

УДК 622.684:621.879.004.94

Журавлев Артем Геннадиевич
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: juravlev@igduran.ru

Скороходов Антон Васильевич
инженер-исследователь,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: skorokhodov@igduran.ru

**К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫХ
КОМПЛЕКСОВ МЕТОДОМ
КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Аннотация:

Увязаны воедино известные закономерности изменения производительности и себестоимости экскаваторно-автомобильного комплекса с ростом вместимости ковша экскаватора и количества автосамосвалов, обслуживающих один экскаватор. Представлены результаты компьютерного моделирования с применением специализированных программных средств, разработанных в ИГД УрО РАН, разных вариантов простых экскаваторно-автомобильных комплексов, произведены технико-экономический расчет на основе результатов моделирования и оценка стоимости владения ЭАК за 7 лет, сформулированы принципы подбора параметров ЭАК.

Ключевые слова: экскаваторно-автомобильный комплекс, компьютерное моделирование, транспортная система карьера, стоимость владения, технико-экономические показатели.

Zhuravlev Artem G.
candidate of technical sciences,
senior researcher,
The Institute of mining UB RAS
620075, Yekaterinburg,
Mamin-Sibiryak st., 58
e-mail: juravlev@igduran.ru

Skorokhodov Anton V.
engineer- researcher,
The Institute of mining UB RAS
e-mail: skorokhodov@igduran.ru

**TO THE QUESTION OF GROUNDING
EXCAVATOR-TRUCK SETS CAPACITY
BY COMPUTER SIMULATION**

Abstract:

The regularities of changing both the capacity and prime cost of an excavator-truck set are correlated together with the growth of the excavator's bucket capacity and the number of trucks, serving one excavator. The results of computer simulation using specialized software developed in the IM UB RAS are presented as well as different variants of common excavator-truck sets. Technical and economic calculations in terms of simulation results and estimation the cost of ETS ownership for 7 years are performed. The principles of selection EAS parameters are formulated.

Key words: excavator-truck set, computer simulation, open pit transport system, ownership cost, technical and economic indices.

Вопросам обоснования производительности экскаваторно-автомобильных комплексов (ЭАК) на карьерах посвящено большое количество работ, что связано с определяющей ролью этого оборудования в себестоимости добычи полезных ископаемых, темпах развития горных работ и др. Решение задач в этой области требуется в двух аспектах:

- теоретические исследования, связанные с поиском рациональных структур организации работ, оптимальных параметров горных и транспортных машин, исследование развития транспортных систем карьеров и др.;
- прикладные расчеты для определения типов, моделей и количества горного оборудования при проектировании карьеров или их техническом перевооружении.

Одним из важных вопросов является правильный подбор экскаваторно-автомобильных комплексов по набору взаимоувязанных факторов: соотношению вместимости ковша экскаватора и кузова автосамосвала (весовой и объемный модули ЭАК по Кулешову А.А. [1]), количеству автосамосвалов, обслуживающих экскаватор, их грузоподъемности. Решение этой задачи рассматривалось многими авторами в разных аспектах.

Так, в работе Васильева М.В., Сироткина З.Л., Смирнова В.П. [2] представлено решение методами теории массового обслуживания задачи выбора рационального сочетания погрузочного и транспортного оборудования по производительности экскаватора в зависимости от количества автосамосвалов, обслуживающих данный экскаватор. Авторами показано, что при малом числе автосамосвалов на трассе коэффициент их использования близок к единице, а производительность экскаватора растет по прямолинейному закону. С увеличением числа автосамосвалов темп нарастания их производительности падает, а в случае предельного насыщения системы автосамосвалами рост производительности полностью прекращается (рис.1). При этом из рисунка видно, что диапазон варьирования производительности (заштрихованная область) достаточно широк и зависит от ряда дополнительных факторов организации работ. Согласно [2, с. 224], наибольшая производительность экскаватора может быть получена при полном насыщении технологической линии автомобилями. Отметим, что при этом важно оценить не только технологические, но и технико-экономические показатели, которые могут повлиять на выбор рационального варианта. Так, наиболее экономичный вариант будет, вероятнее всего, соответствовать не полному насыщению линии автосамосвалами.

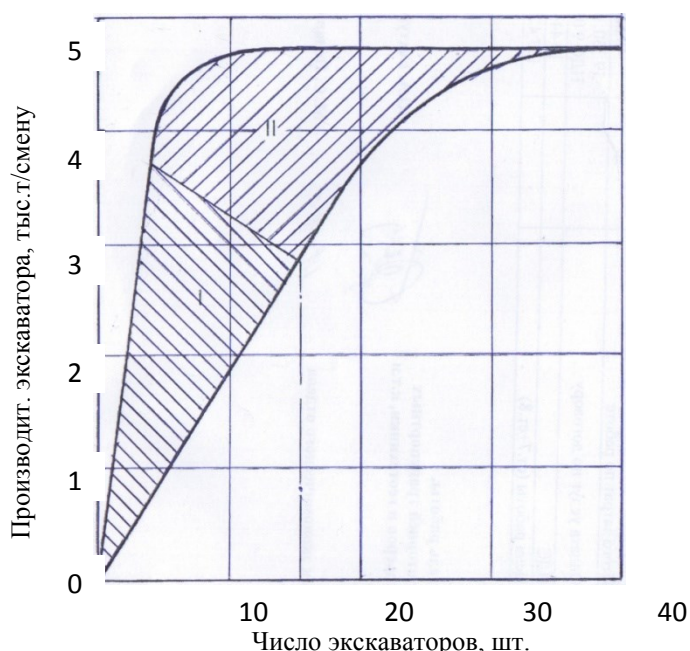


Рис.1 – Производительность экскаватора ЭКГ-4 в зависимости от количества обслуживающих его автосамосвалов БелАЗ-540, по данным [2, с. 224]

В работе А.А. Кулешова [3] приведены расчеты удельных затрат на экскавацию и транспортирование горной массы ЭАК в зависимости от весового и объемного модуля комплекса, отражающие наличие минимума удельных затрат в зависимости от соотношения объема ковша экскаватора и вместимости грузовой платформы автосамосвала (рис. 2).

Представляется важным решение комплексной задачи технико-экономического обоснования рациональных параметров экскаваторно-автомобильного комплекса как по весовому и объемному модулю ЭАК (согласно Кулешову А.А.), так и по количеству автосамосвалов, обслуживающих ЭАК. Решение этой задачи возможно на основе компьютерного моделирования в программе «Транспортная система карьера» (ТСК), разработанной в ИГД УрО РАН [4]. Это позволяет, с одной стороны, решить проблемы, возникающие при решении задачи методами теории массового обслуживания (погрешности), с другой – максимально приблизить режим работы ЭАК к реальному карьеру за счет

моделирования возникающих систематических и случайных простоев, изменений продолжительности операций процессов экскавации и транспортирования.

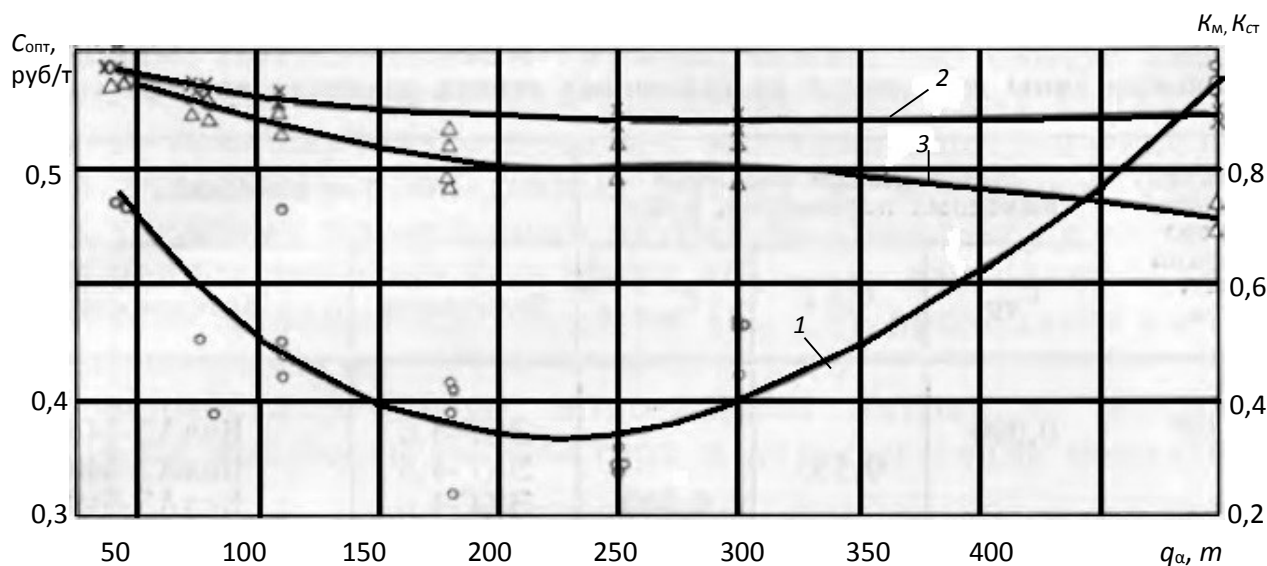


Рис. 2 – Зависимость удельных приведенных затрат по ЭАК от грузоподъемности автосамосвалов [3, с. 293]:

- 1 – удельные приведенные затраты по ЭАК,
- 2 – коэффициенты маневренности K_m комплекса,
- 3 – коэффициент стабильности ЭАК

Алгоритм работы программы ТСК заключается в пошаговом (с шагом времени от 1 с и грубее) воспроизведении работы выемочно-погрузочных, транспортных средств, перегрузочных пунктов в составе заданной в базе данных пространственной модели транспортной системы карьера (включая автодороги, места погрузки и разгрузки). Модель может содержать до трех одновременно моделируемых видов транспорта (автомобильный, железнодорожный, конвейерный), каждый из которых функционирует по отдельным алгоритмам и в рамках отдельной схемы транспортных коммуникаций, связанных при необходимости перегрузочными пунктами.

Программа ТСК позволяет моделировать различные варианты работы транспортной системы карьера, используя при этом нужные виды карьерного транспорта (экскаваторы, автосамосвалы), на реальной схеме движения. После моделирования можно выбрать оптимальный вариант сочетания экскаваторов и автосамосвалов и такой вариант использовать на реальном карьере, что даст максимальную эффективность. Программа ТСК применима для:

- определения «узких мест» варианта организации транспортной системы;
- выбора параметров горно-транспортного оборудования путем сопоставления результатов моделирования разных сочетаний и моделей оборудования;
- оптимизации управления технологическими процессами горно-транспортных работ;
- долгосрочного прогнозирования рациональных вариантов формирования транспортных систем карьеров.

Условия проведения расчетов: для всех рассматриваемых ЭАК была принята одинаковая расчетная трасса с кольцевым движением между одной погрузкой и одной разгрузкой (рис. 3). Протяженность трассы от погрузки до разгрузки 7 км. Объем перевезенной горной массы определялся исходя из максимально возможной производительности комплекса по результатам имитационного компьютерного моделирования. По результатам моделирования определялись технологические показатели каждого комплекса: объем фактически перевезенной горной массы, пробег по парку автосамосвалов,

расход топлива и т.п. Объем погруженной горной массы экскаватором, очевидно, равен объему перевезенной горной массы.

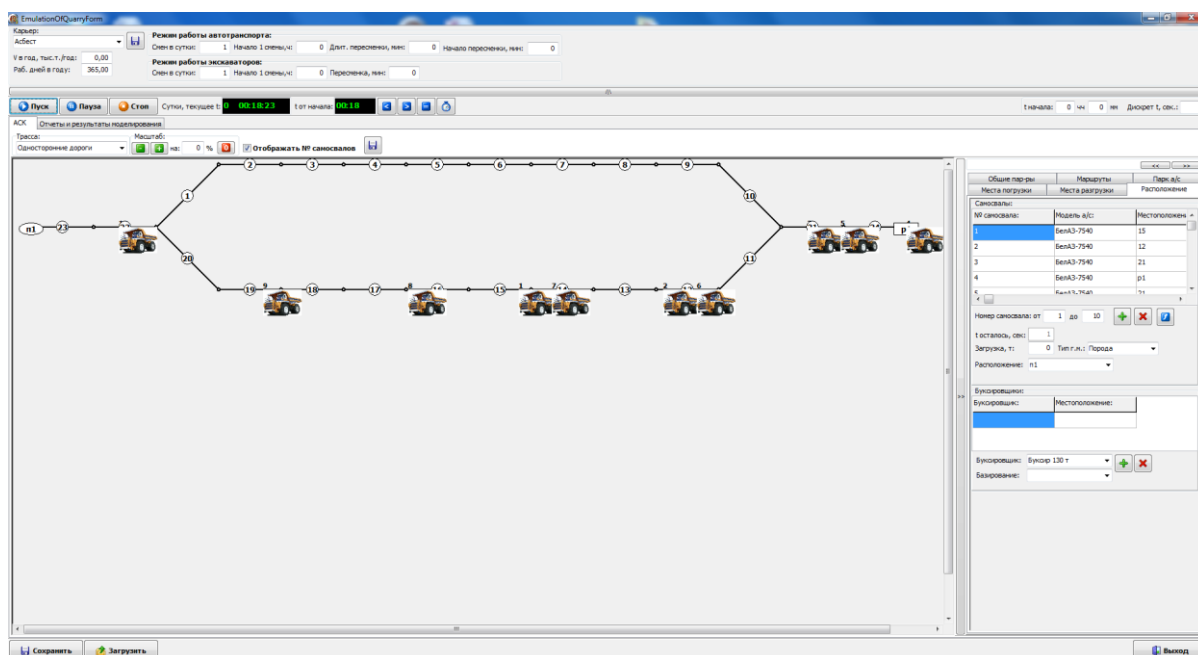


Рис.3 – Окно моделирования программы ТСК с кольцевой трассой

Сравнение проводилось для нескольких простых экскаваторно-автомобильных комплексов (табл. 1). Для каждого сочетания модели экскаватора и автосамосвала рассматривались несколько подвариантов с различным количеством автосамосвалов в комплексе.

Таблица 1

Сравниваемые варианты экскаваторно-автомобильных комплексов

Параметр	Вариант ЭАК*									
	ЭКГ-5 (7540)	ЭКГ-8 (7540)	ЭКГ-20 (7540)	ЭКГ-5 (7555)	ЭКГ-8 (7555)	ЭКГ-20 (7555)	ЭКГ-8 (7513)	ЭКГ-15 (7513)	ЭКГ-20 (7513)	ЭКГ-40 (7513)
Весовой модуль ЭАК (с учетом коэф. заполнения ковша и разрыхления)	3,6	2,3	2,3	6,6	4,1	1,7	10,2	5,4	4,1	2,0
Объемный модуль ЭАК	3,8	2,4	1,0	6,6	4,1	1,7	8,8	4,7	3,5	1,8
Подварианты по количеству автосамосвалов (ед.)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20

* В скобках приведена модель автосамосвалов БелАЗ

Моделирование проводилось для промежутка одной 8-часовой смены по всем вариантам. Далее с учетом годового фонда рабочего времени при круглогодичном 3-сменном режиме работы рассчитана годовая производительность каждого ЭАК, которая представлена на рис. 4. Из графика (рис. 4) видно, что для всех вариантов на уровне 10 – 15 автосамосвалов, работающих на линии, достигнуто насыщение транспортной системы, когда производительность практически не растет с увеличением парка транспорт-

ных машин. При этом насыщение происходит тем раньше, чем больше весовой (объемный) модуль ЭАК. Также наблюдаются известные закономерности: с увеличением грузоподъемности автосамосвалов существенно повышается производительность комплекса, однако в случае использования экскаваторов с малой вместимостью ковша при объемном модуле ЭАК более 6,5 – 7,0 производительность комплекса даже ниже, чем у ЭАК с менее грузоподъемными самосвалами, но большим ковшом экскаватора (см. ЭКГ-8(7513) и ЭКГ-20(7555)). В то же время при работе в паре с экскаватором, объем ковша которого близок к оптимальному для данного автосамосвала (согласно рекомендациям многих литературных источников: 4 – 6 ковшей экскаватора на погрузку одного автосамосвала), значительно увеличивается производительность ЭАК. Например, 15 самосвалов БелАЗ-7513 в паре с экскаватором ЭКГ-40 обеспечивают производительность на 26,5 % выше относительно варианта с ЭКГ-20, а 20 таких самосвалов – на 32 %.

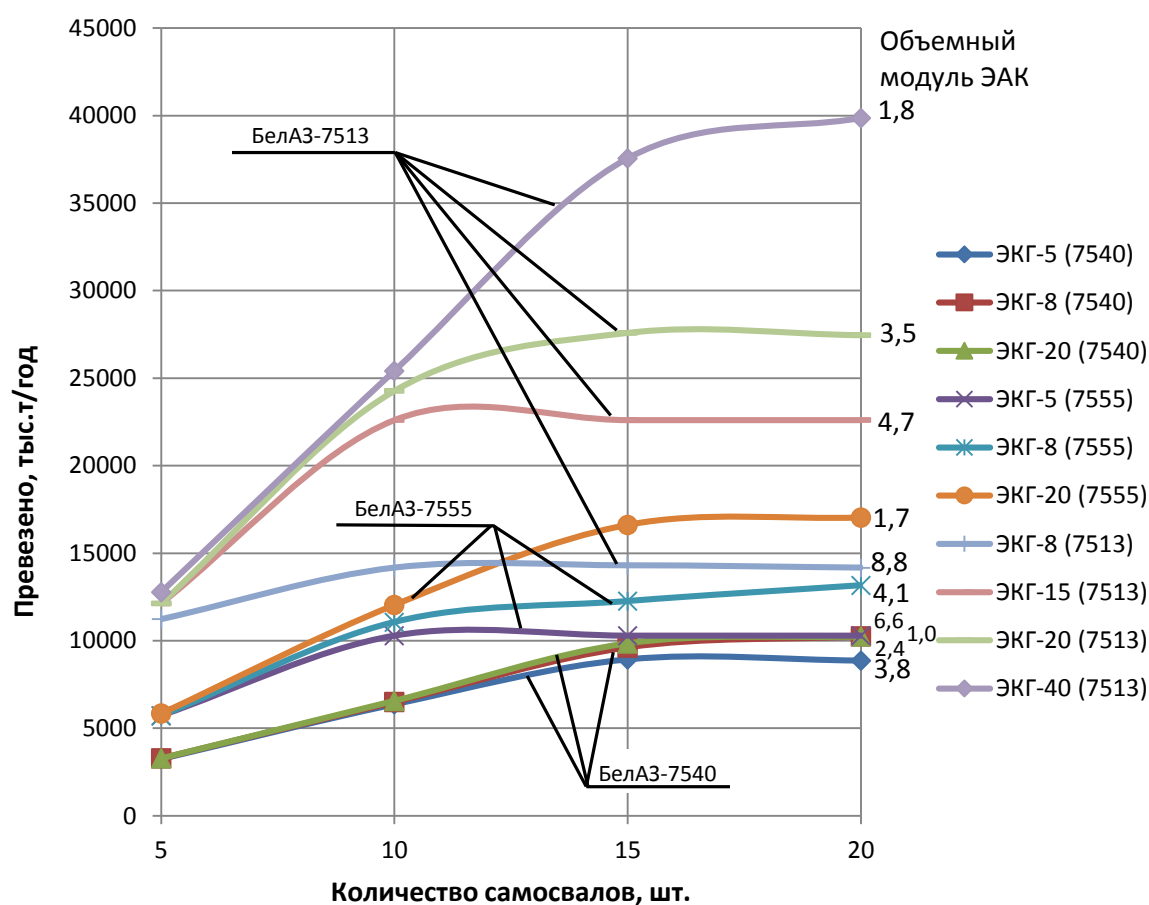


Рис. 4 – Расчетная годовая производительность для рассматриваемых ЭАК

С точки зрения увеличения производительности рационально выбирать ЭАК с весовым (объемным) модулем менее 4. Однако экскаваторы большого типоразмера влекут повышенные капитальные и эксплуатационные затраты. Поэтому важно оценить технико-экономические показатели по рассмотренным вариантам.

Технико-экономический расчет базируется на полученных моделировании технологических параметрах и затратных показателях, определенных как по аналогам и имеющимся ценам на расходные материалы, так и на регрессионных зависимостях аналогично методике, описанной в [5]. Для автосамосвалов использовались данные исследований [5, 6]. Для экскаваторов на основе сведений о стоимостных показателях [7, 8] были установлены регрессионные зависимости и путем экстраполяции и интерполяции определены искомые удельные экономические показатели экскавации в зависимости от вместимости ковша экскаватора.

Для установления общих закономерностей без привязки к конкретному инвестиционному проекту по конкретному горнодобывающему предприятию удобно использовать показатель «стоимость владения», рассчитываемая как сумма капитальных и эксплуатационных затрат за фиксированный промежуток времени (обычно – срок службы оборудования). Для расчетов в данной статье принят срок 7 лет (средний срок службы карьерных автосамосвалов).

На рис. 5 видно, что наименьшие затраты имеют место при использовании более производительного оборудования. При этом наиболее экономичный вариант необходимо выбирать по комплексу факторов: для одной и той же модели автосамосвала при малых объемах перевозок и количестве автосамосвалов преимуществом будет обладать вариант с меньшим по типоразмеру экскаватором, а с увеличением объема перевозок – вариант с более производительным экскаватором. Также видно, что при использовании слишком малых экскаваторов (весовой (объемный) модуль ЭАК более 8) ведет к резкому повышению затрат (см. ЭКГ-5(7555) и ЭКГ-8(7513)).

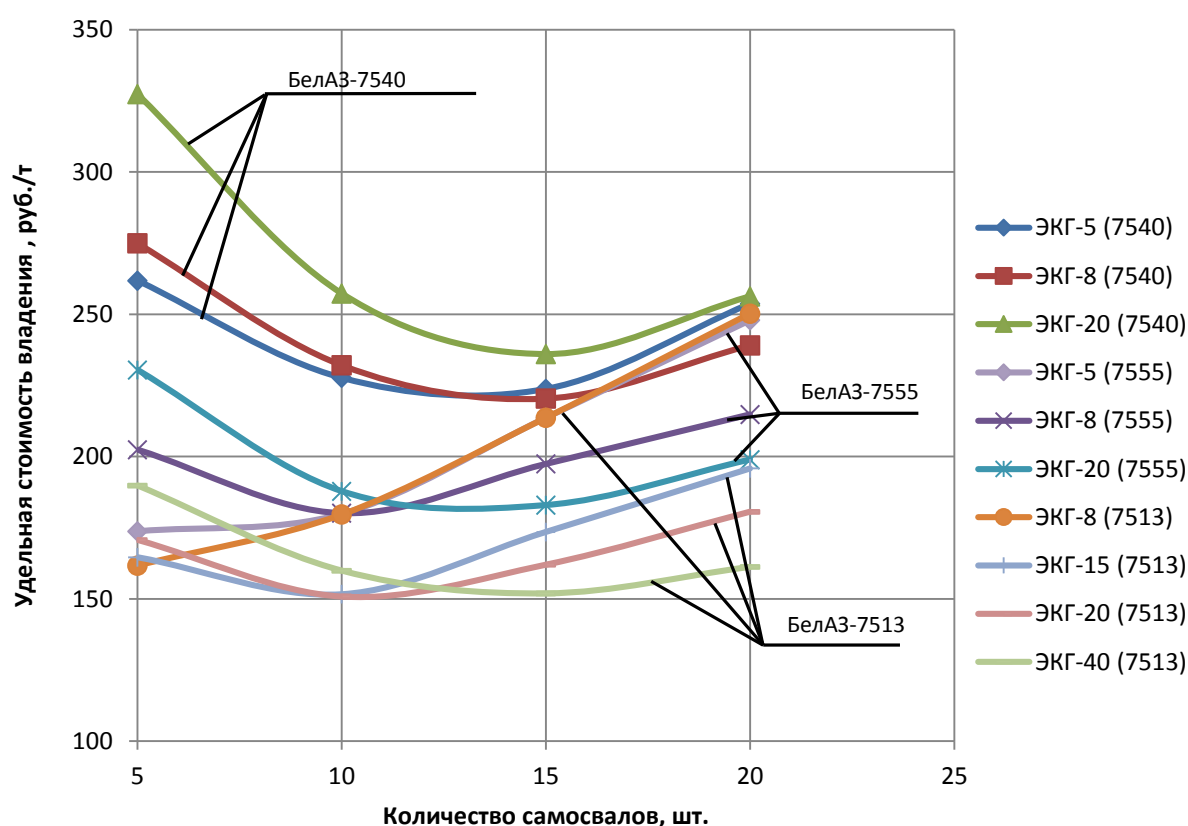


Рис. 5 – Удельная стоимость владения ЭАК за 7 лет, приведенная к 1 т перевезенной горной массы

Вопросы формирования ЭАК достаточно глубоко исследованы. Так, например, в работах А.А. Кулешова [3] приведены расчеты удельных затрат на экскавацию и транспортирование горной массы ЭАК при различных весовых и объемных модулях комплекса, отражающие наличие минимума удельных затрат в зависимости от соотношения вместимости ковша экскаватора и грузовой платформы автосамосвала. Расчеты, приведенные в данной статье, показывают, что в большинстве случаев имеется также оптимум и по критерию удельных затрат на тонну перевезенной горной массы в зависимости от количества автосамосвалов, обслуживающих экскаватор. При этом положение оптимума зависит как от объема ковша экскаватора, так и от грузоподъемности автосамосвалов.

Указанный факт и данные рисунка 5 позволяют сформулировать дополнительный методический принцип, при выборе параметров ЭАК: для близких или тождественных

по технико-экономическим показателям вариантов ЭАК при большем количестве автосамосвалов, обслуживающих экскаватор, следует отдавать предпочтение экскаваторам с большей вместимостью ковша (или, что то же самое, принимать меньшие значения весового и объемного модуля ЭАК), а для вариантов с меньшим количеством автосамосвалов в ЭАК – отдавать предпочтение экскаваторам с меньшей вместимостью ковша (большими значениями весового и объемного модуля ЭАК). При этом необходимо учитывать, что минимальные удельные затраты не всегда соответствуют минимальным абсолютным показателям затрат. Так, на рис. 6 приведены суммарные затраты за 7 лет на эксплуатацию простого ЭАК с автосамосвалами БелАЗ-7513. Видно, что наиболее дешевый по удельным затратам (см. рис. 5) вариант с экскаватором ЭКГ-40 по абсолютным цифрам является наиболее капиталоемким. Поэтому, если предприятие не имеет возможности вложить большие средства в мощный комплекс, оно должно выбирать наиболее рациональный из вариантов с меньшими экскаваторами, например: экскаватор ЭКГ-20 с 12 автосамосвалами БелАЗ-7513 или ЭКГ-15 с 9 автосамосвалами БелАЗ-7513.

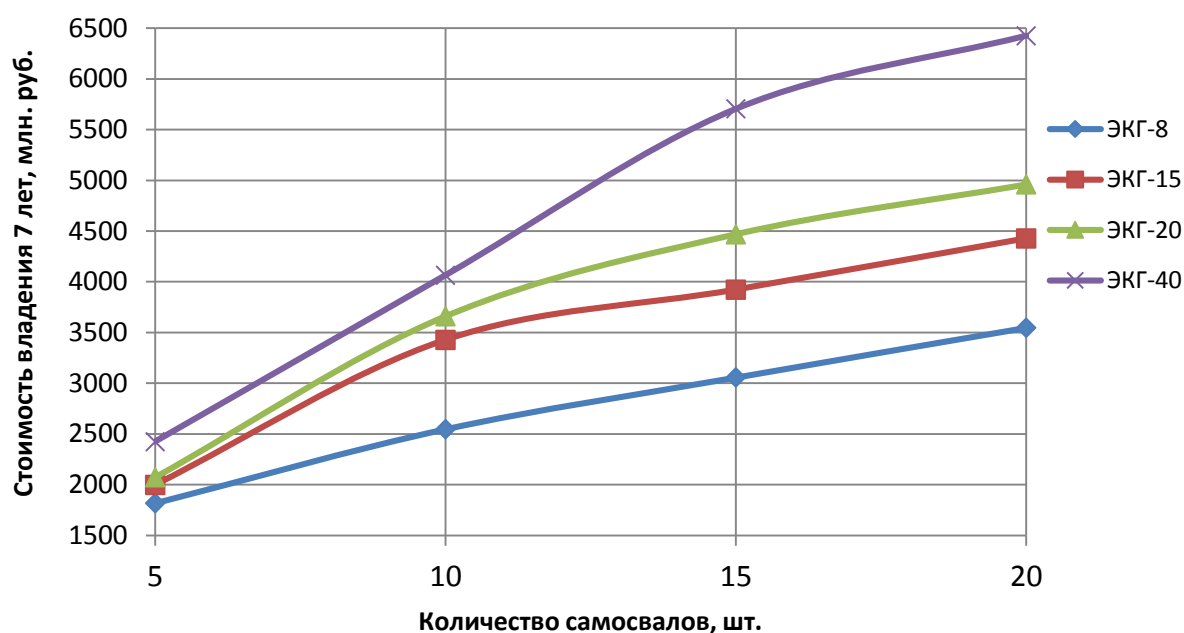


Рис. 6 – Зависимость суммарной стоимости владения ЭАК от количества автосамосвалов в нем (ЭАК состоит из одного экскаватора и автосамосвалов БелАЗ-7513)

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Существующая методическая база выбора параметров и состава экскаваторно-автомобильных комплексов требует уточнения с учетом внедрения методов имитационного компьютерного моделирования ЭАК.
2. Важным вопросом при выборе параметров ЭАК наряду с оптимальным сочетанием вместимости ковша экскаватора и кузова автосамосвала является подбор количества и грузоподъемности автосамосвалов, обслуживающих экскаватор. Наиболее экономичный вариант зависит от параметров маршрута транспортирования и требуемой производительности ЭАК.
3. Минимум затрат на экскавацию и транспортирование горной массы экскаваторно-автомобильным комплексом при варьировании количества автосамосвалов на линии определяется точкой насыщения транспортной системы автосамосвалами (когда с увеличением их количества производительность комплекса практически не растет).
4. Для близких или тождественных по технико-экономическим показателям вариантов ЭАК при большем количестве автосамосвалов, обслуживающих экскаватор, следует отдавать предпочтение экскаваторам с большей вместимостью ковша (или, что то

же самое, принимать меньшие значения весового и объемного модуля ЭАК), а для вариантов с меньшим количеством автосамосвалов в ЭАК – отдавать предпочтение экскаваторам с меньшей вместимостью ковша (большими значениями весового и объемного модуля ЭАК).

5. Рост производительности ЭАК существенно замедляется при достижении значений объемного модуля ЭАК на уровне 2,5, а при достижении значений 1,8 – 2,0 производительность не растет.

Литература

1. Кулешов А.А. Выбор оптимальной типажной структуры экскаваторно-автомобильных комплексов для условий конкретного карьера: учеб. пособие / А.А. Кулешов. – Л.: Ленинградский горный институт, 1989. – 70 с.
2. Васильев М.В. Автомобильный транспорт карьеров / М.В. Васильев, З.Л. Сироткин, В.П. Смирнов. – М.: Недра, 1973. – С. 221 - 226.
3. Кулешов А.А. Мощные экскаваторно-автомобильные комплексы карьеров / А.А. Кулешов. – М.: Недра, 1980. – 317 с.
4. Имитационное моделирование и автоматизированное управление горнотранспортными работами в карьерах / Р.Г. Салахияев, А.В. Дедюхин, Ю.А. Бахтурин, А.Г. Журавлев // Горный журнал. – 2012. - № 1. – С. 82 - 85.
5. Журавлев А.Г. Выбор рациональной грузоподъемности карьерных автосамосвалов для конкретных условий транспортирования / А.Г. Журавлев // Транспорт Урала. – 2014. – № 4. – С. 96 - 101.
6. Проблемы магистрального транспортирования руды от удаленных кимберлитовых месторождений / П. И. Тарасов, А. Г. Журавлев, В. А. Черепанов и др. // Горное оборудование и электромеханика. – 2014. – № 5. – С. 25 – 31.
7. Глебов А.В. Оценка эффективности применения мехлопат и гидравлических экскаваторов в условиях Кузбасса / А.В. Глебов, Л.А. Репин // Горное оборудование и электромеханика. – 2013. - № 6. – С. 20 - 22.
8. Глебов А.В. Цена владения – критерий выбора горного оборудования (на примере тяжелых экскаваторов) / А.В. Глебов, Л.А. Репин // Горное оборудование и электромеханика. – 2014. - № 5. – С. 10 - 13.
9. Журавлев А.Г. Компьютерное моделирование режимов движения карьерных автосамосвалов с КЭУ / А.Г. Журавлев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № ОВ11. – С. 371 - 382.