

УДК 622.684

Журавлев Артем Геннадиевич

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией транспортных систем
карьеров и геотехники,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: juravlev@igduran.ru

Кардашин Егор Дмитриевич

лаборант,
лаборатория транспортных систем карьеров
и геотехники,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: kardashin@igduran.ru

**КОНЦЕПЦИЯ КАРЬЕРНОЙ
ВЫЕМОЧНО-ТРАНСПОРТНОЙ
МАШИНЫ****Аннотация:*

Представлены результаты проработки компоновки и технических параметров инновационного типа машин для открытых горных работ – выемочно-транспортной машины карьерной (ВТМк). Разработаны исходные требования к типоразмерному ряду ВТМк. На основе расчетов и моделирования компоновки определены параметры ВТМк-90 грузоподъемностью 90 т. Для обеспечения приемлемого коэффициента тары, развесовки массы по осям, обеспечивающей достаточные тягово-динамические свойства, и технологичности машины рационально использовать компоновку с рабочим оборудованием по типу фронтального погрузчика и распределенную электроаккумуляторную энергосиловую установку. Рациональная вместимость ковша для типоразмерного ряда ВТМк грузоподъемностью от 90 до 180 т обеспечивает полную загрузку грузовой платформы за 4,5 – 6 циклов. ВТМк могут найти применение по показателям меньшей в 1,5 – 4 раза металлоемкости и до 2,5 раз капиталоемкости при ограниченной годовой производственной мощности и дальности транспортирования. Дополнительных преимуществ такой технологии можно достичь за счет изменения технологии и организации выемочно-погрузочных работ и рабочих площадок, а также оптимизации энергохозяйства в зоне применения ВТМк. Показано, что ВТМк-90 обладает преимуществом в металлоемкости относительно ЭАК (ЭКГ-12 + БелАЗ-75583) в 2 – 4 раза и при ограниченной производственной мощности, а также дальности транспортирования характеризуется экономией капитальных затрат до 2 раз.

Ключевые слова: карьерный транспорт, выемочно-транспортная машина, фронтальный погрузчик, компоновка инновационной машины.

DOI: 10.25635/2313-1586.2022.04.094

Zhuravlev Artem G.

Candidate of Technical Sciences,
Head of the Laboratory of transport systems
of open-pit mines and geotechnics,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.,
e-mail: juravlev@igduran.ru

Kardashin Egor D.

Laboratory assistant,
Laboratory of transport systems
of open-pit mines and geotechnics,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: kardashin@igduran.ru

**CONCEPT OF A QUARRY EXCAVATION
AND TRANSPORT MACHINE***Abstract:*

The paper presents study results of the layout and technical parameters of an innovative type of machines for open-pit mining – a quarry excavation and transport machine (qETM). It shows the initial requirements for the standard-sized range of qETM. Based on calculations and modeling of the layout, we determined the parameters of the qETM-90 with a load capacity of 90 tons here. In order to ensure an acceptable payload ratio, weight distribution along the axes that provides sufficient traction and dynamic properties, and the technological efficiency of the machine, it is rational to use a combination with working equipment such as a front loader and a distributed electric accumulator power equipment. The rational bucket capacity for a standard-sized range of the qETM with a lifting capacity from 90 to 180 tons ensures full loading of the cargo platform in 4.5 – 6 cycles. The qETM can find application in terms of less than 1.5 – 4 times metal consumption and up to 2.5 times capital intensity with limited annual production capacity and transportation range. Additional advantages of such technology can be achieved by changing the technology and organization of excavation and loading operations and work sites, as well as the optimization of the energy sector in the area of application of qETMs. The study shows that qETM-90 has an advantage in metal consumption relative to EAC (EMT-12 + BelAZ-75583) by 2 – 4 times also with limited production capacity and transportation range, and savings in capital costs characterize it up to 2 times.

Key words: quarry transport, excavation and transport machine, front loader, innovative machine assembly.

* Исследования выполнены в рамках Госзадания № 075-00412-22 ПР, тема «Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем (FUWE-2022-0005)», пер. №1021062010531-8-1.5.1

Введение

Современные исследования в области технологии открытых горных работ подразумевают рассмотрение жизненного цикла карьера как последовательность переходных процессов [1, 2]. За счет всесторонней оптимизации горнотехнической системы при осуществлении переходных процессов обеспечивается достижение высоких технико-экономических показателей. Одним из наиболее затратных элементов горнотехнической системы является карьерный транспорт. В связи с этим актуальной является проблема снижения себестоимости транспортирования горной массы при разработке месторождений полезных ископаемых для повышения полноты извлечения руды открытым способом за счет достижения больших глубин. Одним из направлений ее решения является применение более дешевых видов транспорта [3], обеспечивающих снижение себестоимости и, как следствие, граничного коэффициента вскрыши. Из известных промышленно применимых видов транспорта таковыми являются конвейерный транспорт, карьерные канатные подъемники (в т.ч. грузовая подвесная канатная дорога), конвейерные поезда [4 – 7]. Однако особенность их применения состоит в стационарности, а следовательно, необходимости применения сборочного транспорта. При этом для максимального экономического эффекта перегрузочный пункт со сборочного на магистральный транспорт должен подвигаться от одного до нескольких раз в год, обеспечивая минимальное расстояние доставки сборочным транспортом в пределах 0,5 – 2 км, максимум 3 км.

В этих условиях с учетом высокой динамики подвигания горных работ, стесненности рабочей зоны содержание экскаваторно-автомобильного комплекса может не отвечать требованиям минимальной себестоимости. Вариант технологического решения – использование выемочно-доставочных машин, осуществляющих выемку из забоя и доставку до перегрузочного пункта. Технологические и технико-экономические расчеты [8, 9] показали, что применение современных мощных погрузчиков может обеспечить технико-экономическое преимущество такой схемы, хотя и имеет ряд недостатков.

В качестве варианта альтернативного решения разработана концепция специальной карьерной выемочно-транспортной машины в карьерном исполнении – ВТМк, совмещающей функции фронтального погрузчика и карьерного автосамосвала (рис. 1).

С учетом рациональных технико-экономических показателей на основании расчетов [8, 9] и вышеописанного порядка применения ВТМк сформулированы технические требования к ней (табл. 1).

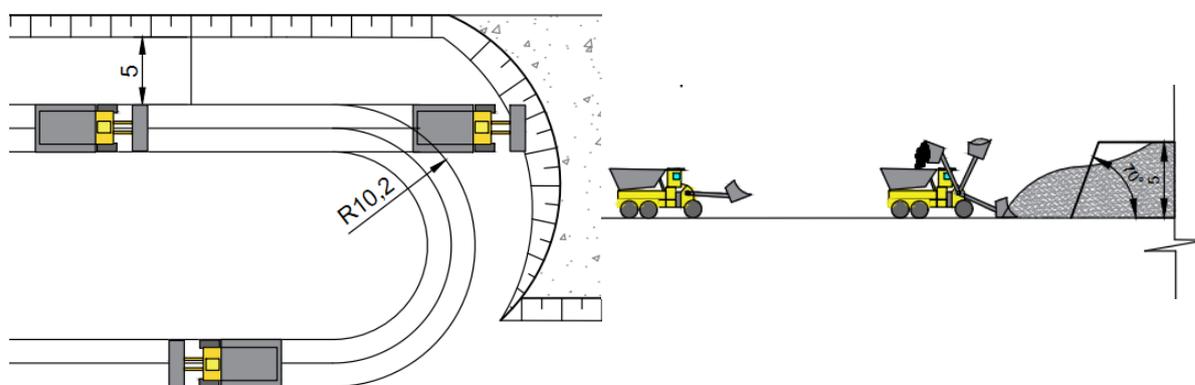


Рис. 1. Схемы использования ВТМк для уступа высотой 5 м

Таблица 1

Технологические и технические требования к ВТМк

<i>Технологические требования</i>		
Назначение	Для выемки и последующей транспортировки горной массы в место разгрузки, для замены экскаваторно-автомобильного комплекса.	
Условия применения	Погрузка скальных и полускальных пород в собственный кузов при помощи ковша и их транспортирование по карьерным автодорогам до перегрузочного пункта	
Климатическое исполнение	По ГОСТ 15150-69: Стандартное – У-1 ($t = -45 \dots +40$ °С) Арктическое – ХЛ-1 ($t = -60 \dots +40$ °С)	
Забой	Высота уступа, как правило, 5 – 10 м. С учетом деления на подступы и после взрывной подготовки блока высота развала 5 – 9 м	
Рабочая скорость на уклоне 8 % в груженом состоянии	Не менее 12 км/ч	
Грузоподъемность (размерный ряд)	90 – 180 т	
Тип выемочно-погрузочного рабочего оборудования	По типу фронтального погрузчика	
Вместимость ковша ($V_{г.п.}$ – вместимость груз. платформы)	$(0,2 \dots 0,25) \cdot V_{г.п.}$	
Усилие на ковше (не менее), т: напорное / подъема (V_k – вместимость ковша)	$72,727 \cdot V_k - 86,364 /$ $58,182 \cdot V_k - 19,091$	
<i>Конструктивные требования</i>		
Максимальная техническая скорость, км/ч	Не менее 40	
Коэффициент тары	Не более 1,15	
Колесная формула	4x4, 6x4, 6x6 (допускается 4x2)	
Ограничение габаритов: (БС – базовый самосвал)	- длина - ширина - высота	$\leq 1,5$ габарита БС не более габарита БС не более габарита БС
Радиус поворота по внешнему колесу	Не более радиуса БС	
<i>Характеристика экскавируемых и транспортируемых горных пород</i>		
Гранулометрический состав – крупнодробленая горная порода после взрывания		
Диапазон 1 (тяжелые крепкие железные руды (кварциты))	+1200 мм	1,6 %
	+1000 – 1200 мм	0,9 %
	+700 – 1000 мм	1,0 %
	+500 – 700 мм	3,7 %
	+200 – 500 мм	23,8 %
	+100 – 200 мм	20,6 %
	+50 – 100 мм	19,6 %
Диапазон 2 (медные руды)	0 – 50 мм	28,8 %
	< 20 см	15,01 %
	20 – 45 см	27,67 %
	45 – 60 см	21,9 %
	60 – 80 см	16,34 %
	80 – 100 см	9,26 %
	100 – 120 см	9,24 %
>120 см	0,57 %	
Насыпная плотность, т/м ³	До 2,0 – 2,6	
Истинная плотность (в целике), т/м	До 3,0 – 3,8	
Прочность при одноосном сжатии, МПа	150 – 250	
Крепость по шкале проф. Протодряконова	10 – 18	
Абразивность (индекс абразивности по шкале Бонда A_i)	0,3 – 0,6	
Угол естественного откоса при грансоставе, соответствующем первичной взрывной подготовке	36 – 50°	

Задачи данного исследования:

- разработка компоновки ВТМк на базе известных серийных выемочно-погрузочных и карьерных автосамосвалов;
- определение рациональных тягово-динамических характеристик ВТМк и типа энергосиловой установки;
- определение технологических параметров ВТМк рассматриваемого типоразмера.

Методы исследований

Компоновка и проверка кинематики машины выполнялись путем трехмерного компьютерного моделирования в ПО «КОМПАС 3D».

Расчеты тягово-динамических характеристик и мощности энергосиловой установки выполнялись по стандартному тягово-динамическому расчету как для транспортной машины [10, 11].

Энергоемкость накопителя энергии определена на основе имитационного компьютерного моделирования движения транспортной машины по трассе карьерных автодорог на модели «Самосвал» [12], разработанной в ИГД УрО РАН.

Результаты

В качестве рассматриваемого типоразмера выбрана выемочно-транспортная машина грузоподъемностью 90 т. Это объясняется тем, что ВТМк за счет особенности конструкции (увеличенный коэффициент тары, повышенные эксплуатационные расходы, стоимость и т.д.) могут эффективно использоваться при относительно небольшом расстоянии транспортирования (до 2 км) и объеме перевозок (до 10 – 15 млн т/год). Таким требованиям отвечает сборочный транспорт, применяемый в карьерах значительной глубины, но с ограниченными размерами в плане. Примерами таких карьеров могут служить алмазородные, меднородные, золоторудные глубиной 250 – 700 м.

За основу был принят карьерный автосамосвал БелАЗ 7558 с электромеханической трансмиссией. С учетом того, что наибольшие затраты на ВТМк формируются при транспортировании горной массы, был выбран за основу именно автосамосвал. На основании анализа было принято решение использовать рабочее оборудование фронтального погрузчика по следующим причинам:

- удобство загрузки грузовой платформы за счет прямого движения ковша;
- минимальное смещение центра массы;
- относительно небольшие напорные усилия в сравнении с вариантом прямой одноклоковой загрузки грузовой платформы;
- возможность обеспечить большой ход стрелы в положении копания и загрузки платформы;
- большая схожесть по кинематике и динамике фронтального погрузчика и транспортной машины.

В результате рассмотрения разных вариантов компоновок была выбрана следующая схема ВТМк (рис. 2). Стрела с ковшом устанавливается в передней части рамы автосамосвала. При этом дизельная силовая установка и кабина исключаются по причине отсутствия пространства для их размещения. Это возможно благодаря применению дистанционного или роботизированного управления; таким образом, присутствие оператора в машине не требуется. Грузовая платформа базового автосамосвала остается неизменной, однако отсутствует защитный козырек.

Для реализации максимального усилия напора при зачерпывании первых ковшей, когда ВТМк порожняя, требуется использовать полноприводную схему: задний привод берется от базовой машины, а передний реализуется за счет индивидуальных мотор-колес. При этом передние колеса остаются управляемыми (поворотными).

Для установки рабочего оборудования передняя часть рамы усиливается, на ней размещаются опорный шарнир стрелы и подъемные гидроцилиндры. Форма стрелы и расположение гидроцилиндров выбраны таким образом, чтобы обеспечить значительный диапазон ее хода: от зарезки ковша на уровне стояния до положения опрокидывания ковша над грузовой платформой. Механизм опрокидывания ковша используется стандартный с одним гидроцилиндром и системой рычагов, образующих со стрелой и рамой шасси параллелограммное устройство, что обеспечивает плоскопараллельный перенос ковша при движении стрелы и удобство управления им.

а) Загрузка ковшем



б) Транспортирование



в) Выгрузка



г) Основные элементы (ВТМк в положении зачистки площадки)

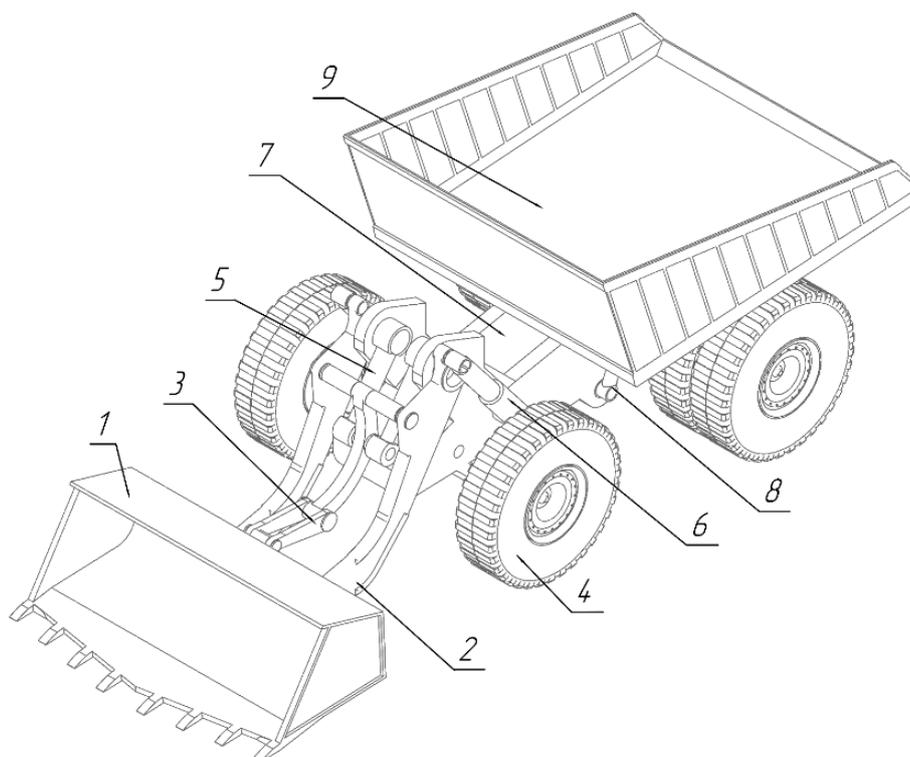


Рис. 2. Компоновка ВТМк-90

(элементы энергосиловой установки, расположенные между колесами передней и задней осей условно не показаны):

- 1 – ковш; 2 – стрела; 3 – рычаги поворота ковша; 4 – колеса и шины 27.00R49;
5 – гидроцилиндры наклона ковша; 6 – гидроцилиндры подъема ковша; 7 – рама шасси;
8 – гидроцилиндры подъема кузова; 9 – грузовая платформа

Как указано выше, из компоновки исключен дизель-генератор. Учитывая, что свободное пространство в рассматриваемой компоновке ВТМк имеет разрозненное размещение и сложную конфигурацию (между колесами передней и задней оси, между лонжеронами рамы), решено использовать в качестве источника энергии аккумуляторные батареи. Они могут размещаться секциями в разрозненных местах и соединяться в общую силовую схему, обеспечивая высокую суммарную мощность энергосиловой установки.

Элементы электропривода автоматизированной системы управления (в том числе контроллер роботизированного управления) целесообразно разместить справа между колесами передней и задней осей. Это обеспечит их защиту от возможного повреждения падающими сверху камнями. По аналогичной причине размещение гидроагрегатов (в том числе маслобак и главный насос) предполагается слева между колесами передней и задней осей. Также часть секций аккумуляторных батарей может размещаться между лонжеронами рамы и под грузовой платформой. Отдельные элементы и блоки систем самосвала могут размещаться между лонжеронами рамы перед грузовой платформой и должны быть защищены прочным металлическим укрытием.

Габаритные размеры ВТМк (рис. 3) показывают, что ширина и высота не превышают соответствующие размеры базового самосвала БелАЗ-7558, а длина в транспортном положении всего в 1,12 раза больше.

Таким образом, технические характеристики ВТМк-90 (табл. 2) соответствуют исходным требованиям (см. табл. 1), в том числе расчетное усилие напора, создаваемое тягой колес при формуле 4х4, обеспечивает удельное усилие копания (резания) на кромке ковша $80 - 187$ кН/м, а коэффициент тары равен 1,1.

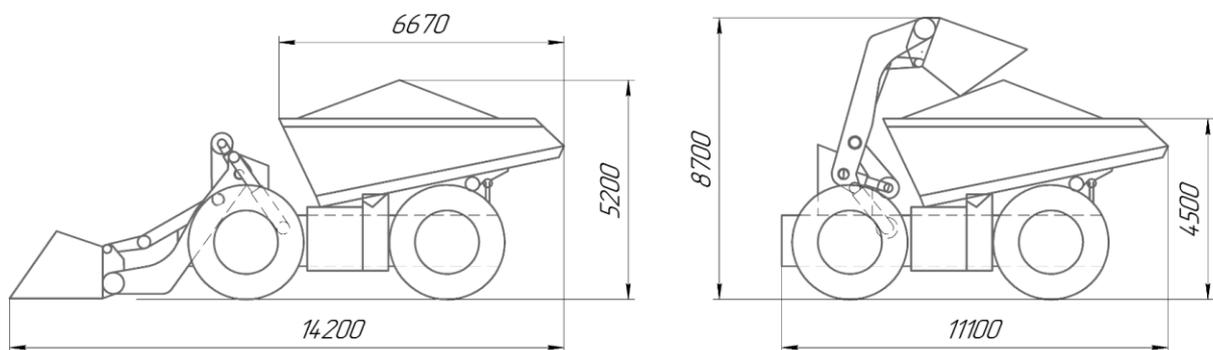


Рис. 3. Основные геометрические параметры ВТМк-90 (между колесами указано пространство для размещения элементов энергосиловой установки)

При работе со скальными породами их эффективная экскавация оборудованием фронтального погрузчика осложняется следующим:

- высокое требуемое усилие внедрения с учетом неравномерного гранулометрического состава при средней крупности $250 - 300$ мм с наличием большого количества крупных кусков размером $400 - 800$ мм и отдельных кусков до 1500 мм;
- необходимость отсортировать негабаритные куски;
- при неудовлетворительных погодных условиях (распутица, гололед) может не обеспечиваться высокое сцепление колес ВТМк с поверхностью площадки забоя для обеспечения значительного напорного усилия на ковше.

Решение указанных проблем достигается применением ковша с активными зубьями [13 – 15], которые, создавая вибрационное возвратно-поступательное движение клиньев, обеспечат более легкое внедрение ковша в развал горной массы. Учитывая принятый в рассматриваемой компоновке ВТМк-90 электрический тип энергосиловой установки, целесообразно использовать электромеханический тип привода активных зубьев (например, магнестрикционный). В целом же могут использоваться другие виды: пневматический, гидравлический, для которых гидростанцию (компрессор) можно расположить во фронтальной части рамы ВТМк.

Другим решением для обеспечения эффективного набора ковша является уменьшение его размеров, что обеспечит повышение удельного усилия резания на кромке за счет снижения его ширины. Негативным следствием такой схемы будет увеличение кратности количества выемочно-погрузочных циклов для наполнения грузовой платформы.

Таблица 2

Расчетные технические характеристики ВТМк-90

Параметр	Значение
Вместимость ковша, м ³	10
Грузоподъемность ковша, т	20
Усилие напора (в числителе) и подъема (в знаменателе) на кромке ковша в опущенном положении, кН	<u>Порожний 491 (Груженный 932)</u> 400
Вместимость грузовой платформы, м ³	43-47 («с шапкой»)
Грузоподъемность грузовой платформы, т	$m_r = 90$
Снаряженная масса, т	$m_{сн} = 100$
Габаритные размеры, мм (ДхШхВ): - с опущенным ковшом - с разгружаемым ковшом - в транспортном положении	14 200 х 5 700 х 4 500 11 100 х 5 700 х 8 700 11 800 х 5 700 х 4 500
Мощность энергосиловой установки, кВт	$N_{эсу} = 800 - 1000$
Максимальная скорость, км/ч	60
Энергосиловая установка	Электромеханическая трансмиссия. Источник энергии – аккумуляторная батарея: из имеющихся: мощностью 100 – 160 кВт/т и 300 – 400 кВт/м ³ энергоемкостью 80 – 120 МДж/т и 200 – 300 МДж/м ³
	перспективная: мощностью 200 кВт/т и 500 кВт/м ³ энергоемкостью 500 МДж/т и 600 – 1000 МДж/м ³
Система управления	Роботизированный комплекс. Кабина водителя не предусмотрена
Прототипы	Карьерный автосамосвал БелАЗ-7558: $N_{эсу} = 783$ кВт; $m_{сн} = 80,15$ т; $m_r = 90$ т Погрузчик БелАЗ-7825: $N_{эсу} = 783$ кВт; $m_{сн} = 110$ т

С учетом вышесказанного определена максимальная вместимость ковша по условию обеспечения достаточного усилия внедрения в развал горной массы (силы напора, реализуемой тягой на колесах). Соотношения для расчета приняты по [16]. На рис. 4 приведены результаты как для полноприводной версии ВТМк, так и для заднеприводной. Стандартные условия соответствуют коэффициенту сцепления 0,5 и развалу хорошо взорванной скальной горной массы, тяжелые условия – коэффициенту сцепления 0,4 и удовлетворительно взорванной горной массы. Заднеприводный вариант рассмотрен для стандартных условий. Установлено, что для погрузки в стандартных условиях кратность вместимостей грузовой платформы и ковша составит 4,5 – 5, для тяжелых условий 6, а для заднеприводной версии 9.

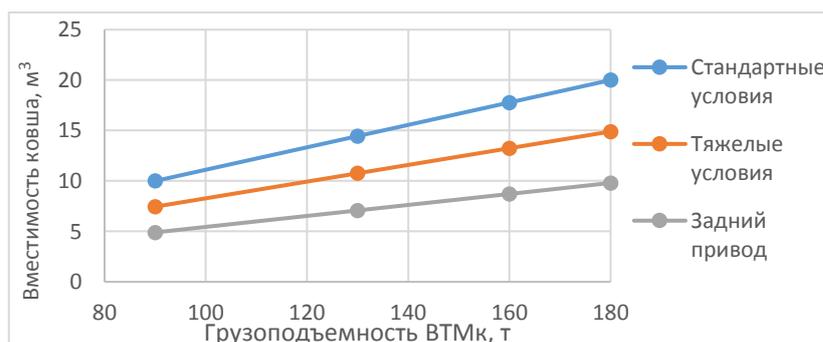
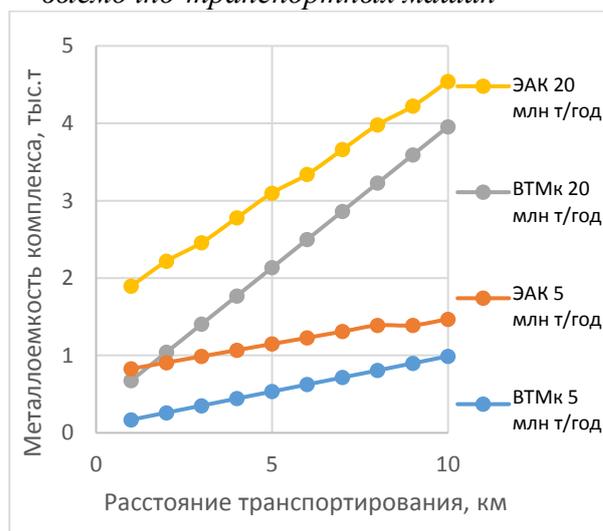


Рис. 4. Зависимость усилий копания ВТМк от грузоподъемности

Несмотря на то что ВТМк обладает большей массой и стоимостью, для ограниченной производственной мощности участка горных работ суммарная металлоемкость и стоимость комплекса может быть меньше, чем в варианте экскаваторно-автомобильного комплекса (ЭАК), что объясняется значительной металлоемкостью и стоимостью экскаватора. Выполненные укрупненные расчеты на примере ЭАК (ЭКГ-12 + БелАЗ-75583) и ВТМк-90 показали (рис. 5), что металлоемкость во всех случаях выше в варианте ЭАК, а капитальные затраты на приобретение комплекса машин для ВТМк меньше до определенного соотношения годовой производительности и дальности транспортирования, причем чем меньше годовая производительность, тем больше экономичные расстояния для них. При этом учитывалось, что производительность погрузки ВТМк в 1,15 раза ниже, чем ЭКГ-12, а стоимость в 1,8 раза выше базового самосвала БелАЗ-75583.

Данные расчеты показали, что при дальности транспортирования ВТМк до 3 км и годовой производительности до 15 млн т/год металлоемкость и стоимость парка ВТМк всегда меньше, чем ЭАК. В связи с этим выполнен расчет показателей парка ВТМк для расширенного диапазона условий: производительность до 20 млн т/год и дальность транспортирования до 10 км. Это позволило определить точки пересечения графиков по показателю стоимости (см. рис. 5б).

а) Металлоемкость комплекса выемочно-транспортных машин



б) Стоимость комплекса выемочно-транспортных машин

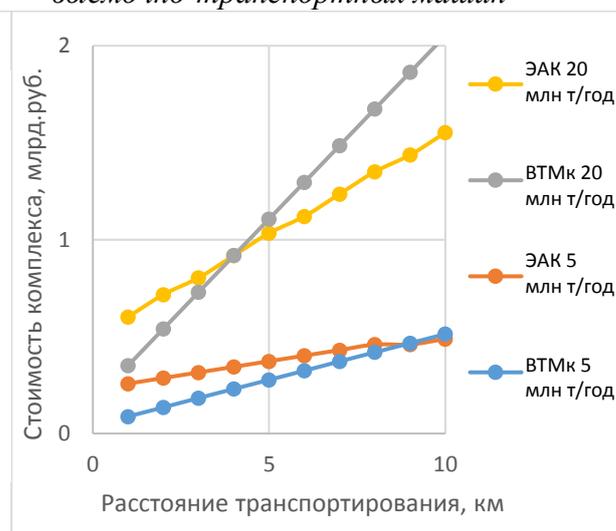


Рис. 5. Соотношение металлоемкости и стоимости комплекса машин по вариантам ЭАК (ЭКГ-12 + БелАЗ-75583) и ВТМк-90

Таким образом, ВТМк могут найти применение по показателям меньшей в 1,5 - 4 раза металлоемкости и до 2,5 раз капиталоемкости при ограниченной годовой производственной мощности и дальности транспортирования. Отметим, что дополнительных преимуществ такой технологии можно достичь за счет изменения технологии и организации выемочно-погрузочных работ и рабочих площадок, а также оптимизации энергохозяйства в зоне применения ВТМк.

Выводы

1. Подтверждена теоретическая возможность достижения сформулированных технических и технологических требований к карьерной выемочно-транспортной машине на примере компоновки ВТМк-90 грузоподъемностью 90 т. Расчетное время транспортного цикла сопоставимо с карьерным автосамосвалом.

2. Требуемое усилие напора для разработки скальных забоев, подготовленных взрывным разрушением, обеспечивается при полноприводной компоновке для варианта

с ковшем вместимостью 0,2 – 0,25 от вместимости грузовой платформы, что соответствует кратности загрузки 4 – 5 ковшей. Для работы в неудовлетворительных условиях (некачественное дробление взрывом, плохие дорожные условия) достаточные усилия реализуются при соотношении ковш/грузовая платформа 0,1 – 0,15, что соответствует кратности загрузки 7 – 10 ковшей. Сохранение высоких технологических показателей по производительности загрузки может быть достигнуто применением зубьев ковша активного действия.

3. Для обеспечения приемлемого коэффициента тары, развесовки массы по осям, обеспечивающей достаточные тягово-динамические свойства, и технологичности машины рационально использовать компоновку с рабочим оборудованием по типу фронтального погрузчика и распределенную электроаккумуляторную энергосиловую установку.

4. Для улучшения предложенных конструктивно-технологических параметров ВТМк, в том числе силы тяги на передних колесах, рационально использовать шарнирно-сочлененную раму с отказом от поворотных управляемых колес.

5. Укрупненные расчеты показали, что комплекс ВТМк-90 обладает преимуществом в металлоемкости относительно ЭАК (ЭКГ-12 + БелАЗ-75583) в 2 – 4 раза и при ограниченной производственной мощности, а также дальности транспортирования характеризуется экономией капитальных затрат до 2 раз. Граница этой экономичной зоны описывается прямой в координатах «годовая производительность (Q) – расстояние транспортирования (L)», проходящей через точки ($Q = 5$ млн т; $L = 9$ км) и ($Q = 20$ млн т; $L = 4$ км).

Список литературы

1. Яковлев В.Л., 2019. *Исследование переходных процессов – новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов*. Екатеринбург: УрО РАН, 284 с.
2. Яковлев В.Л., Корнилков С.В., Соколов И.В., 2018. *Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья*. Под. ред. член-корр. РАН Яковлева В.Л. Екатеринбург: УрО РАН, 360 с. DOI: 10.25635/IM.2018.18.37360
3. Журавлев А.Г., Глебов И.А., Семенкин А.В., Чендырев М.А., 2021. Перспективные технологии транспортирования для глубоких карьеров. *Черная металлургия: бюллетень научно-технической и экономической информации*, № 5, С. 518 – 528.
4. Чендырев М.А., 2019. Комплексная модель для обоснования параметров автомобильного карьерного подъемника. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № S37, С. 282 – 289. DOI 10.25018/0236-1493-2019-11-37-282-289.
5. Пат. 817270 СССР, МПК E21F13/08 B65G17/06 B65G47/34 B65G67/04 E21F13/02. *Конвейерный поезд*. Волотковский В.С., Казаков Л.В.; Заявитель и патентообладатель Институт горного дела Министерства черной металлургии СССР. 2784408/27-03; заявл. 30.03.81; опубл. 30.03.81; Бюл. №12, 2 с.
6. *Рекомендации по выбору технологических схем при применении системы транспорта с конвейерными (тележечными) поездами на открытых горных разработках*. Дополнение к методике оценки технико-экономических показателей системы транспорта с конвейерными (тележечными) поездами для открытых горных разработок. Москва: Институт горного дела им. А.А. Скочинского, 1983. 47 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293731/4293731161.pdf> (дата обращения 3.10.2022)
7. Nel V., Pretorius A., 2013. Rail-veyor. *IBR underground mining conference Phakisa mine*, 51 p.
8. Журавлев А.Г., Черных В.В., 2021. Техничко-экономические расчеты применения погрузчиков в качестве выемочно-транспортного оборудования карьеров. *Проблемы недропользования*, № 1, С. 45 – 56. DOI: 10.25635/2313-1586.2021.01.045

9. Журавлев А.Г., Черных В.В., 2022. Граничные технико-экономические показатели применимости фронтальных погрузчиков при работе в качестве выемочно-транспортных машин. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, Т. 333, № 5, С. 186 – 195. DOI: 10.18799/24131830/2022/5/3500.
10. Баженов Е.Е., 2000. *Теория автомобиля и трактора*. Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 126 с.
11. Хусаинов А.Ш., 2011. *Эксплуатационные свойства автомобиля: учебное пособие для студентов по направлению «Наземные транспортно-технологические комплексы»*. Ульяновск: УлГТУ, 109 с.
12. Журавлев А.Г., 2011. Компьютерное моделирование режимов движения карьерных автосамосвалов с КЭУ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № ОВ 11, С. 371 – 382.
13. Городилов Л.В., Коровин А.Н., 2021. Анализ конструкций ковшей активного действия карьерных и строительных экскаваторов. *Интерэкспо Гео-Сибирь*, № 3, С. 171 – 179.
14. Муравский А.К., 2012. *Обоснование параметров экскаваторного ковша с повышенными силовыми возможностями: автореф. дис. ... канд. техн. наук*. ФГБОУ ВПО УГТУ и ФГБОУ ВПО ПНИПУ. Екатеринбург, 18 с.
15. Либерман Я.Л., Горбунова Л.Н., Летнев К.Ю., 2021. Прогрессивные конструкции ковшей активного действия для землеройных машин. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, № 1, С. 87 – 96.
16. Лукашук О.А., Комиссаров А.П., Летнев К.Ю., 2018. *Машины для разработки грунтов. Проектирование и расчет: учебное пособие*. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 128 с.

References

1. Yakovlev V.L., 2019. Issledovanie perekhodnykh protsessov – novoe napravlenie v razvitiy metodologii kompleksnogo osvoeniya georesurov [Study of transients as a new direction in the improvement of the methodology of integrated development of geo-resources]. Ekaterinburg: UrO RAN, 284 p.
2. Yakovlev V.L., Kornilkov S.V., Sokolov I.V., 2018. Innovatsionnyi bazis strategii kompleksnogo osvoeniya resurov mineral'nogo syr'ya [Innovative basis for the strategy of integrated development of mineral resources]. Pod. red. chlen-korr. RAN Yakovleva V.L. Ekaterinburg: UrO RAN, 360 p. DOI: 10.25635/IM.2018.18.37360
3. Zhuravlev A.G., Glebov I.A., Semekin A.V., Chendyrev M.A., 2021. Perspektivnye tekhnologii transportirovaniya dlya glubokikh kar'erov [Promising transportation technologies for deep quarries]. *Chernaya metallurgiya: byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii*, № 5, P. 518 – 528.
4. Chendyrev M.A., 2019. Kompleksnaya model' dlya obosnovaniya parametrov avtomobil'nogo kar'ernogo pod"emnika [A complex model for substantiating the parameters of an automobile quarry lift]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № S37, P. 282 - 289. DOI 10.25018/0236-1493-2019-11-37-282-289.
5. Pat. 817270 SSSR, MPK E21F13/08 B65G17/06 B65G47/34 B65G67/04 E21F13/02. Konveiernyi poezd [Pat. 817270 USSR, MPK E21F13/08 B65G17/06 B65G47/34 B65G67/04 E21F13/02. Conveyor train]. Volotkovskii V.S., Kazakov L.V.; Zayavitel' i patento-obladatel' Institut gornogo dela Ministerstva chernoi metallurgii SSSR. 2784408/27-03; zayavl. 30.03.81; opubl. 30.03.81; Byul. №12, 2 p.
6. Rekomendatsii po vyboru tekhnologicheskikh skhem pri primeneniі sistemy transporta s konveiernymi (telezhechnymi) poezdami na otkrytykh gornykh razrabotkakh [Recommendations on the choice of technological schemes when using a transport system with conveyor (trolley) trains on open pit mines]. *Dopolnenie k metodike otsenki tekhniko-ekonomicheskikh pokazatelei sistemy transporta s konveiernymi (telezhechnymi) poezdami*

dlya otkrytykh gornyykh razrabotok. Moscow: Institut gornogo dela im. A.A. Skochinskogo, 1983. 47 p. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293731/4293731161.pdf> (data obrashcheniya 3.10.2022)

7. Nel B., Pretorius A., 2013. Rail-veyor. IBR underground mining conference Phakisa mine, 51 p.

8. Zhuravlev A.G., Chernykh V.V., 2021. Tekhniko-ekonomicheskie raschety primeneniya pogruzchikov v kachestve vyemochno-transportnogo oborudovaniya kar'erov [Technical and economic calculations of use of loaders as extracting and transport equipment in quarries]. Problemy nedropol'zovaniya, № 1, S. 45 – 56. DOI: 10.25635/2313-1586.2021.01.045

9. Zhuravlev A.G. Chernykh V.V., 2022. Granichnye tekhniko-ekonomicheskie pokazateli primenimosti frontal'nykh pogruzchikov pri rabote v kachestve vyemochno-transportnykh mashin [Boundary technical and economic indicators of the applicability of front-end loaders when working as extracting and transport machines]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov, Vol. 333, № 5, P. 186 – 195. DOI: 10.18799/24131830/2022/5/3500.

10. Bazhenov E.E., 2000. Teoriya avtomobilya i traktora [Theory of the car and tractor]. Ekaterinburg: UGTU – UPI, 126 p.

11. Khusainov A.Sh., 2011. Ekspluatatsionnye svoystva avtomobilya: uchebnoe posobie dlya studentov po napravleniyu "Nazemnye transportno-tekhnologicheskie komplekсы" [Performance characteristics of the car: a textbook for students in the direction "Ground transport and technological complexes"]. Ul'yanovsk: UIGTU, 109 p.

12. Zhuravlev A.G., 2011. Komp'yuternoe modelirovanie rezhimov dvizheniya kar'ernykh avtosamosvalov s KEU [Computer simulation of movement modes of quarry dump trucks with numerical control]. Gornyy informatsionno-analiticheskii byulleten', № OV 11, P. 371 – 382.

13. Gorodilov L.V., Korovin A.N., 2021. Analiz konstruksii kovshei aktivnogo deystviya kar'ernykh i stroitel'nykh ekskavatorov [Analysis of bucket designs of active action of quarry and construction excavators]. Interekspo Geo-Sibir', № 3, P. 171 – 179.

14. Muravskii A.K., 2012. Obosnovanie parametrov ekskavatornogo kovsha s povyshennymi silovymi vozmozhnostyami [Justification of the parameters of an excavator bucket with increased power capabilities]: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. FGBOU VPO UGGU i FGBOU VPO PNIPU. Ekaterinburg, 18 p.

15. Liberman Ya.L., Gorbunova L.N., Letnev K.Yu., 2021. Progressivnye konstruksii kovshei aktivnogo deystviya dlya zemleroinnykh mashin [Progressive designs of active buckets for earthmoving machines]. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, № 1, P. 87 – 96.

16. Lukashuk O.A., Komissarov A.P., Letnev K.Yu., 2018. Mashiny dlya razrabotki gruntov. Proektirovanie i raschet: uchebnoe posobie [Machines for earthworks. Design and calculation: a textbook]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 128 p.