

УДК 622.271

**Ю.А. Бахтурин**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СЛОЖНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ КАРЬЕРОВ**

*С помощью метода имитационного моделирования создана модель функционирования сложных транспортных систем.?*

*Ключевые слова: имитационная модель, транспорт, дробильно-конвейерный комплекс, бункер.*

**Ц**елесообразность применения имитационных моделей для исследования параметров работы сложных транспортных систем обусловлена следующим:

1. Структурной и функциональной сложностью системы, аналитическое описание функционирования которой затруднено. Имитационные модели могут быть построены для подобных систем без привлечения сложного математического аппарата.

2. Необходимостью учета стохастического характера горнотранспортных процессов для адекватного их описания. Имитационные модели оказываются наиболее результативными для исследования системы в динамике, когда в ее функционировании принимают участие случайные факторы.

3. Сложность, а в некоторых случаях невозможность проведения натурных элементов для исследования системы. Отсутствие прямых аналогов применения а-к-ж.д. транспорта с внутрикарьерным размещением комплексов перегрузки с конвейерного на железнодорожный транспорт. Одно из основных преимуществ метода имитационного моделирования состоит в том, что он позволяет минуя натурный эксперимент и не прибегая

к сложным аналитическим исследованиям адекватно описать работу системы, оценить эффективность различных вариантов. При этом в противоположность другим численным методам имитация элементарных процессов происходит при обязательном сохранении его логической структуры и имеет аналогию с натурным экспериментом.

4. В связи с большой сложностью процессов горнотранспортных систем, в частности, системы а-к-ж.д. транспорта изменения отдельных элементов весьма часто и существенно сказываются на работе всей системы. В общепринятых технико-экономических расчетах такое влияние не учитывается. Имитационное моделирование позволяет производить комплексную оценку эффективности количественных и качественных изменений элементов рассматриваемой системы.

5. Различие в характере функционирования (циклический и непрерывный), надежности и режиме работы отдельных звеньев системы а-к-ж.д. транспорта затрудняет использование для ее описания однородного математического аппарата.

При определении метода построения математической модели а-к-ж.д.

транспорта учитывалось также, что применение в данном случае методов теории массового обслуживания неэффективно. Адекватное описание системы с применением сложного аппарата теории массового обслуживания с учетом надежности отдельных элементов, необходимости приспособления модели к решению широкого круга задач неизбежно приведет к увеличению размерности модели, усложнению, затруднениям в использовании.

Кроме того, в подобных моделях допускается определенная условность учета взаимодействия транспортных элементов вследствие того, что модель разрабатывается для объекта, вырванного из общей транспортной системы. Применение метода имитационного моделирования, который отличается гибкостью и универсальностью, позволяет избежать эти затруднения. Таковы априорные предположения применения метода имитационного моделирования при создании модели функционирования сложных транспортных систем.

При построении имитационной модели адекватность обеспечивается использованием экспериментально установленных законов распределения характеристик моделируемых процессов и формальным логическим описанием правил взаимодействия и последовательности элементов системы при их функционировании.

Модель может использоваться как идентификационная для исследования закономерностей изменения характеристик системы, а в совокупности с экономико-математической моделью и как оптимизационная. Модель позволяет решать широкий круг задач:

- исследование влияния горнотехнических факторов, схемы путевого развития, надежности элементов транс-

портной системы, вместимости складов и бункеров и других технологических параметров на производительность сложных транспортных систем;

- в совокупности с экономико-математической моделью выбор, а также проверку правильности выбора основного технологического оборудования, рациональных технологических параметров сложных горнотранспортных систем;

- определение рационального типа комплексов перегрузки с конвейерного на железнодорожный транспорт;

- оптимизация вместимости бункеров и складов комплексов перегрузки;

- определение рациональной схемы путевого развития железнодорожного транспорта;

- установление производительности горнотранспортных систем;

- организация рационального взаимодействия и экскаваторно-автомобильного комплексов, а также дробильно-конвейерного комплекса и железнодорожного транспорта

- обоснование провозной способности схем путевого развития

Программа включает в себя 5 основных модулей (рис. 1):

- модуль имитации работы автомобильного транспорта;

- модуль имитации работы дробильно-конвейерного комплекса;

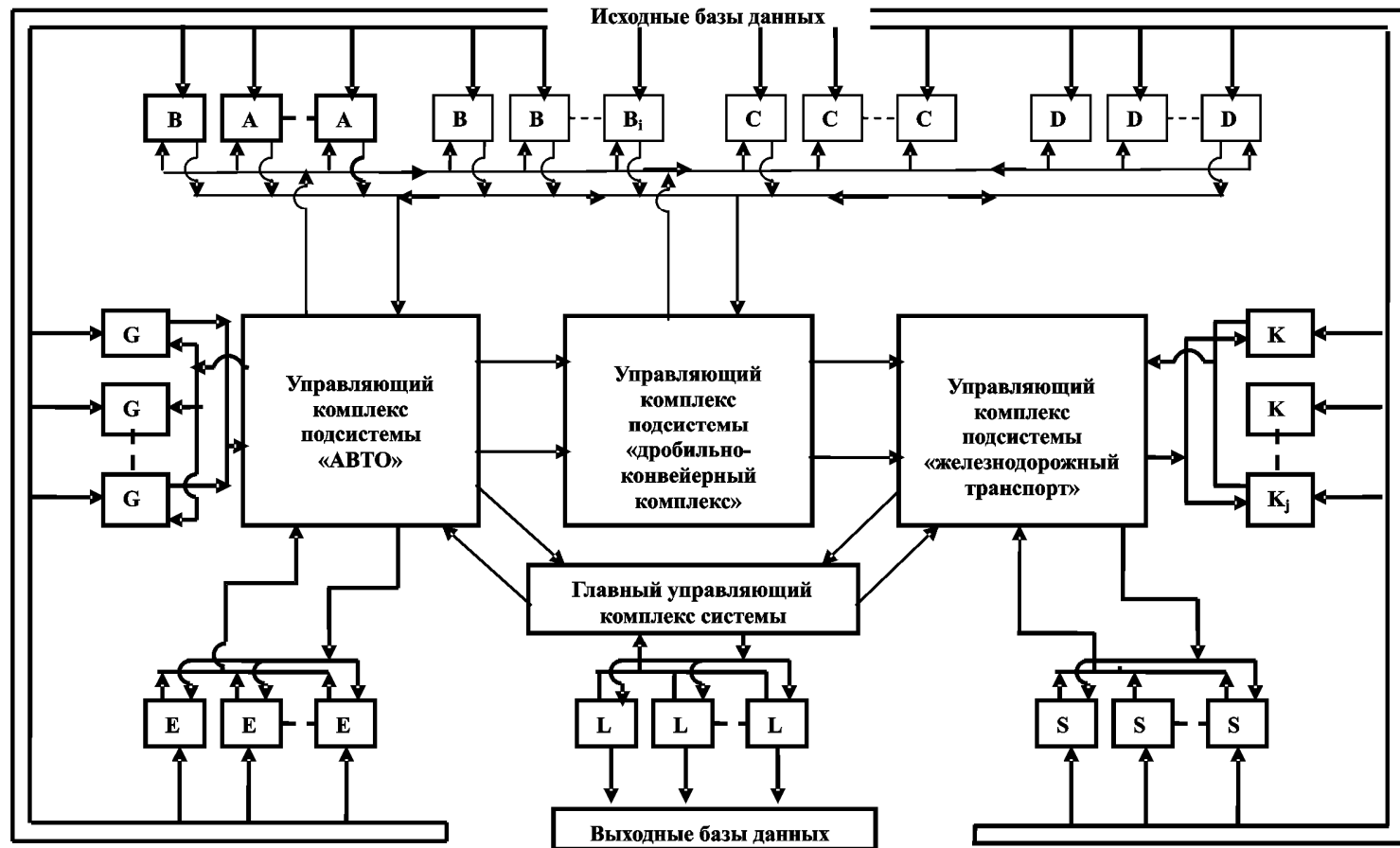
- имитации функционирования подсистемы железнодорожного транспорта;

- главный управляющий модуль;

- обработки и представления информации.

Разработанная модель имитации функционирования сложных транспортных систем реализуется при следующих условиях:

- шаг временной дискретизации моделируемого процесса 1 мин;



**Рис. 1. Схема формализованного представления взаимодействия элементов сложной транспортной системы:** А, В, С, D, G, К, Т, S, L — соответственно пункты разгрузки нас авто на ж.д. транспорт, ДПП, ДКК, ж.д. отвалы, автотрассы, блок-участки схемы путевого развития, автосамосвалы, локомотивосоставы, накопители информации

• всем входным данным должны быть присвоены начальные значения:

все входные и выходные параметры передаются через общую область памяти.

При моделировании работы сложных транспортных систем учитывается целый ряд факторов, основные из которых, а также способы их учета приведены в таблице 4.2. Влияние факторов отображается совокупностью временных, пространственных и логических характеристик: распределениями времени протекания операций, графом перемещения составов по участкам путевой схемы, признаками назначения и состояния отдельных элементов системы и т.п.

Эффективность моделирования во многом определяется исходными данными, характеризующими особенности процессов и горнотехнических условий. К исходным данным, используемым при моделировании предъявляются требования полноты характеристик, учитывающих влияния факторов, определяющих адекватность модели.

Параметры функционирования сложных транспортных систем в зависимости от характеристик применения можно разделить на 3 группы. К первой относятся параметры, характеризующие случайные колебания величин. Формирование случайных величин по их распределениям осуществляется алгоритмическим способом, т.е. используются рекуррентно полученные псевдослучайные числа. Обработка результатов хронометражных наблюдений, графиков исполненного движения, настольных журналов за эксплуатацией оборудования дробильно-конвейерного комплекса позволила установить, что большинство из распределений применяемых при моделировании величин могут быть с достаточной точностью аппроксими-

рованы гамма распределением. Это распределение носит общий характер и в качестве частных случаев включает в себя ряд часто встречающихся распределений (показательное, Эрланга и др).

Поэтому с целью унификации и упрощения процесса моделирования для идентификации распределений случайных величин используется гамма-распределение:

$$f(\alpha, v, x) = \frac{\alpha}{\Gamma(v)} x^{v-1} e^{-\alpha x},$$

$$v = \frac{1}{V^2}; \alpha = \frac{v}{x}$$

где  $V$  и  $x$  — коэффициент вариации и математическое ожидание величины.

Ко второй группе относятся параметры, изменение которых априорно предполагается несущественным. Так, время движения локомотивосостава по участку в общем случае является переменной величиной. Однако пределы изменения времени движения состава по коротким участкам, на которые разбивается схема путевого развития при моделировании незначительны (не более 0,8...1 мин). Поэтому при моделировании работы железнодорожного звена в составе а-к-ж.д. транспорта, когда шаг дискретизации равен 1 мин. целесообразно принимать время движения состава как детерминированную величину. К третьей группе относятся константы: шаг моделирования, назначенное время модели, количество оборудования и схема путевого развития по варианту и т.д.

При получении характеристик потока автосамосвалов в местах разгрузки на дробильно-перегрузочных пунктах могут использоваться экспериментальные данные, априорная информация для получения распределений времени наличия органи-

Таблица

**Основные факторы и способы их учета при моделировании работы сложных транспортных систем**

<b>Элементы, операции, показатели процесса</b>	<b>Факторы</b>	<b>Способы учета факторов при моделировании</b>
Перегрузка с автомобильного на конвейерный транспорт	Грузоподъемность автосамосвала, интенсивность поступления и перерывы в поступлении автосамосвалов на разгрузку	Формирование грузопотока конвейерной системы, интервала изменения текущей производительности, интервалов прибытия на разгрузку, присвоение признаков наличия или отсутствия потока автосамосвалов
Перегрузка с конвейерного на железнодорожный транспорт	Производительность бункерных устройств, мощность экскаватора, свойства пород, вместимость состава, склада, бункеров	Воспроизведение времени погрузки в средства железнодорожного транспорта, количества горной массы в бункерах и на складе
Разгрузка в местах приема горной массы	Вместимость состава, свойства пород, мощность отвального экскаватора	Воспроизведение времени разгрузки
Движение поездов: скорость, время занятости путей участков	Качество путей, технологические ограничения скорости движения поездов, конструктивные особенности участков железнодорожных путей	Воспроизведение времени движения локомотивоставов
Организация движения поездов;  Время занятости путей участков Конструкция путей участков	Назначение путей участков, разрешение и запрещение остановки, движение с грузом и порожняком, маршруты движения поездов, пересечение и смена направления движения средства СЦБ  Длина состава	Систематизация участков по назначению, присвоение соответствующих условных признаков, признаков маршрутов, приоритета движения Воспроизведение времени на приготовление маршрута определение порядка построения графа перемещений по участкам путевой схемы
Протекание процесса транспортирования	Отказы в работе	Присвоение признаков рабочего и нерабочего состояния элементов системы, воспроизведение времени восстановления, времени безотказной работы

зованного потока автосамосвалов и периодов отсутствия такого потока. Кроме того, такие характеристики могут быть получены непосредственным воспроизведением работы экскаваторно-автомобильного комплекса. При построении модели используется

первый способ. Это связано с тем, что работа автомобильного звена в схемах комбинированного, в частности, автомобильно-конвейерного транспорта достаточно хорошо исследована. Это обстоятельство позволяет при моделировании работы сложных

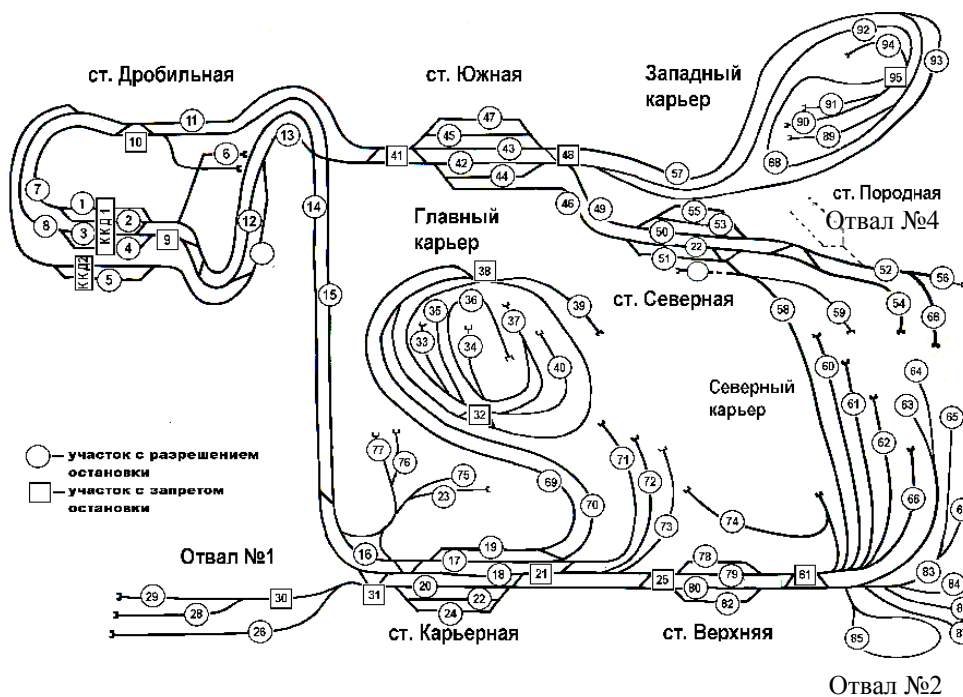
транспортных систем уделить основное внимание взаимодействию дробильно-конвейерного комплекса и железнодорожного транспорта. В схемах с автомобильно-конвейерным и автомобильно-конвейерно-железнодорожным транспортом автомобильное звено имеет ограничение на выходе — его производительность зависит от работоспособного состояния смежного звена, в данном случае дробильно-конвейерного комплекса. Анализ априорной информации свидетельствует о том, что вариация ожидания разгрузки автосамосвалов достигает 105 %, тогда как вариация интервалов прибытия на разгрузку — 88 %. Для учета взаимодействия указанных звеньев используются результаты исследований по организации работы автомобильного транспорта, согласно которым в периоды отказов дробильно-конвейерного комплекса очередь автосамосвалов растет до определенного технико-экономическим расчетом уровня после чего поток переключается на пункт перегрузки в средства железнодорожного транспорта.

С использованием предложенной модели проведены исследования и обоснование провозной способности схемы путевого развития карьеров Качканарского ГОКа.

Чтобы отразить реальный процесс при моделировании вся схема путевого развития рудовозного района разбивается на отдельные участки. Закодированная схема в виде графа представлена на рис. 2. При этом в адаптированной для условий Качканарского ГОКа модели для грузового и порожнего направления отведено по 100 участков. В качестве исходных данных использованы результаты статистической обработки данных большого числа (более 1400) наблюдений

хронометража по элементам цикла технологических поездов за длительный период времени. При этом учитывались сезонные колебания времени выполнения отдельных технологических операций, качество подготовки горной массы вид погрузочного участка (забойный, складской), тип погрузочного оборудования и т.п. Предельные скорости движения поездов по различным участкам определялись в соответствии с «Инструкцией по технической эксплуатации железнодорожного транспорта...», а в период межсезонья приказами по комбинату.

Чтобы учесть множество факторов, влияющих на сменные объемы перевозок горной массы железнодорожным транспортом, используется следующий прием. Моделирование проведено для реальных смен. При этом полностью воспроизведены расстановка экскаваторов на рабочих горизонтах, отвалах, а также локомотивосоставов на отдельных участках на начало смены, а также реальная продолжительность занятости поездами участков до окончания соответствующих операций. Разница в результатах, полученных при моделировании и фактических данных по объемам перевозки горной массы за реальную смену в дальнейшем при расчете пропускной способности горно-транспортной системы, учитывается путем введения поправочного коэффициента  $K_{лсм}$ . В частности, такое моделирование проведено для 2<sup>ой</sup> смены локомотивных бригад, занятых перевозками горной массы с 8<sup>00</sup> до 20<sup>00</sup> часов 21 апреля 2001 г. Сменный объем разгруженной горной массы по результатам моделирования составил 94000 т. Соответствующие фактические объемы за 2 смену 21 апреля 2001 г. составили 76947 т.



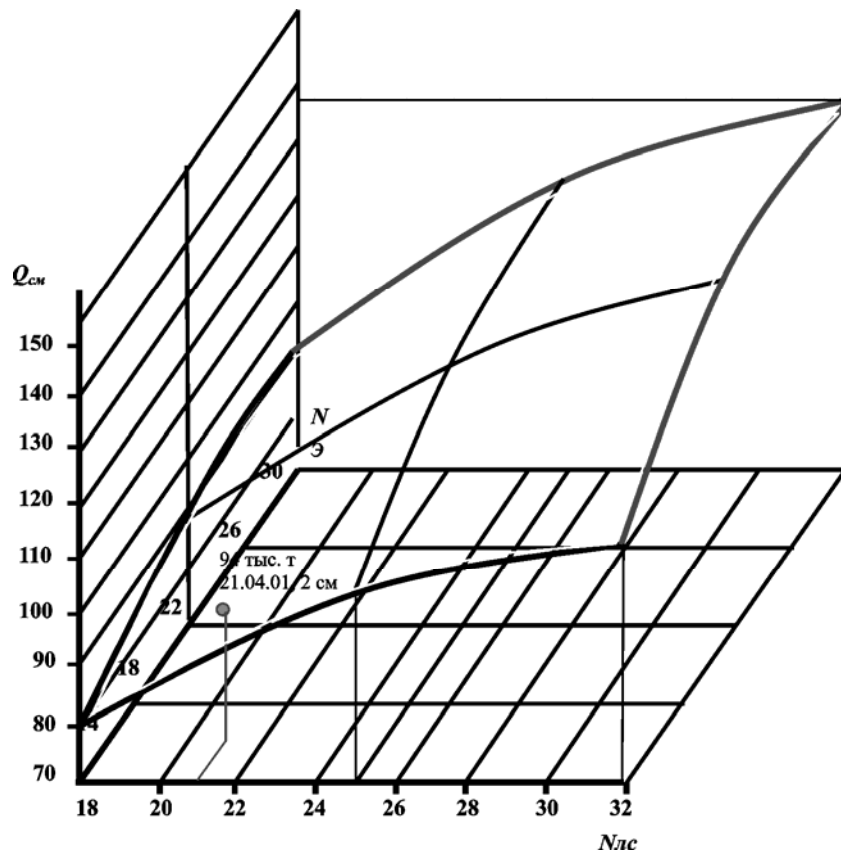
**Рис. 2. Схема путевого развития железнодорожного транспорта рудовозного района Качканарского ГОКа**

Таким образом, поправочный коэффициент  $K_{ПСМ}$  в этом конкретном случае составляет 1,22. Аналогичным образом модель была реализована и для других реальных смен. При этом выбирались как «лучшие», так и «худшие» и «средние» по объемам перевозки горной массы смены. В частности, модель реализована для 2<sup>ой</sup> смены 14 февраля 2001 г. (фактические объемы перевозок 66897 т), а также 4<sup>ой</sup> смены 27 февраля 2001 г. (фактические объемы перевозок 85501 т). При этом коэффициент  $K_{ПСМ}$  находится в пределах 1,21—1,34. Приведенные результаты моделирования отражают конкретную ситуацию при определенном сочетании основного погрузочного и транспортного оборудования. Для того, чтобы оценить собственно возможную провозную способность схемы путевого развития,

а также пропускную способность горно-транспортной системы «проигрывались» различные варианты сочетаний основного погрузочного и транспортного оборудования. При этом число экскаваторов в работе последовательно изменялось от 14 до 30, поездов — от 18 до 32 ед. (рис. 3).

Зависимость провозной способности схем путевого развития карьерного железнодорожного транспорта от числа локомотивосоставов в работе целесообразно описывать тремя участками:

- 1 — участок пропорционального изменения провозной способности;
- 2 — участок увеличения общей провозной способности при снижении удельной;
- 3 — участок снижения общей провозной способности.



**Рис. 3. Зависимость сменных объемов перевозок железнодорожным транспортом рудовозного района ( $Q_{см}$ ) от числа поездов ( $N_{лс}$ ) и экскаваторов ( $N_{э}$ ) в работе**

При этом на первом участке зависимость носит линейный характер, а на втором и третьем зависимость описывается полиномиальной моделью второго порядка. При фиксированном числе экскаваторов и увеличении числа локомотивосоставов и наоборот при фиксированном числе поездов и увеличении числа экскаваторов пропорциональное изменение сменных объемов перевозок горной массы имеет место лишь до некоторого предела. При определенных значениях  $N_{э}$  и  $N_{лс}$  темпы прироста снижаются вплоть до нуля. Когда в работе находится 21 локомотивосостав, увеличение числа экскаваторов свыше

18 не дает существенного прироста сменной производительности, а при числе экскаваторов порядка 20-22 наступает «насыщение» по сменным объемам перевозок. При этом некорректированные сменные объемы перевозок составляют порядка 100 тыс. т в смену (скорректированные — 76-82 тыс.т). Это значение можно считать пропускной способностью горно-транспортной системы при конкретном количественном сочетании горного и транспортного оборудования и определенной расстановке экскаваторов. При числе поездов в работе  $N_{лс} = 32$  ед. аналогичное «насыщение» наступает уже при числе экскавато-



ров порядка 29-30 ед. и соответствует некорректированной сменной производительности по горной массе порядка 135-139 тыс. т (корректированные — 100-110 тыс. т). При  $N_s = 16$  объемы перевозки горной массы пропорционально растут только с увеличением количества поездов до 21-22. При увеличении числа поездов несмотря на то, что общие перевозки растут, темпы их прироста существенно снижаются, что ведет к снижению производительности одного локомотивосостава. Это соответствует тезису общей экономической теории об «убывающей отдаче» при увеличении трудовых ресурсов. При  $N_s = 28$  ед. характер кривой иной и «насыщение» наступает при  $N_{лс} = 32$  ед. и также соответствует некорректированной сменной производительности по горной массе порядка 135-139 тыс.т (100-110 корректированной). Это значение можно считать сменной провозной способностью схемы путевого развития в настоящий период. Годовая провозная способность схемы путевого развития определяется исходя из корректированной сменной производительности с учетом технологических потерь рабочего времени на проведение взрывных работ, а

также цело сменных простоев оборудования из-за отключения электроэнергии, остановки участков при ликвидации сходов и т.п. В практике открытых горных работ эти потери времени, как правило, учитываются путем уменьшения годового фонда времени до 320-330 рабочих дней. Такие же результаты дают и ориентировочные расчеты для условий Качканарского ГОКа. Таким образом, годовая провозная способность схемы путевого развития железнодорожного транспорта рудовозного района на настоящий момент при современном состоянии горно-транспортного оборудования, горных работ и транспортных коммуникаций находится в пределах 65—68 млн т по горной массе. Для реализации этих объемов перевозки горной массы необходимый рабочий парк подвижного состава составит порядка 31—33 ед.

Таким образом, предусмотренное проектом к 2111 г. вовлечение в разработку собственно Качканарского месторождения с соответствующим увеличением объемов перевозок железнодорожным транспортом до 75-76 млн т без коренной реконструкции транспортной системы карьеров невозможно. **ГИАБ**

### Коротко об авторе

Бахтурин Ю.А. — кандидат технических наук, ИГД УрО РАН;  
e-mail: direct@igd.uran.ru

