

# Диспетчеризация в карьерных экскаваторно-автомобильных комплексах с беспилотным транспортом\*

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-9-75-83>

Беспилотный карьерный автотранспорт приобретает все большую популярность в мире. Его использование позволяет повысить безопасность и производительность открытых горных работ, снизить затраты на содержание персонала и техническое обслуживание, а также сократить вредные выбросы в атмосферу. Однако использование беспилотного транспорта не даст ожидаемого эффекта без грамотного управления его работой – в частности, при его взаимодействии с карьерными экскаваторами в составе экскаваторно-автомобильных комплексов (ЭАК). Эффективное управление (диспетчеризация) позволяет снизить непроизводительные простои технологического карьерного оборудования, что является ключом к повышению производительности открытых горных работ в целом и ЭАК в частности. В данной работе проанализированы простои, имеющие место на действующих угольных разрезах, а также то, как на эти простои может повлиять использование беспилотного карьерного транспорта. Затем обозначены основные направления повышения производительности и некоторые особенности диспетчеризации беспилотного карьерного транспорта в сравнении с обычным. После этого описана двухуровневая модель управления ЭАК, которую можно применять как с обычным, так и с беспилотным транспортом. В конце работы представлены некоторые результаты расчетов по этой модели, показывающие ее эффективность.

**Ключевые слова:** карьер, экскаваторно-автомобильный комплекс, беспилотный карьерный самосвал, диспетчеризация, имитационное моделирование.

## ВОРОНОВ Ю.Е.

Доктор техн. наук, профессор,  
профессор кафедры ЭА  
КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева,  
650000, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: vyue.ap@kuzstu.ru

## ВОРОНОВ А.Ю.

Канд. техн. наук, доцент,  
доцент кафедры ЭА  
КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева,  
650000, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: voronovayu@kuzstu.ru

## ДУБИНКИН Д.М.

Канд. техн. наук, доцент,  
ведущий научный сотрудник  
научного центра «Цифровые технологии»  
КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева,  
650000, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

## МАКСИМОВА О.С.

Младший научный сотрудник  
научного центра «Цифровые технологии»  
КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева,  
650000, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: maksimovaos@kuzstu.ru

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению от 30.09.2022 № 075-15-2022-1198 с ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» в рамках Комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения» (КНТП «Чистый уголь – Зеленый Кузбасс») в рамках реализации мероприятия «Разработка и создание беспилотного карьерного самосвала челночного типа грузоподъемностью 220 тонн» в части выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.



**НОЦ  
КУЗБАСС**

Научно-образовательный  
центр «Кузбасс»

**Для цитирования:** Диспетчеризация в карьерных экскаваторно-автомобильных комплексах с беспилотным транспортом / Ю.Е. Воронов, А.Ю. Воронов, Д.М. Дубинкин и др. // Уголь. 2023. № 9. С. 75-83. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-9-75-83.

**ВВЕДЕНИЕ**

При работе экскаваторно-автомобильных комплексов (ЭАК) на карьерах большая часть простоев приходится на автосамосвалы. Экскаваторы, как правило, простаивают значительно реже, поскольку они являются ведущими машинами в ЭАК, и организаторы открытых горных работ стараются сделать так, чтобы работали они более или менее непрерывно.

На разрезе «Кедровский» процентное распределение простоев карьерных самосвалов в годовом масштабе выглядит примерно следующим образом (рис. 1).

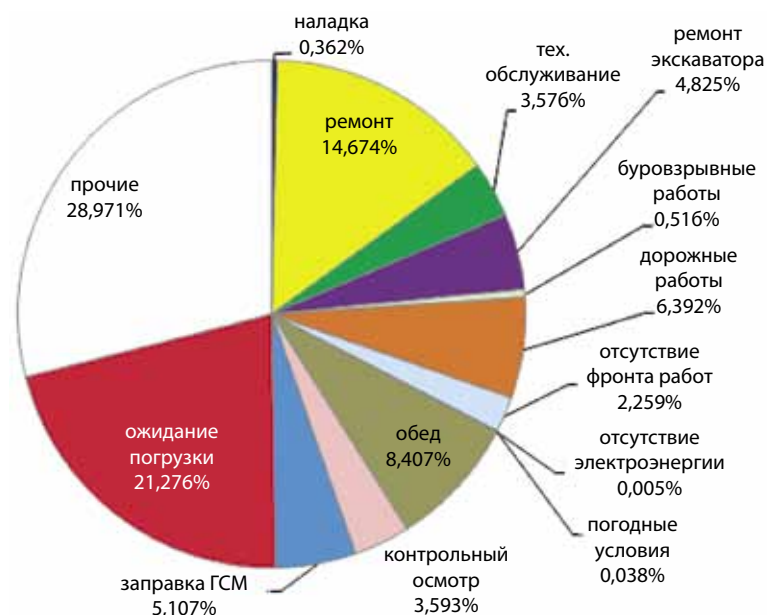


Рис. 1. Распределение простоев карьерных самосвалов на разрезе «Кедровский» за год

Fig. 1. Distribution of mining truck downtimes at the Kedrovsky Mine per year

Распределение годовых простоев самосвалов разреза «Кедровский» во временном выражении приведено в таблице.

Среднегодовая степень полезного использования самосвалов составила около 75%, что является невысоким результатом (норма – 80-85%). Простои снижают производительность горного оборудования, повышают эксплуатационные затраты и себестоимость работ, а следовательно, и стоимость конечной продукции. Многие из них возникают из-за «человеческого фактора».

В последнее время по причине популярности беспилотных технологий и нехватки квалифицированных водителей для карьерных автосамосвалов большое внимание как в литературе, так и в промышленности уделяется беспилотным карьерным самосвалам (БКС). По сравнению с обычными карьерными самосвалами БКС имеют множество преимуществ, включая снижение эксплуатационных расходов, повышение эффективности, повышение производительности и обеспечение безопасности рабочих.

Многие производители карьерных самосвалов, такие как Caterpillar, Hitachi и Komatsu, приложили огромные усилия для промышленного внедрения БКС и создания систем беспилотных карьерных перевозок. Подробные обзоры опыта применения беспилотной карьерной техники сделаны в работах [1, 2, 3, 4, 5].

**ВЛИЯНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ МАШИН НА ПРОСТОИ КАРИЕРНЫХ САМОСВАЛОВ**

Рассмотрим, как применение беспилотных машин может повлиять на простои карьерных самосвалов, обозначенные на рис. 1 и в таблице.

Наладка и ремонт (0,362% и 14,674%). Полностью избавиться от этих простоев невозможно. Сбои в работе системы управления и поломки самосвалов неизбежно будут происходить с некоторой периодичностью. Применение беспилотного транспорта позволит лишь снизить эти простои до некоторой величины (в зависимости от конкретных условий) – за счет использования рациональных режимов движения. Также современные системы управления БКС имеют

**Распределение простоев самосвалов во временном выражении за год**

Distribution of mining truck downtimes in time terms per year

Показатели	Наладка	Ремонт	Тех. обслуживание	Ремонт экскаватора	Буровзрывные работы	Дорожные работы	Отсутствие фронта работ	Отсутствие эл./энергии	Погодные условия	Обед	Контрольный осмотр	Заправка ГСМ	Ожидание погрузки	Прочие
Время простоя, ч	266,32	10795,28	2630,79	3549,93	379,66	4702,36	1661,81	3,41	27,896	61,84,63	2642,95	3757,27	15651,94	21313,155
Общее время простоев, ч	73567,4													
Общее время на линии, ч	298722,265													
Степень использования, %	75,373													

функцию мониторинга технического состояния машин и прогнозирования поломок, что позволяет заранее планировать ремонты и своевременно заменять машины.

Техническое обслуживание (3,576%). Является регламентированным простоем [6], и повлиять на него практически невозможно.

Ремонт экскаватора (4,825%). Карьерные экскаваторы пока управляются людьми (хотя работы по созданию беспилотных экскаваторов уже ведутся), поэтому повлиять на эти простои сложно. Можно, по аналогии с самосвалами, использовать мониторинг технического состояния экскаваторов, чтобы предсказывать вероятные поломки и, по возможности, своевременно их предотвращать или хотя бы смягчать их последствия.

Буровзрывные работы (0,516%). Это неотъемлемая часть технологического процесса открытой добычи, и избежать их невозможно. Многие западные горнодобывающие предприятия, помимо беспилотного автотранспорта, используют и автоматизированные буровые станки, позволяющие бурить взрывные скважины более точно и быстро, что повышает качество дробления горной массы.

Дорожные работы (6,392%). Необходимы для повышения качества покрытия, удаления просыпей и т.д. Зарубежные специалисты рекомендуют при использовании беспилотного транспорта расширять технологические трассы на 10–15% по сравнению с обычными, а также делать более широкими пересечения трасс, чтобы боковые насыпи не воспринимались беспилотными самосвалами как препятствия [6, 7, 8]. Это значит, что дорожные работы при беспилотном транспорте могут занять даже несколько больше времени, чем при обычном.

Отсутствие фронта работ (2,259%). Это простой по причине неподготовленности забоев в результате, например, некачественного дробления горной массы. Иногда такие случаи будут иметь место, независимо от того, какой транспорт будет использоваться.

Отсутствие электроэнергии и погодные условия (0,005% и 0,038%). Возникают исключительно под действием внешних факторов, и повлиять на них невозможно. Кроме того, их величины слишком малы, чтобы всерьез их учитывать.

Обед (8,407%). Единственный вид простоев, от которого при использовании беспилотного транспорта можно гарантированно избавиться полностью. При прочих неизменных условиях это сразу же даст повышение степени использования самосвалов на 2% (примерно до 77%). При этом, возможно, увеличатся количество заправок и простои в ожидании погрузки, но также увеличится и время полезной работы, что гораздо важнее.

Контрольный осмотр (3,593%). При обычном транспорте производится, как правило, в начале каждой смены. При беспилотном транспорте понятие смены неактуально, поэтому необходимости в контрольных осмотрах, на первый взгляд, нет. Но БКС в случае встречи препятствия на пути обычно запрограммированы на полную остановку. Запустить их снова можно лишь после визуального осмотра (например, с помощью БПЛА), который, очевидно, занимает некоторое время. Поэтому, чтобы сделать вывод о том, как использование беспилотного транспорта

повлияет на время контрольных осмотров, необходимо больше данных.

Заправка ГСМ (5,107%). С одной стороны, рациональный режим движения самосвала снижает расход топлива. С другой стороны, снижение простоев и повышение производительности транспорта расход топлива увеличивают. Поэтому, как и в предыдущем случае, сложно сказать, как беспилотники повлияют на этот необходимый и неизбежный простой.

Ожидание погрузки (21,276%). Для данного вида простоя может быть установлена норма – например, согласно [7] время ожидания погрузки на один рейс должно составлять не более половины времени погрузки. Очевидно, что так бывает далеко не всегда, а работа ЭАК по традиционному закрытому циклу (т.е. с закреплением самосвалов за конкретными экскаваторами) отнюдь не способствует сокращению этих простоев, как было показано во многих научных работах. Меры борьбы с этими простоями будут рассмотрены далее.

Прочие простои (28,971%). В документации выбранного предприятия они названы «незарегистрированными». Это либо целосменные простои самосвалов, либо простои, не относящиеся к 13 предыдущим категориям, либо простои, относящиеся к этим категориям, но по каким-либо причинам не зарегистрированные и т.д. Так или иначе, они занимают наибольшую долю в общей сумме простоев, и рассмотреть их необходимо. Однако, как повлияет на них использование беспилотного карьерного транспорта, сказать невозможно.

Подведем промежуточный итог. Помимо полного исключения простоев во время обедов, наиболее перспективным направлением повышения производительности ЭАК с беспилотным транспортом видится снижение простоев самосвалов в ожидании погрузки. Оптимальное управление транспортными потоками (т.е. диспетчеризация) поможет в этом.

### **РАЗНИЦА МЕЖДУ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИЕЙ ОБЫЧНЫХ И БЕСПИЛОТНЫХ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ**

Работа БКС может и без вмешательства человека полностью управляться указаниями в области маршрутизации и планирования, которые в реальном времени генерируются динамической системой диспетчеризации (ДСД). Таким образом, грамотно построенная ДСД имеет важное значение для создания системы безлюдных грузовых перевозок на карьерах. ДСД предназначена для построения маршрутов перевозок между пунктами погрузки и разгрузки, а также доведения их до БКС в режиме реального времени, чтобы минимизировать эксплуатационные затраты на перевозки или максимизировать объемы перевозок.

На первый взгляд, никакой разницы между диспетчеризацией обычных и беспилотных карьерных самосвалов нет – в обоих случаях присутствуют мобильные объекты, которые нужно направить в стационарные (приблизительно) пункты погрузки или разгрузки. При ближайшем рассмотрении некоторые различия все же заметны.

По сравнению с ДСД обычных карьерных самосвалов в системе БКС следует учитывать некоторые уникальные особенности. Когда самосвалы с разных направлений

одновременно въезжают на узкий перекресток, большой размер самосвалов создает проблемы при прохождении через конфликтные точки на перекрестке. Такие конфликты на перекрестках обычно создают трудности и риски для контроля БКС. Из соображений безопасности, при работе БКС на карьере обычно требуется, чтобы только один самосвал мог одновременно проходить через каждый перекресток. При использовании обычных карьерных самосвалов опытные водители, как правило, способны самостоятельно и умело проходить через конфликтные точки. Поэтому данное требование редко учитывается при использовании пилотируемых карьерных самосвалов. Это требование позволяет избежать возможных конфликтов между БКС на перекрестках и повышает безопасность работы БКС. Однако это может увеличить очереди на некоторых загруженных перекрестках и привести к заторам, как показано на *рис. 2* [10].

Заторы оказывают существенное негативное влияние на работу БКС и приводят к непредсказуемым значениям времени груженых и порожних пробегов для самосвалов. Пренебрежение заторами может затруднить реализацию маршрутов и назначений, созданных системой диспетчеризации, или даже привести к их отмене. Как отмечено в работе [11], заторам на перекрестках не уделялось никакого внимания в современной литературе по проблеме динамической диспетчеризации для карьерных самосвалов.

Данная проблема, несомненно, важна и слабо изучена, но в цели текущей работы ее решение не входит. Самое важное то, как принимаются решения по распределению самосвалов между пунктами погрузки и разгрузки. Возможные изменения времени пробегов в результате заторов,

как будет разъяснено далее, можно учесть и внести определенные коррективы в систему диспетчеризации.

Моделей диспетчеризации ЭАК карьеров было создано множество, и все они имеют свои недостатки. Подробные обзоры этих моделей и методов можно найти в работах [11, 12, 13, 14]. Среди наиболее значительных недостатков можно отметить следующие:

- недостаточный учет вероятностной природы технологических процессов открытых горных работ (как следствие – неприменимость аналитических методов решения);
- неадекватность модуля диспетчеризации (как следствие – неясность, к чему то или иное назначение самосвала приведет в будущем).

Таким образом, возникает противоречие: с одной стороны, решение о назначении самосвала должно быть достаточно быстрым, чтобы за время его выработки ситуация в карьере не изменилась слишком сильно; с другой стороны, решение должно быть достаточно точным и учитывать не только реальную текущую ситуацию в карьере, но и (по возможности) заглядывать в будущее, прогнозируя, к чему то или иное решение приведет впоследствии.

Выход здесь видится только один – совершенствование известных эвристических методов распределения карьерных самосвалов и адаптация их к современным возможностям. Авторы работы [15] попытались решить вышеуказанные проблемы, предложив двухуровневую модель управления ЭАК. Ее основные положения заключаются в следующем:

- расстановка экскаваторов по зонам погрузки уже известна – это задача технологов, и к управлению ЭАК



*Рис. 2. Схема заторов на перекрестках технологических трасс*  
*Fig. 2. Scheme of congestion at the intersections of technological routes*

она имеет косвенное отношение. Кратчайшие маршруты также известны. Чаще всего их можно определить чисто умозрительно либо с помощью обычных GPS-навигаторов, и нет необходимости тратить время на сложные математические методы;

- на верхнем уровне модели проводится имитационное дискретно-событийное моделирование предстоящей смены. Для определения параметров модели используются фактические значения времени выполнения технологических операций. В фактических значениях отражается все: уклоны и состояние трасс, техническое состояние машин, квалификация водителей (если они есть) и т.д. В результате моделирования определяются оптимальные параметры приоритетности маршрутов и оптимальное количество самосвалов для работы на группе маршрутов без закрепления за экскаваторами. В качестве генерального критерия оптимизации используется критерий минимума потерь от простоев оборудования за смену (теоретически критерий может быть любым). Планы выработки по маршрутам являются не целью, а ограничением: модель выбирает только те решения, которые позволяют добиться выработки, заданной в некоторых пределах. В работе принята рекомендация, что самосвалы в отдельных группах должны быть одинаковой грузоподъемности или хотя бы не слишком значительно различаться

(как правило, с некоторыми допущениями добиться этого возможно);

- параметры приоритетности маршрутов используются в критерии принятия решений по распределению самосвалов на нижнем уровне модели. Поскольку эти параметры отражают важность маршрутов в течение всей смены, то можно ожидать, что назначения самосвалов также будут оптимальны в течение всей смены.

В работе [15] перед принятием каждого решения проверялось время, оставшееся до конца смены. Если время цикла самосвала, получавшееся в результате решения, выходило за время смены, то решение не принималось, и самосвал сразу шел на пересмену. Если время цикла укладывалось в оставшееся время смены, то самосвал направлялся к экскаватору.

При беспилотном транспорте понятия «смена» и «пересмена» теряют актуальность, поэтому такую проверку проводить не нужно. Алгоритм действий при наступлении событий и определении статуса самосвала можно представить следующей схемой (рис. 3).

Предполагается, что критерий принятия диспетчерских решений о назначении самосвалов к экскаваторам будет выглядеть следующим образом:

$$J = \arg \min_j \frac{[T_j^B - (t_c + T_j^M)]_+ + \delta}{x_j}, \quad (1)$$

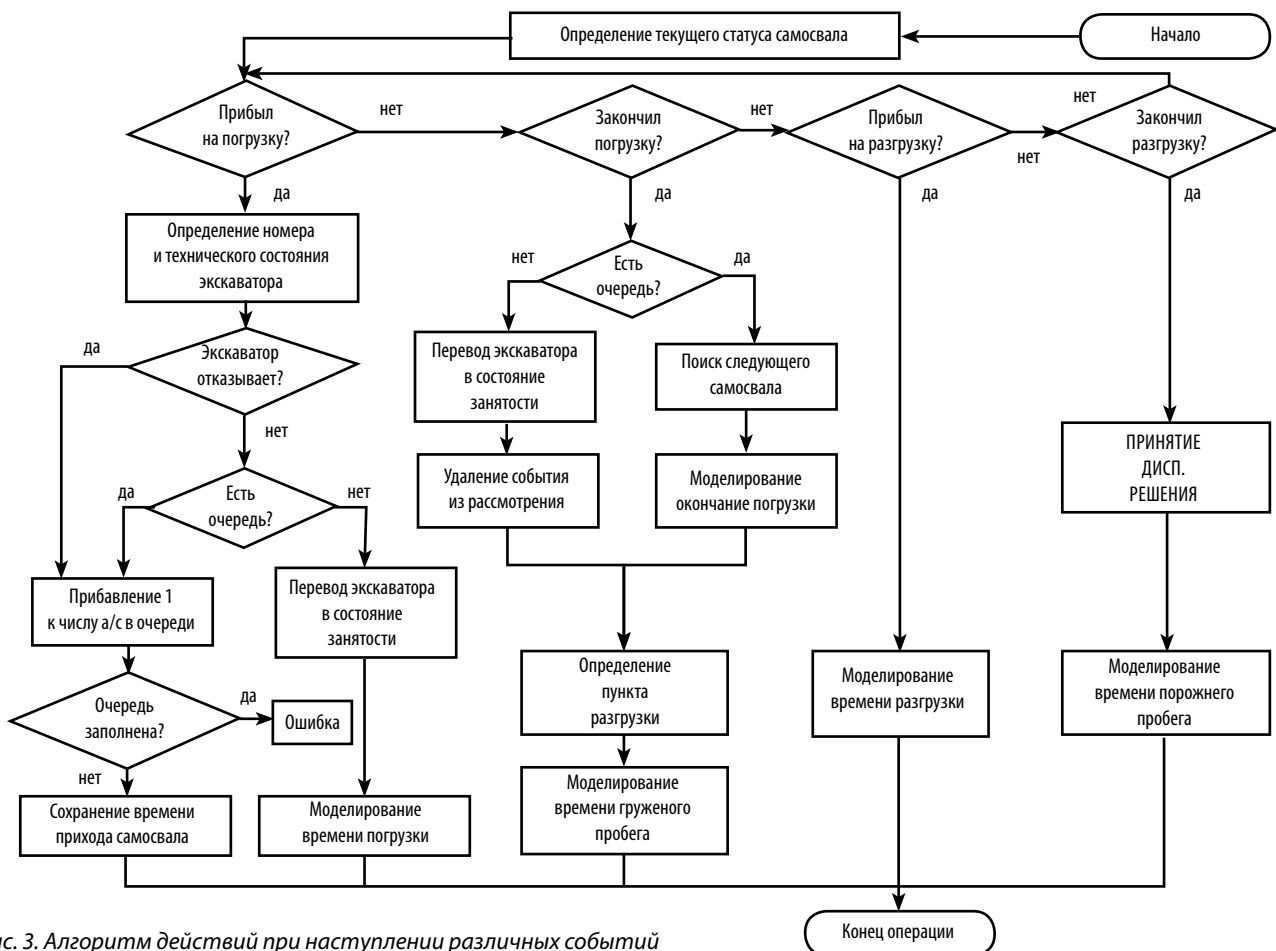


Рис. 3. Алгоритм действий при наступлении различных событий  
 Fig. 3. Algorithm of actions in case of various events

где  $J$  – номер нужного экскаватора;  $T_j^b$  – ожидаемое «время освобождения» (окончания последней загрузки)  $j$ -го экскаватора, включая самосвалы на пути к нему, а также уже стоящие в очереди;  $t_c$  – «текущее время», прошедшее с начала смены (часы модельного времени);  $T_j^m$  – ожидаемое «время движения» самосвала до  $j$ -го экскаватора;  $x_j$  – целочисленный параметр приоритетности  $j$ -го экскаватора и соответствующего ему маршрута;  $\delta$  – малое число, не допускающее обнуления числителя и критерия (в расчетах принималось равным 1).

Выражение  $T_j^b - (t_c + T_j^m)$  представляет собой ожидаемое время простоя самосвала, которое возникнет в результате его назначения к  $j$ -му экскаватору. На это выражение наложено условие неотрицательности. Если же оно равно нулю, то это означает либо идеальную ситуацию, когда ни самосвал, ни экскаватор не будут простаивать, либо некоторый простой экскаватора. Второй вариант, как уже отмечалось, крайне нежелателен, экскаватор нужно срочно обеспечить работой, поэтому такое назначение будет правильным.

Процесс выбора параметров приоритетности можно описать следующим образом. Пусть  $n$  – количество экскаваторов в определенной группе, тогда  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – вектор параметров приоритетности. Имитационное моделирование позволяет статистическими методами оценить характеристики системы  $C(X)$ . Для получения точной оценки необходимо провести расчет достаточно большого количества смен, поэтому для определения правила остановки используется центральная предельная теорема теории вероятностей.

Пусть для  $k$  испытаний (прогонов имитационной модели)  $\widehat{C}_k(X)$  – среднее значение характеристики,  $S_k^2$  – значение характеристики с выборочной дисперсией,  $\Delta C$  – допустимая погрешность. Тогда погрешность вычислений будет равна

$$P(|C(X) - \widehat{C}_k(X)| < \Delta C) = F\left(\frac{\Delta C}{S_k^2}\right) - F\left(\frac{-\Delta C}{S_k^2}\right), \quad (2)$$

где  $F$  – функция стандартного нормального распределения.

Количество прогонов  $k$  увеличивается до тех пор, пока вероятность попадания в доверительный интервал (2) не достигнет требуемой величины.

Затем решается задача поиска оптимальных параметров приоритетности:

$$X^* = \arg \min_X \widehat{C}_k(X). \quad (3)$$

Решение этой задачи требует значительных вычислительных ресурсов, так как оценка  $\widehat{C}_k(X)$  для каждого набора  $X$  получается в результате имитационного моделирования. Чтобы снизить затраты машинного времени, используется следующий прием.

Вполне очевидно, что при принятии диспетчерского решения важно соотношение между параметрами приоритетности (во сколько раз один больше другого). Пусть первый параметр  $x_1 = 1$ , а шаг параметра  $q > 1$ . Если задать предельные отклонения параметров как  $q^{-m} < x_j < q^m$ , то каждый параметр сможет принимать  $(2m + 1)$  значений.

Для решения задачи (3) с помощью полного перебора потребуется  $(2m + 1)^{n-1}$  расчетов характеристики  $\widehat{C}_k$ .

В качестве характеристики  $C(X)$  выступает величина денежных потерь от простоев экскаваторов и самосвалов в рассматриваемой группе за смену. Критерий выбора параметров приоритетности можно представить следующим образом:

$$C(X) = \sum_{j=1}^n (C_j^s \cdot I_j^s) + \sum_{j=1}^n (C^t \cdot I_j^t) \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $C_j^s$  – стоимость простоя  $j$ -го экскаватора, руб./ч;  $I_j^s$  – ожидаемое время простоя  $j$ -го экскаватора за смену, ч;  $C^t$  – стоимость простоя однотипных самосвалов в группе, руб./ч;  $I_j^t$  – ожидаемое время простоя однотипных самосвалов у  $j$ -го экскаватора за смену, ч.

Стоимость простоя каждой модели технологического оборудования определяется как упущенная финансовая выгода от условно недобытого в результате простоя и, как следствие, нереализованного угля. Ее можно приближенно определить по следующей формуле:

$$C = \frac{W_h}{r_s} \cdot C_c, \quad (5)$$

где  $W_h$  – ожидаемая эксплуатационная производительность единицы техники по вскрыше, м<sup>3</sup>/ч;  $r_s$  – коэффициент вскрыши, м<sup>3</sup>/т;  $C_c$  – средняя рыночная цена угля, руб./т.

В результате расчетов на имитационной модели для различного количества самосвалов в группе выбирается набор параметров приоритетности, наилучшим образом удовлетворяющий условию (4), которое одновременно является оценкой эффективности алгоритма на нижнем уровне системы диспетчеризации. Параметры приоритетности сводятся в базу данных и в дальнейшем используются для принятия диспетчерских решений. Параметры переоцениваются при любом значительном событии (например, замене экскаватора) либо через определенное время (например, перед началом каждой смены).

Примерная схема принятия диспетчерского решения о назначении порожнего самосвала представлена на рис. 4.

В реальных условиях разреза «Кедровский» удалось выделить несколько рациональных групп диспетчеризации, соответствующих нужным условиям: экскаваторы, работают по одному типу горной массы, однотипные самосвалы, один пункт разгрузки. Рассматривались перевозки только вскрышных пород, поскольку на разрезах вскрыша составляет основной грузопоток. Имеет смысл в качестве примера привести одну группу, в которую вошли два экскаватора – Р&Н-2800 с ковшом вместимостью 33 куб. м и ЭКГ-12ус с ковшом вместимостью 12,5 куб. м – работавшие на один отвал. Средние плечи откатки, по данным действующей на предприятии системы диспетчеризации, составили 3,95 км для экскаватора Р&Н-2800 и 4,2 км для экскаватора ЭКГ-12ус. В группе использовались однотипные самосвалы БелАЗ-75306 грузоподъемностью 220 т.

Расчеты проводились для режимов работы ЭАК по закрытому и открытому циклу (т.е. с закреплением и без закрепления самосвалов за экскаваторами). В модели учитывались простои самосвалов по следующим при-

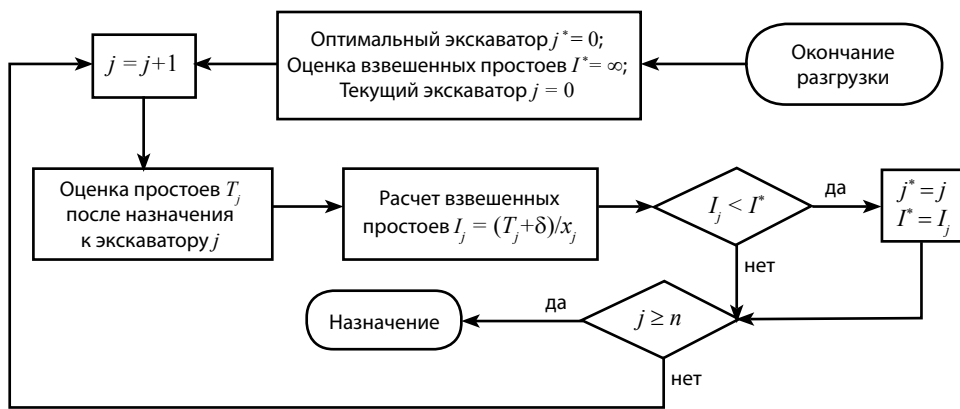


Рис. 4. Схема принятия диспетчерского решения  
Fig. 4. Dispatching decision flowchart

чинам: ремонт, ожидание погрузки, ремонт экскаватора. Остальные простои учесть не представляется возможным, поскольку они возникают не как непосредственный результат работы ЭАК. Поэтому время смены в модели без учета неучитываемых простоев принималось равным 10 ч (это примерно соответствует действительности). Результаты расчетов приведены на рис. 5 и рис. 6. Линии, соединяющие точки на графиках, физического смысла не имеют и добавлены для большей наглядности.

Из рис. 5 следует, что организация работы ЭАК по открытому циклу дает значительную экономию по сравнению с закрытым циклом – в основном за счет сокращения простоев автосамосвалов. При оптимальном для открытого цикла количестве самосвалов (18 шт.) сокращение потерь от простоев составило 12,6%, или почти 140 тыс. руб. за смену. В среднем для разного количества самосвалов сокращение потерь от простоев составило 7,3%.

Работа без закрепления самосвалов за экскаваторами эффективнее и в плане производительности (см. рис. 6).

При 14 самосвалах в группе работа по закрытому циклу позволяет перевезти только около 50800 т вскрыши, а работа по открытому циклу – около 52900 т, то есть на 4% больше. Поэтому, если норма сменной выработки будет установлена на уровне не ниже 52500 т (что примерно соответствует реальной производительности экскаваторов в данной группе), то работа по закрытому циклу для выполнения производственного плана потребует на один самосвал больше. Это говорит о том, что организация работы ЭАК по открытому циклу дает экономию не только за счет сокращения простоев горного оборудования, но и за счет сокращения количества работающих самосвалов. Кроме того, вполне очевидно, что чем меньше самосвалов работает в карьере, тем меньше вероятность возникновения заторов, о которых уже упоминалось.

Нужно отметить, что оптимальное количество самосвалов по критерию минимума потерь от простоев не всегда отвечает реальным требованиям, поскольку ожидаемая выработка ЭАК при такой его структуре может быть или

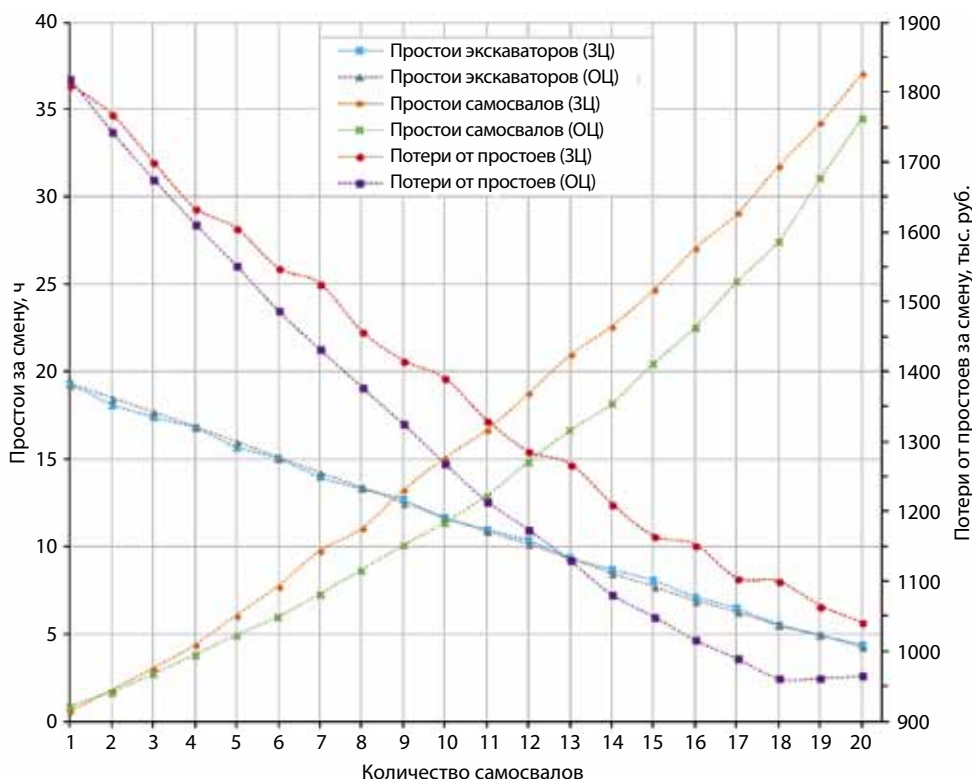


Рис. 5. Простои оборудования и потери от простоев при различных количествах самосвалов для закрытого (ЗЦ) и открытого (ОЦ) циклов работы

Fig. 5. Downtime of equipment and losses from downtime at various numbers of trucks for fixed and dynamic truck allocation

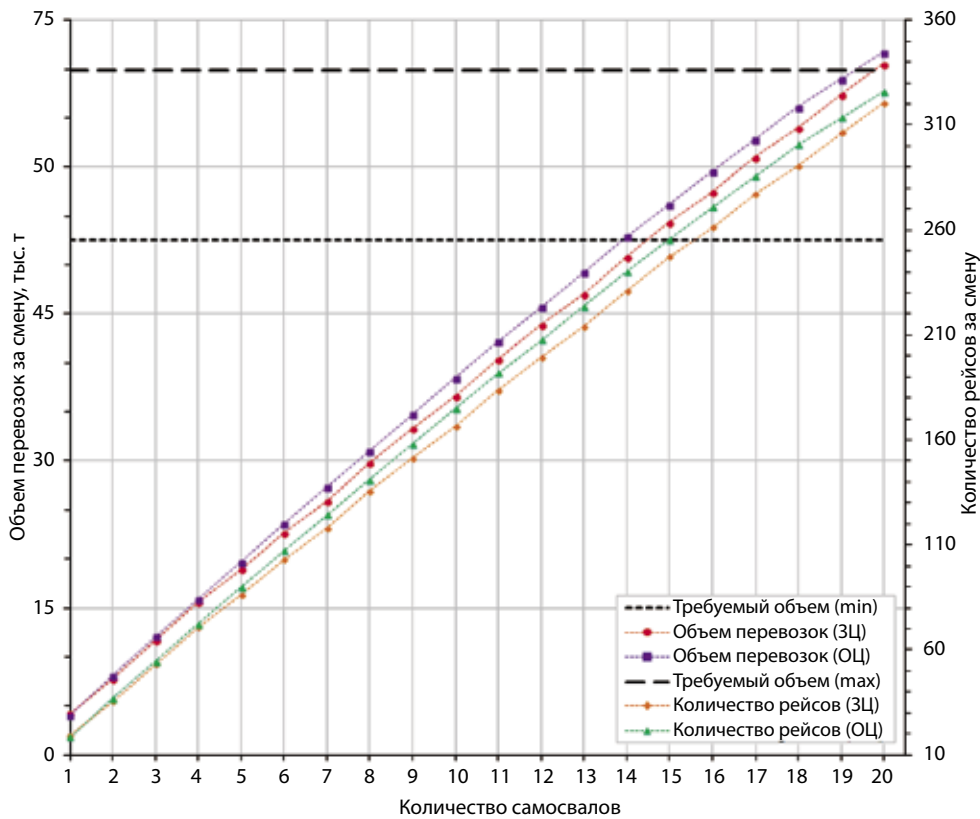


Рис. 6. Объем перевозок вскрыши и количество рейсов при различных количествах самосвалов для закрытого (ЗЦ) и открытого (ОЦ) циклов работы

Fig. 6. The volume of overburden and the number of hauls at various numbers of trucks for fixed and dynamic truck allocation

ниже, или намного выше производственного плана. План же должен быть просто выполнен, так что в этом случае придется ограничиваться нормой выработки, примерно соответствующей реальной производительности действующих в группе экскаваторов. Тогда заданные объемы работ можно будет выполнить меньшими ресурсами, что и требуется. Данное ограничение введено в предлагаемую имитационную модель, то есть программа позволяет выбирать только из тех вариантов, что обеспечивают достижение желаемой производительности. Это также сокращает время имитационных расчетов, что может стать существенным преимуществом. В текущих расчетах, с целью получения полных графиков, эта функция была отключена.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение можно сделать вывод, что для повышения качества управления ЭАК карьеров нужно активнее использовать имитационное моделирование, так как лишь оно может создать объективную картину протекающих вероятностных процессов.

### Список литературы

1. Журавлев А.Г. Тенденции развития транспортных систем карьеров с использованием роботизированных машин // Проблемы недропользования. 2014. № 3. С. 164-175.
2. Дубинкин Д.М. Современное состояние техники и технологий в области автономного управления движением транспортных средств угольных карьеров // Горное оборудование и электромеханика. 2019. № 6. С. 8-15. DOI: 10.26730/1816-4528-2019-6-8-15.
3. Хазин М.Л. Роботизированная техника для добычи полезных ископаемых // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т. 18. № 1. С. 4-15.

4. Об интенсивности изменения производительности автономной тяжелой платформы / М.А. Тюленев, С.О. Марков, Д.М. Дубинкин и др. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2021. № 1. С. 97-108. DOI 10.26730/1999-4125-2021-1-97-108.
5. Обзор систем безлюдных грузовых перевозок на карьерах / А.Ю. Воронов, Ю.Е. Воронов, И.С. Сыркин и др. // Уголь. 2022. № 512. С. 30-36. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-512-30-36.
6. Дубинкин Д.М., Аксенов В.В., Пашков Д.А. Тенденции развития беспилотных карьерных самосвалов // Уголь. 2023. № 6. С. 72-79. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-6-72-79.
7. Инструкция по учету рабочего времени технологического автотранспорта. Кемерово: ОАО «УК Кузбассразрезуголь». 2004. 11 с.
8. Mine planning and selection of autonomous trucks / R. Price, M. Cornelius, L. Burnside et al. // MPES-2019 Proceedings. 2020. P. 203-212.
9. Benlaajili S., Moutaouakkil F., Chebak A. Infrastructural requirements for the implementation of autonomous trucks in open-pit mines // V1th International Innovative Mining Symposium. 2021. E3S Web of Conferences 315. p. 03009.
10. A dynamic dispatching problem for autonomous mine trucks in open-pit mines considering endogenous congestion / L. Zhang, W. Shan, B. Zhou et al. // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2023. Vol. 150. P. 104080.
11. Munirathinam M., Yingling J.C. A review of computer-based truck dispatching strategies for surface mining operations // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. 1994. Vol. 8. No 1. P. 1-15.
12. Alarie S., Gamache M. Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. 2002. Vol. 16. No 1. P. 59-76.



13. Afrapoli A.M., Askari-Nasab H. Mining fleet management systems: a review of models and algorithms // *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2019. Vol. 33. No 1. P. 42-60.
14. Воронов А.Ю., Дубинкин Д.М., Воронов Ю.Е. Обзор моделей диспетчеризации карьерного автотранспорта // *Горная промышленность*. 2022. № 6. С. 111-121.
15. Воронов А.Ю., Воронов Ю.Е. Мультиуровневая модель управления экскаваторно-автомобильными комплексами разрезов // *Горное оборудование и электромеханика*. 2019. № 5. С. 8-15.

## Original Paper

UDC 622.23.05 © Yu.E. Voronov, A.Yu. Voronov, D.M. Dubinkin, O.S. Maksimova, 2023  
 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2023, № 9, pp. 75-83  
 DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-9-75-83>

## Title

## DISPATCHING IN TRUCK-SHOVEL SYSTEMS WITH UNMANNED TRANSPORT AT OPEN-PIT MINES

## Authors

Voronov Yu.E.<sup>1</sup>, Voronov A.Yu.<sup>1</sup>, Dubinkin D.M.<sup>1</sup>, Maksimova O.S.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation

## Authors Information

**Voronov Yu.E.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
 e-mail: vyue.ap@kuzstu.ru

**Voronov A.Yu.**, PhD (Engineering), Associate Professor,  
 e-mail: voronovayu@kuzstu.ru

**Dubinkin D.M.**, PhD (Engineering), Associate Professor,  
 Leading Researcher Associate, e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

**Maksimova O.S.**, Junior Researcher, e-mail: maksimovaos@kuzstu.ru

## Abstract

Unmanned mining dump trucks are becoming increasingly popular in the world. Its use improves the safety and productivity of open-pit mining, reduces personnel and maintenance costs, and reduces harmful emissions into the atmosphere. However, the use of unmanned transport will not give the expected effect without competent management of its work – in particular, when it interacts with mining shovels as part of shovel-truck systems (STS). Efficient management (or dispatching) allows to reduce unproductive downtime of technological mining equipment, which is the key to increasing the productivity of open-pit mining in general and STS in particular. This paper analyzes the downtime that takes place at active open-pit coal mines, as well as how these downtimes can be affected by the use of unmanned mining transport. Then the main directions for increasing productivity and some features of the dispatching of unmanned mining transport in comparison with conventional one are indicated. After that, a two-stage STS management model is described, which can be applied to both conventional and unmanned transport. At the end of the paper, some results of calculations for this model are presented, showing its effectiveness.

## Key words

Open-pit mine, Shovel-truck system, Autonomous mining dump truck, Dispatching, Simulation.

## References

- Zhuravlyov A.G. Tendencies of open pit transport systems progress employing robotic machines. *Problemy nedropolzovaniya*, 2014, (3), pp. 164-175. (In Russ.).
- Dubinkin D.M. The current state of technology and technologies in the field of autonomous control of the movement of vehicles of coal pits. *Mining equipment and electromechanics*, 2019, (6), pp. 8-15. (In Russ.). DOI: 10.26730/1816-4528-2019-6-8-15.
- Khazin M.L. Robotic equipment for mining operations. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo technicheskogo universiteta imeni G.I. Nosova*, 2020, Vol. 18, (1), pp. 4–15. (In Russ.).
- Tyulenev M.A., Markov S.O., Dubinkin D.M. & Aksenov V.V. On the intensity of changes in the performance of an autonomous heavy platform. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2021, (1), pp. 97-108. (In Russ.). DOI: 10.26730/1999-4125-2021-1-97-108.
- Voronov A.Yu., Voronov Yu.E., Syrkin I.S., Nazarenko S.V. & Yunusov I.F. A review of unmanned haulage systems at open-pit mines. *Ugol'*, 2022, (S12), pp. 30-36. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-S12-30-36.
- Dubinkin D.M., Aksenov V.V. & Pashkov D.A. Trends in the development of unmanned mining dump trucks. *Ugol'*, 2022, (6), pp. 72-79. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-72-79.

7. Instructions for recording the working hours of technological vehicles. Kemerovo, Kuzbassrazrezugol JSC, 2004, 11 p. (In Russ.).

8. Price R., Cornelius M., Burnside L. & Miller B. Mine planning and selection of autonomous trucks. *MPE-2019 Proceedings*, 2020, pp. 203-212.

9. Benlaajili S., Moutaouakkil F. & Chebak A. Infrastructural requirements for the implementation of autonomous trucks in open-pit mines. *Vlth International Innovative Mining Symposium*, 2021. E3S Web of Conferences 315, p. 03009.

10. Zhang L., Shan W., Zhou B. & Yu B. A dynamic dispatching problem for autonomous mine trucks in open-pit mines considering endogenous congestion. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, (150), pp. 104080.

11. Munirathinam M. & Yingling J.C. A review of computer-based truck dispatching strategies for surface mining operations. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 1994, Vol. 8, (1), pp. 1-15.

12. Alarie S. & Gamache M. Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 2002, Vol. 16, (1), pp. 59-76.

13. Afrapoli A.M. & Askari-Nasab H. Mining fleet management systems: a review of models and algorithms. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2019, Vol. 33, (1), pp. 42-60.

14. Voronov A.Y., Dubinkin D.M. & Voronov Y.Y. A review of models for truck dispatching at open-pit mines. *Gornaya promyshlennost'*, 2022, (6), pp. 111-121. (In Russ.).

15. Voronov A.Yu. & Voronov Yu.E. Multistage model for shovel-truck system management at open-pit coal mines. *Gornoe oborudovanie i electromekhanika*, 2019, (5), pp. 8-15. (In Russ.).

## Acknowledgements

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation under Agreement № 075-15-2022-1198 dated 30.09.2022 with the Gorbachev Kuzbass State Technical University on complex scientific and technical program of full innovation cycle: "Development and implementation of complex technologies in the areas of exploration and extraction of solid minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new deep conversion products from coal raw materials while consistently reducing the environmental impact and risks to human life" (the "Clean Coal – Green Kuzbass" Integrated Scientific and Technical Programme of the Full Innovation Cycle) as part of implementing the project "Development and creation of an unmanned shuttle-type mine truck with a payload of 220 tonnes" in terms of research, development and experimental-design work.

## For citation

Voronov Yu.E., Voronov A.Yu., Dubinkin D.M. & Maksimova O.S. Dispatching in truck-shovel systems with unmanned transport at open-pit mines. *Ugol'*, 2023, (9), pp. 75-83. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-9-75-83.

## Paper info

Received July 7, 2023

Reviewed August 14, 2023

Accepted August 25, 2023

## MINING EQUIPMENT