалов в сложных горнотехнических условиях // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 4 (162). С. 12–19. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-4-12-19.
13. Gillespie T. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics Society of Automotive Engineers, 1992. P. 495. <https://books.google.co.za/books?id=L6xd0nx5KbwC>.
14. Zhang X., Mi C. Vehicle Power Management: Modeling, Control and Optimization // Springer, 2011. Vehicle Power Management:

Modeling, Control and Optimization January. 2011. P. 361. DOI: 10.1007/978-0-85729-736-5.

15. Springer, 2011. Vehicle Power Management: Modeling, Control and Optimization January. 2011. P. 361. DOI: 10.1007/978-0-85729-736-5.

16. Wong J. Y. Theory of Ground Vehicles Theory of ground vehicles. 3rd ed. 2001. P. 629. https://archive.org/details/theoryofgroundve0000wong_3r ded.

17. Канзычаков С. В., Азев В. А., Хажиев В. А. [и др.] Методический подход к повышению эффективности использования ресурса двигателя внутреннего сгорания Cummins QSK-60 автосамосвалов БелАЗ-75306 на примере разреза «Черногорский» // Уголь. 2024. № 11. С. 87–93. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11-87-93.

18. Шешко О. Е. Сравнительная оценка природоёмкости карьерных автосамосвалов и дизель-троллейбозов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 6. С. 119–125.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-119-125.

19. Дифференцированные нормы расхода горюче-смазочных материалов для большегрузных автосамосвалов БелАЗ-540А, БелАЗ-548А, КрАЗ-256Б. М. : МИМ СССР ИГД.

20. Потапов М. Г. Карьерный транспорт. М. : Недра, 1985. 239 с.

21. Вашлаев И. И., Селиванов А. В. Определение горизонтального эквивалента автомобильной трассы в карьере по энергетическому критерию. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2003. № 8. С. 175–177.

22. Вашлаев И. И. Михайлов А. Г., Зуев А. Е. Оптимизация грузопотоков горной массы при всеерной обработке месторождения // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 4. С. 598–617. DOI: 10.17816/transsyst635921.

23. Казарез А. Н., Кулешов А. А. Эксплуатация карьерных автосамосвалов с электромеханической трансмиссией. М. : Недра, 1988. 264 с.

© 2025 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:

Вашлаев Иван Иванович, научный сотрудник, Институт химии и химической технологии – Обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр» СО РАН (660036, Россия, Красноярск, ул. Академгородок, 50, стр. 24), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ORCID: 0000-0001-7174-040X; Scopus Author ID: 6508270604, e-mail: vash49@gmail.com.

Михайлов Александр Геннадьевич, зав. лабораторией, Институт химии и химической технологии – Обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр» СО РАН (660036, Россия, Красноярск, ул. Академгородок, 50, стр. 24), доктор технических наук, главный научный сотрудник, ORCID: 0000-0001-5537-7479; Scopus Author ID: 8838711200 e-mail: alemikhal@gmail.com.

Демченко Игорь Иванович, Сибирский федеральный университет (660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, 79), доктор технических наук, профессор, <https://ORCID.org/0009-0009-5103-4773> e-mail: demtchenkoi@yandex.ru

Игнатова Ольга Сергеевна, доцент, Сибирский федеральный университет, (660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, 79), кандидат технических наук, <https://ORCID.org/0009-0002-2870-3966>, e-mail: ignatova.ol@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Вашлаев Иван Иванович – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, анализ данных, подведение итогов, обзор актуальной литературы, написание текста.

Михайлов Александр Геннадьевич – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, анализ данных, подведение итогов.

Демченко Игорь Иванович – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, анализ данных, подведение итогов, написание текста.

Игнатова Ольга Сергеевна – концептуализация исследования, анализ данных, подведение итогов, обзор актуальной литературы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

METHODOLOGY FOR CALCULATING FUEL CONSUMPTION OF QUARRY DUMP TRUCKS BASED ON REDUCING MINING FACTORS TO A SINGLE INDICATOR

Ivan I. Vashlaev^{1,2*}, Alexander G. Mikhailov^{1,2},
Igor I. Demchenko², Olga S. Ignatova²

¹ Institute of Chemistry and Chemical Technology - Separate Division of the Federal State Budgetary Scientific Institution of the Federal Research Center "Krasnoyarsk Scientific Center" SB RAS

² Sibir Federal University

* for correspondence: vash49@gmail.com



Article info

Received:

28 March 2025

Accepted for publication:

22 September 2025

Accepted:

30 September 2025

Published:

23 October 2025

Keywords: normalization of fuel consumption, quarry dump trucks, energy criterion, transport work.

Abstract.

Quarry dump trucks are a key element of the transport system of mining enterprises. Their effectiveness directly affects the cost of mining. One of the most important indicators of operational efficiency is fuel consumption, which reflects the cost of energy per unit of work performed. The energy criterion allows you to take into account not only the volume of fuel consumed, but also the energy losses associated with operating conditions, which makes the calculations more accurate and adaptive. The purpose of this work is to develop a reliable and universal method for determining fuel consumption by heavy-duty dump trucks. As a research method, an analytical method was used: physical laws. Based on reduction of mining and technical parameters of rock mass transportation to a single indicator, which is the route transportation distance reduced to a horizontal equivalent, a method was developed to determine fuel consumption by quarry dump trucks according to the energy criterion (transport work). The given transportation distance takes into account the following parameters: the quality of the roadway, the length and slope of each section of the route, the coefficients of use of the carrying capacity and containers of the dump truck, the efficiency of the engine and transmission. The developed methodology increases the reliability of calculating fuel consumption and can be integrated into an automated quarry control system and used to solve various tasks: rationing fuel consumption for any type of dump trucks, planning mining operations, determining the quality of roads during the shift, etc.

For citation: Vashlaev I.I., Mikhailov A.G., Demchenko I.I., Ignatova O.S. Methodology for calculating fuel consumption of quarry dump trucks based on reducing mining factors to a single indicator. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 5(171):163-171. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-163-171, EDN: QPKZXB

REFERENCES

1. Razvitie idei chlen-korr. RAN V. L. Yakovleva po uchetu vliyaniya gornotekhnicheskikh uslovii ekspluatatsii na pokazateli kar'emogo avtotransporta. *Problemy nedropol'zovaniya*. 2014; 3:136–144.
2. Arefev S.A. Otsenka i obosnovanie ratsional'nykh dorozhnykh uslovii ekspluatatsii kar'emykh avtosamosvalov bol'shoi gruzopod'emnosti / dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / Spetsial'nost': 25.00.22 – «Geotekhnologiya» (podzemnaya, otkrytaya i stroitel'naya)». Ekaterinburg, 2015.
3. Lel' Yu.I., Arefev S.A., Glebov A.V., Il'bul'din D.Kh. K voprosu otsenki kachestva kar'emykh avtodorog. *Izvestiya UGGU*. 2016; 3(43):70–73. DOI: 10.21440/2307-2091-2016-3-70-73.
4. Zhuravlev A.G., Isakov M.V. Eksperimental'nye issledovaniya raboty kar'emykh avtosamosvalov v usloviyakh ekspluatatsii. *Gomyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2020; 3–1:530–542. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-530-542.
5. Zhuravlev A.G. Voprosy optimizatsii parametrov transportnykh sistem kar'erov. *Gomyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2020; 3–1:583–601. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-583-601.
6. Aksenov V.V., Pashkov D.A., Dubinkin S.D. Metodiki rascheta raskhoda topliva kar'emykh samosvalov. *Ugol'*. 2024;(11S):102–107. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11S-102-107.
7. Dubinkin D.M., Golofastova N.N. Increasing technological sovereignty in dump trucks production facing economic sanctions. *E3S Web of Conferences*. 2024;(549):01008. DOI: 10.1051/e3sconf/202454901008.
8. Analiz faktorov vliyayushchikh na povyshenniy raskhod topliva kar'emykh avtosamosvalov marki belaz na ooo «Vostochno-Beiskii razrez». *Resursosberegayushchie tekhnologii v kontrole, upravlenii kachestvom i bezopasnosti. Sbornik nauchnykh trudov XI Mezhdunarodnoi konferentsii shkol'nikov, studentov, aspirantov, molodykh uchenykh*. Tomsk, 2023.
9. Gartman A.A., Andreev Yu.G., Gorbunov A.Yu., Zakharov S.I. Metodika statisticheskogo analiza udel'nogo raskhoda dizel'nogo topliva v protsesse transportirovaniya gomoi massy avtosamosvalami na predpriyatiyakh otkrytogo sposoba dobychi uglya. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2022; 5(153):72–80. DOI: 10.26730/1999-4125-2022-5-72-80.
10. Lel' Yu.I., Zyryanov I.V., Il'bul'din D.Kh. Metodika normirovaniya raskhoda topliva avtosamosvalami v glubokikh kar'erakh. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2017; 4(48):66–71.
11. Lel' Yu. I., Salakhiev R. G., Arefev S. A., Sandrigailo I. N. Sovershenstvovanie normirovaniya

raskhoda topliva kar'emymi avtosamosvalami na osnove gorizontaľnykh ekvivalentov vertikal'nogo peremeshcheniya gornoi massy. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal. 2014; 2:107–115.

12. Vishnyakov G.Yu., Botyan E.Yu., Rozov R.A., Pushkarev A.E. Utochnenie metodiki normirovaniya raskhoda topliva kar'emnykh avtosamosvalov v slozhnykh gomotekhnicheskikh usloviyakh. Gornoe oborudovanie i ehlektromekhanika. 2022; 4 (162):12–19. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-4-12-19.

13. Gillespie T.D. Fundamentals of Vehicle Dynamics Society of Automotive Engineers, 1992. P. 495. <https://books.google.co.za/books?id=L6xd0nx5KbwC>.

14. Zhang X., Mi C. Vehicle Power Management: Modeling, Control and Optimization. Springer. 2011. P. 361. DOI: 10.1007/978-0-85729-736-5.

15. Springer, 2011. Vehicle Power Management: Modeling, Control and Optimization January. 2011. P. 361. DOI: 10.1007/978-0-85729-736-5.

16. Wong J.Y. Theory of Ground Vehicles Theory of ground vehicles. 3rd ed. 2001. P. 629. https://archive.org/details/theoryofgroundve0000wong_3rde.d.

17. Kanzychakov S.V., Azev V.A., Khazhiev V.A. i dr. Metodicheskii podkhod k povysheniyu effektivnosti ispol'zovaniya resursa dvigatelya vnutrennego sgoraniya

Cummins QSK-60 avtosamosvalov BelAZ-75306 na primere razreza «Chernogorskii». Ugol'. 2024;(11):87–93. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11-87-93.

18. Sheshko O.E. Sravnitel'naya otsenka prirodemkosti kar'emnykh avtosamosvalov i dizel'-trolleivozov. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'. 2018; 6:119–125. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-119-125.

19. Differentsirovannye normy raskhoda goryucheshmazochnykh materialov dlya bol'shegruznykh avtosamosvalov BelAZ-540A, BelAZ-548A, KrAZ-256B. M.: MIM SSSR IGD.

20. Potapov M. G. Kar'emyi transport. M.: Nedra; 1985. 239 s.

21. Vashlaev I.I., Selivanov A.V. Opredelenie gorizontaľnogo ekvivalenta avtomobil'noi trassy v kar'ere po energeticheskomu kriteriyu. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'. 2003; 8:175–177.

22. Vashlaev I.I. Mikhailov A.G., Zuev A.E. Optimizatsiya gruzopotokov gornoi massy pri veemoi otrabotke mestorozhdeniya. Innovatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii. 2024; 10(4):598–617. DOI: 10.17816/transsy635921.

23. Kazarez A.N., Kuleshov A.A. Ehkspluatatsiya kar'emnykh avtosamosvalov s ehlektromekhanicheskoi transmissiei. M.: Nedra; 1988. 264 s.

© 2025 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:

Ivan I. Vashlaev – Researcher, Institute of Chemistry and Chemical Technology - Separate Division of the Federal State Budgetary Scientific Institution of the Federal Research Center "Krasnoyarsk Scientific Center" SB RAS (660036, Russia, Krasnoyarsk, Akademgorodok St., 50, p. 24), Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, ORCID: 0000-0001-7174-040X; Scopus Author ID: 6508270604, e-mail: vash49@gmail.com.

Alexander G. Mikhailov – Head of Laboratory, Institute of Chemistry and Chemical Technology - Separate Division of the Federal State Budgetary Scientific Institution of the Federal Research Center "Krasnoyarsk Scientific Center" SB RAS (660036, Russia, Krasnoyarsk, Akademgorodok St., 50, p. 24), Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, ORCID: 0000-0001-5537-7479; Scopus Author ID: 8838711200, e-mail: alemikhal@gmail.com.

Igor I. Demchenko – Siberian Federal University (660041, Russia, Krasnoyarsk, pr. Svobodny, 79), Doctor of Technical Sciences, Professor, <https://ORCID.org/0009-0009-5103-4773> <https://orcid.org/0009-0009-5103-4773> e-mail: demtchenkoi@yandex.ru

Olga S. Ignatova – Associate Professor, Siberian Federal University, (660041, Russia, Krasnoyarsk, pr. Svobodny, 79), candidate of technical sciences, <https://ORCID.org/0009-0002-2870-3966>, e-mail: ignatova.ol@mail.ru

Contribution of the authors:

Ivan I. Vashlaev – setting the research task, conceptualizing the study, analyzing the data, summing up the results, reviewing the current literature, writing the text.

Alexander G. Mikhailov – setting a research task, conceptualizing research, analyzing data, summing up the results.

Igor I. Demchenko – setting a research task, conceptualizing research, analyzing data, summing up, writing a text.

Olga S. Ignatova – conceptualization of research, data analysis, summing up, review of current literature, writing text.

All authors have read and approved the final manuscript.

