

## ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.271.3

### МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ИНСТРУМЕНТАРИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГОРНЫМИ РАБОТАМИ НА КАРЬЕРАХ. Ч. I: СИСТЕМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В КОНТЕКСТЕ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ДОБЫВАЕМОГО ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО

Е. В. Фрейдина<sup>1,2</sup>, А. А. Ботвинник<sup>1</sup>, А. Н. Дворникова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет экономики и управления,  
ул. Каменская, 52, 630091 г. Новосибирск, Россия

Обоснована актуальность, изложены концепция, принципы и инструментарий применения робастного управления в приложении к предприятиям по открытой добыче твердых полезных ископаемых. Показано, что на всех этапах для управления качеством выстраиваются пределы допустимой флуктуации показателей свойств добываемых углей и производительности погрузочного оборудования, а также ограничения на пространственное развитие элементов рабочей зоны разреза. Создание устойчивой работы производственной системы в установленных пределах и ограничениях — цель и возможности робастного управления. Представлены методологические основы и инструментарий применения робастного управления при открытой угледобыче.

*Робастность, открытая разработка месторождений, робастное управление, предел допустимых отклонений, управление качеством, геоинформационное моделирование, полные и условно-динамические модели, карты качества, контрольные карты*

#### ВВЕДЕНИЕ

Устойчивое развитие экономики России относится к ведущим парадигмам XXI в. Основываясь на утверждении акад. Н. Н. Моисеева: “Весь мир — многообразие взаимодействующих систем, по своей природе вероятностных, для которых характерна принципиальная стохастичность и принципиальная неустойчивость” [1], приходим к некоторому парадоксу — противоречию между парадигмой “устойчивое развитие” и объективными свойствами социально-экономических систем. С этой позиции деятельность по управлению хозяйствующими субъектами в парадигме устойчивого развития основывается на осознании того, что вариабельность и случайная природа значений параметров системы является объективным свойством ее функционирования.

В качестве фундаментальной направленности разрешения такого противоречия, по нашему мнению, следует рассматривать робастное проектирование и управление технологическими процессами и системами, в основу которого положена теория устойчивости и автоматизиро-

ванные системы управления. Термин “робастность” означает малую чувствительность системы по отношению к возможным ошибкам, неточностям и неопределенностям. Это понятие, на первый взгляд, близко к устойчивости — равновесию системы относительно малых возмущений, но имеет другой смысл. Робастность означает, что существует параллелепипед, внутри которого вырабатываются сигналы случайной природы, размерность которого равна числу управляемых параметров [2]. На изменения внутри этой области система не реагирует, т. е. не вырабатывает управляющих воздействий.

Актуальность введения робастного управления на предприятиях по открытой разработке угольных месторождений обусловлена высокой изменчивостью параметров природно-технологической системы, которой является карьер, и сложностью управления [3]. Изменчивость обусловлена, прежде всего, природой геосреды, а именно качеством полезного ископаемого в запасах месторождения и объективными особенностями функционирования техники — ее периодическими остановками на ремонт и по другим организационно-технологическим причинам, а также случайными отказами.

Сложность управления действующим предприятием возрастает в связи с тем, что проектная система карьера формируется на принципах равновесного состояния как хорошо организуемая система, функционирование которой описывается детерминистической моделью. Равновесное состояние устанавливается на основе равенства средних значений различных управляемых параметров по отдельным взаимосвязанным и взаимодействующим технологическим процессам и системам. Действиями и объектами, вовлекаемыми в равновесное состояние исследуемого предприятия, являются:

— сбалансирование изменчивой природы качества полезного ископаемого с требованиями обеспечения стабильного качества для обогащения и потребления углей коксохимическими и энергетическими производствами;

— “стыковка” по средней эксплуатационной производительности трех взаимодействующих технологических систем, работающих в синхронном режиме и обеспечивающих производственный цикл: экскавация и погрузка, перевозка, складирование и отвалообразование горной массы.

Устойчивое функционирование действующей системы такими решениями не обеспечивается. Снижение флуктуаций качества добываемого полезного ископаемого и мощности подготовленного к работе оборудования и транспортных средств полностью возлагается на управление технологическими процессами. Представление любой действующей системы в виде функционально упорядоченного множества процессов, выходные параметры которых идентифицируют как случайные величины, позволяет отнести систему к вероятностной, а управление ее деятельностью осуществлять в контексте *робастного управления*. При робастной модели управления потребуется установление пределов допустимых колебаний контролируемых параметров с тем, чтобы исключить реакцию на допустимое отклонение и не упустить реакцию на существенное отклонение.

Переход с проектного конструирования системы технологической системы карьера по усредненным показателям как качества полезного ископаемого, так и объемов работ к робастному (прочностному) проектированию и управлению, способствующим минимизации производственных и коммерческих рисков при освоении месторождения, потребует разработки специальных методик и методов по осуществлению робастного управления в приложении к добывающим предприятиям. Введение робастного управления на действующем предприятии должно обеспечиваться автоматизированным управлением технологическими процессами и планированием

горных работ и работ по восстановлению горной и транспортной техники. Статья посвящена постановке проблемы обеспечения перехода к робастному управлению действующим карьером и робастному проектированию освоения месторождений.

### КОНЦЕПЦИЯ РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Качество минерально-сырьевой продукции устанавливается на двух стадиях: формирование качества и управление им. Формирование качества полезного ископаемого основывается на совокупности характеристик, относящихся к его способности удовлетворять установленным или предполагаемым потребностям, и закладывается на стадиях проектирования и планирования горных работ.

Управление качеством состоит в максимизации степени соответствия основных характеристик требованиям, т. е. в стабилизации контролируемых показателей качества. Стабилизация качества полностью возлагается на организацию процессов технологии добычных работ и подготовки добытого полезного ископаемого к переработке.

Результативность планирования и управления качеством определяется рядом принципов:

- качество любой продукции может стать объектом управления, если его можно измерить;
- чем представительнее состав показателей качества, тем полнее характеризуется способность и пригодность продукции к удовлетворению заданных потребностей;
- качеством можно управлять только тогда, когда измерение свойства посредством показателя качества производится с необходимой достоверностью;
- поскольку стоимость продукции зависит от качества и определяет ее цену на рынке, управление качеством в значительной мере есть и управление экономикой предприятия.

Измеряемые характеристики качества априори относятся к классу случайных величин, изменчивость которых носит объективный характер. Чтобы при управлении распознавать существенные и несущественные отклонения от планового значения, необходимо ввести предел допустимых колебаний и таким образом перейти к робастному управлению. Основной его принцип — размах параметров функционирования процессов должен допускаться на уровне устойчивого или асимптотически устойчивого равновесия.

Основываясь на этом положении, дадим определение концепции формирования робастной устойчивости в контексте управления качеством добываемого угля. Управление качеством состоит в максимизации соответствия показателей свойств углей требованиям потребителей. Каждый из показателей свойства имеет свой предел допустимых изменений, чем и определяется робастная устойчивость.

Принятие проектных и плановых решений о качестве добываемых углей основывается на многоцелевой и многовариантной оценке использования запасов. Она начинается с максимизации коммерческого потенциала месторождения (определяются состав готовой продукции и количество ее в соответствии со структурой спроса) с дальнейшим переходом на стабилизацию главного и нескольких основных единичных показателей по всем процессам технологии добычи углей.

Необходимость такой постановки проблемы управления качеством объясняется требованиями технологий сжигания и переработки углей и “привязкой” объектов энергетики и коксохимии к конкретным угольным месторождениям. В государственных стандартах на качество углей допустимое отклонение от нормативного значения для потребителя составляет, например, для энергетических углей содержание золы на уровне  $\pm 1-2\%$ , для коксующихся углей толщина пластического слоя  $\pm 1-2$  мм. Таким характером требований к качеству угольной продукции определяется актуальность развития робастного управления качеством добываемых углей.

## ПРОЦЕДУРЫ РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПО ЭТАПАМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПЛАНИРОВАНИЯ ДОБЫЧНЫХ РАБОТ

Рассмотрим возможности и способы осуществления процедур робастного управления с использованием результатов исследований в области геоинформационного моделирования пластовых месторождений и карьеров, функционирования технологических систем и процессов горных работ в режиме системы управления качеством, принятым в практике проектирования карьеров [4–6].

*Этап 1.* Задача определения характера изменчивости качества полезного ископаемого, состоящая в оценке вариантов направления развития горных работ [7], ставится уже на начальной стадии освоения месторождения. Исходная информация о качестве по каждой угольной залежи начинается с геолого-технологического картирования запасов и представляется картой качества. Карты качества — это графическое отображение поверхности залежи или ее части с разделением на зоны, однородные по уровням значения какого-либо показателя качества. Алгоритм построения карты качества обуславливается типом показателя исследуемого свойства полезного ископаемого: единичный, комплексный, обобщенный. В простейшем случае она строится по скалярной величине, например карта зольности. Этот вид картирования может быть выполнен в автоматизированном режиме по разработанным алгоритмам и программам [6]. При использовании комплексного или обобщенного показателя, например приведенной энергетической ценности  $e_n$  или класса качества, алгоритм усложняется, так как необходима специальная обработка исходной информации.

Для каждого направления развития горных работ на карте качества на всех пластах свиты наносятся границы технологических заходов. В них определяются объемы и характер изменения управляемых и контролируемых показателей качества углей. На основе этой информации строятся графики и дается статистическая оценка изменения показателей качества вдоль направления предполагаемого развития горных работ: среднее арифметическое значение, его размах и среднеквадратичное отклонение, коэффициент вариации. Карта качества пласта дополняется результатом статистической обработки данных детальной разведки месторождения.

Проработка вариантов развития добычных работ осуществляется на основе вычислительного эксперимента на модели месторождения, карт качества угольных залежей и оптимизационных моделей отработки запасов. Поставленные и реализуемые на практике цели формирования качества добываемых углей на основе специальных классов математических моделей функционирования технологических систем (ТС) приведены в табл. 1 [5].

Как только ставится цель стабилизация показателей качества, то возникает вопрос об уровне стабилизации. Получить тривиальное или асимптотическое равновесие управляемой величины практически не удастся. Всегда существуют отклонения от желаемого равновесного состояния. В этом случае требуется установить границы допустимого отклонения от средней или нормируемой величины ( $\pm \Delta$ ) или границы устойчивого равновесия в изменении управляемой переменной.

Разнородностью совокупности свойств обуславливается разделение показателей качества на главный, комплексный, основные единичные и дополнительные. Ввести в границы устойчивого равновесия главную управляемую переменную  $y_{ij}$  на стадии проработки вариантов развития и планирования добычных работ позволяет использование в моделях оптимизации в ранге целевых функции равномеризации следующего вида:

$$\max_{j \in T} |y_{kij} - y_j| \rightarrow \min, \tag{1}$$

$$\min_{j \in T} y_j \rightarrow \max, \tag{2}$$

$$y_j = \frac{\sum_i x_{kij} y_{kij}}{\sum_i x_{kij}}, \tag{3}$$

где  $y_{kij}$  — главный контролируемый показатель качества угля;  $y_j$  — нормативное значение главного показателя качества угля;  $x_{kij}$  — объем добытого угля,  $k$  — номер забоя,  $i$  — номер блока,  $j$  — номер периода.

ТАБЛИЦА 1. Цели оптимизации управления качеством и модели функционирования технологических систем

Назначение модели	Цели и классы моделей
Модели функционирования технологических систем с формированием <b>общего</b> потока углей	Обеспечение равномерной по периодам интенсивности отработки запасов углей при условии выполнения ограничений на разброс значений показателей качества с применением условно-динамических моделей
	Стабилизация главного и основных показателей качества добываемых углей с применением полных и условно-динамических моделей
	Максимизация выхода углей более высокого класса качества с применением полных и условно-динамических моделей
	Максимизация выхода концентрата коксующихся углей при условии выполнения ограничений на разброс значений показателей качества с применением полных и условно-динамических моделей
Модели функционирования технологических систем с формированием <b>раздельных</b> потоков углей	Обеспечение равномерной по периодам интенсивности отработки запасов углей при условии выполнения ограничений на разброс значений показателей качества с применением условно-динамических моделей
	Стабилизация основных показателей качества добываемых углей с применением полных и условно-динамических моделей
	Оптимизация выхода углей более высокого класса качества с применением полных и условно-динамических моделей
	Максимизация выхода концентрата при условии выполнения ограничений на разброс значений показателей качества с применением условно-динамических моделей
	Стабилизация соотношения объемов добычи двух типов углей с применением полных и условно-динамических моделей

Так как качество добытого угля характеризуется несколькими, как правило независимыми показателями, то кроме главного управляемого показателя, как в случае целевой функции (1) и (2), значения всех остальных показателей ( $P_e, e = 1, 2, \dots, E$ ) на основе принципа робастности ограничиваются пределами:

$$\bar{P}_e - \Delta_e \leq \bar{P}_{ej} \leq \bar{P}_e + \Delta_e, \quad e = \overline{1, E}, \quad j = \overline{1, J}. \tag{4}$$

Неравенства вида (4) являются также ограничениями для главного показателя качества целевой функции (2). Допустимый размах изменения каждого единичного показателя качества ( $\pm \Delta$ ) определяется требованиями принятой технологии переработки или потребления конечного продукта угля. Таким образом, можно считать, что допустимые значения для  $E$  показателей качества получены в некотором параллелепипеде конечномерного векторного пространства и тем самым осуществляется переход к робастному управлению.

Выбор приоритетных вариантов основывается на прогнозе с учетом данных детальной разведки, ожидаемого состава и качества готовой продукции, составляющих коммерческий потенциал месторождения [8]: класса качества или марки углей, математического ожидания и допустимого размаха значений показателей качества, выхода концентрата.

Традиционно на выбор варианта развития горных работ в большей степени оказывает влияние такой горнотехнический фактор, как величина и характер изменения коэффициента вскрыши в начальные годы работы карьера, в частности минимальное значение коэффициента вскрыши. Тем не менее оценка возможностей как по реализации качественного потенциала месторождения, так и по управлению вскрышными работами позволяет обосновать оптимальный вариант развития добычной и вскрышной зон карьера.

**Этап 2.** Планирование ведения добычных работ в режиме управления качеством начинается с конструирования рабочей зоны карьера, элементами которой являются уступы и заходки по пластам в соответствии с заданным углом рабочего борта карьера. В проект конструкции рабочей зоны карьера вводятся карты качества. По элементам системы разработки вычисляются статистические функции изменения качества, т. е. модели изменения качества в запасах месторождения.

На созданной информационной основе проводится проработка вариантов управления качеством с использованием математических моделей, приведенных в табл. 1. Из периодов планирования выстраивается некоторая иерархия. Верхний уровень — разработка плана на три года с развертыванием плана по месяцам и использованием данных предварительной и частично детальной геологической разведки. Второй уровень — годовое планирование с развертыванием плана по месяцам и суткам по картам качества, отстроенным по данным детальной разведки. Третий уровень — месячное планирование с развертыванием плана по суткам по картам качества, актуализированным данным детальной и частично эксплуатационной (опережающей) разведки. Четвертый уровень — оперативное планирование с использованием карт качества с актуализацией информации по данным эксплуатационной разведки. Проработку возможностей по управлению качеством предусмотрено проводить по следующим целевым установкам:

- стабилизация качества;
- максимизация выхода концентрата со стабилизацией качества;
- максимизация выхода углей более высокого класса качества и стабилизация показателей качества;
- стабилизация соотношения объемов добычи разных классов или типов углей (коксуемых и энергетических), мало- и высокозольных, а также углей и породы.

Очевидно, что возможности реализации каждой из целевых установок зависят от конфигурации технологической системы ведения добычных работ, включая управление потоками добываемых углей (см. табл. 1). На стадии планирования требуется с помощью вычислительного эксперимента дать оценку влиянию процессов и организации добычных работ (включая усреднительные и подшихтовочные емкости) на формирование качества и его стабилизацию.

В роли управляемых параметров технологии и организации добычных работ выступают:

- 1) полнота и адекватность картирования запасов и подготовка пакета карт качества, включающего как карты по единичным показателям, так и обобщенную карту качества по подготовленным запасам;
- 2) длина фронта подготовленных к выемке запасов ( $i = 1, 2, \dots, L$ );
- 3) количество действующих экскаваторов (или забоев) —  $k = 1, 2, \dots, M$ ;
- 4) найденные маршруты перемещения экскаваторов в добычной зоне карьера ( $S_{ki}$ ), обеспечивающие достижение среднего или близкого значения главного и основных показателей качества;

5) интенсивность отработки запасов ( $x_{ikj}$ ) по маршрутам ( $S_{ki}$ ) и периодам  $j$ : равномерная или дифференцированная;

6) наличие резервных забоев и резервной мощности экскаваторов при ограниченном их количестве;

7) структура выходящих из карьера потоков углей:

— общий поток, включающий  $N$  забойных потоков;

— отдельные потоки по уровням качества углей;

— отдельные потоки по свойствам обогатимости углей;

— общий поток с подключением подшихтовочных складов;

— отдельные потоки для подачи на усреднительные склады;

8) упорядоченная последовательность транспортных средств с целью создания потока с высокочастотной изменчивостью качества в выходящем потоке углей.

Рассмотрим процедуры установления значений приведенных параметров в моделях планирования и управления добычными работами.

Информационное обеспечение для принятия решений на стадии планирования включает карты качества с актуализацией их данными детальной и эксплуатационной разведки. Состояние фронта подготовленных к отработке запасов зависит от множества факторов, определяемых, в частности, комплексом работ по развитию вскрышной зоны карьера, а также по проведению детальной и эксплуатационной разведки в целях уточнения данных по качеству углей в запасах фронтальной заходки. Цель их организации состоит в том, чтобы подготовленные к отработке запасы были документированы в виде пакета карт качества.

Процесс формирования качественных характеристик выходного потока угля, образованного в результате смешения угля из нескольких забоев (пластов) можно сравнить с явлением нестационарной волновой интерференции, при котором амплитуда суммарного потока может варьировать от нуля до суммы амплитуд интерферирующих волн. Продолжая эту аналогию, отметим, что управление амплитудами интерферирующих волн для суммарного потока угля означает, что в карьере может быть организовано поступление угля из забоя в задаваемом режиме, что позволяет отслеживать изменчивость показателя качества в суммарном потоке. Расстановка добычных экскаваторов по фронту работ зависит от возможности получить управляемые характеристики качества углей в выходном потоке и выполняется на основе данных решения задачи оптимизации следующего вида.

Будем считать, что расстановка экскаваторов обусловлена элементами “интегрирующей” функции  $F(P_k, L_{k,j}, x_{k,i})$ , где  $P_k$  — значение главного (или основного) показателя качества вдоль фронта работ,  $L_{k,j}$  — местоположение экскаватора к началу периода  $j$ , определяемое координатой текущей точки залежи на уступе,  $x_{k,i}$  — объем добычи в забое  $k$  в период  $j$ . В этих обозначениях целевая функция расстановки экскаватора на начало периода запишется как

$$\left| \frac{\sum_{k=1}^M F(P_k, L_{k,j}, x_{k,i})}{\sum_{k=1}^M x_{kj}} - P_j \right| \rightarrow \min. \tag{5}$$

При построении блочной модели запасов месторождения “интегрирующая” функция внутри блока является линейной:

$$F(P_k, L_{k,j}, x_{k,i}) = \alpha_j P_k + \beta_j. \tag{6}$$

Как следует из выражения (5), цель решения задачи состоит в поиске минимального отклонения главного показателя качества в планируемых к добыче углях. Критерием оценки результата решения задачи является величина  $D_y$ , равная отношению  $\Delta_y$  к допустимому отклонению контролируемого показателя в потоке, поступающем на обогащение  $\Delta_y^o$ , или в готовой продукции  $\Delta_y^p$ , т. е.

$$\Delta_y \leq D_y \Delta_y^o. \quad (7)$$

Произведение  $D_y \Delta_y^o$  — допустимое отклонение, по которому устанавливаются верхний и нижний пределы в контрольной карте качества планируемых к добыче углей.

Определив координату стояния экскаватора на начало периода  $j$ , переходим к решению задачи последовательности отработки блоков экскаваторами  $M$  в добычной зоне — к “раскройке” запасов. Задачи данного класса в публикациях по управлению качеством оставлены без должного внимания. На наш взгляд, изложение подхода к постановке задачи и построению модели оптимизации “раскрытки” запасов с определением траектории движения экскаваторов в добычной зоне карьера существенно дополнит основы оптимизации управления качеством.

В модели технологической системы действия комплекса добычных экскаваторов представляются как множества состояний на заданном временном интервале. Каждое состояние формируется некоторым количеством работоспособных экскаваторов и определяется их возможной производительностью, объемом и качеством подготовленных к выемке запасов, технологическими возможностями перемещения экскаватора в пределах рабочей зоны карьера.

Оптимальными будут считаться такие последовательности блоков, при которых обеспечивается добыча полезного ископаемого с наиболее стабильным качественным составом по периодам  $j \in U$ . Целевая функция для решения задачи по “раскройке” запасов представляется выражением (2), “подтягивающим” значения показателя качества меньше среднего и снижающим значения выше среднего. Тем самым осуществляется его равномеризация относительно среднего значения.

Построение математической модели основано на следующих процедурах. Пусть на заданном временном интервале управления качеством, разделенном на  $U$  периодов, на добыче используется  $M$  экскаваторов, для которых проведена первоначальная расстановка по фронту работ. Добычные работы ведутся на  $n = 1, 2, \dots, H$  уступах. Запасы разделены на множество  $G$  экскаваторных заходок. В каждой заходке  $g \in G$  выделены геолого-технологические блоки  $i_g$ , где  $i$  — номер блока в заходке  $g$ . Переход на каждую последующую заходку возможен при условии, что не нарушается допустимое опережение вышележащего уступа:

$$\frac{1}{S_g} \left( \sum_{j'}^j V_{nj'} - \sum V_{n-1,j'} \right) + B_{n-1,j} \geq B_{n,\min}, \quad (8)$$

где  $S_g$  — площадь продольного сечения заходки  $g$ ;  $B_n$  — ширина рабочей площадки на уступе  $n$ ;  $V_{nj}$  — объем геолого-технологического блока  $i$  заходки  $g$ .

Для каждого экскаватора существует несколько допустимых действий на заданной последовательности блоков и заходок. Формализация их такова: экскаватор остается в прежнем блоке (0), продвижение экскаватора по заходке налево — (−1), направо — (+1), переход на следующую заходку — (2). Запасы углей, подлежащие отработке, представляются множеством блоков  $R$ , состоящим из трех подмножеств:  $R_1$  — блоки с низким (или высоким) качеством полезного

ископаемого, предназначенные для отдельной выемки и отгрузки;  $R_2$  — “перегонные” блоки (не подлежащие отработке);  $R_0$  — блоки, из которых формируются объемы добычи. Тогда  $(k, i) \in R_0$ , если  $(k, i) \notin R_1 \cup R_2$ .

Основываясь на таком делении запасов, искомыми переменными в модели принимаются величины, представляющие собой возможные объемы добычи экскаваторами на блоках указанных множеств, обозначенные как  $q_{kij}$  и принимающие значения:

$$q_{kij} = \begin{cases} x_{kij} & (k, i) \in R_0 \\ z_{kij} Q_k & (k, i) \in R_1 \\ \varphi_{kij} Q_k & (k, i) \in R_2 \end{cases}, \quad (9)$$

где  $x_{kij} (j \in T, (k, i) \in R_0)$  — объем добычи угля, поступающего в общий поток;  $z_{kij} (j \in T, (k, i) \in R_1)$  — признак отработки выделенных для отдельной выемки блоков,

$$z_{kij} = \begin{cases} 1, \text{ если в период } j \text{ производится отработка блока } (k, i \in R_1), \\ 0 \text{ в противном случае;} \end{cases} \quad (10)$$

$\varphi_{kij} (j \in T, (k, i) \in R_2)$  — признак перегона экскаватора,

$$\varphi_{kij} = \begin{cases} 1, \text{ если перегон экскаватора, соответствующий блоку } (k, i \in R), \\ \text{ производится в период } j, \\ 0 \text{ в противном случае.} \end{cases} \quad (11)$$

Математическая модель с целевой функцией (2) формируется как полная динамическая модель, и решение задачи находится путем одновременной оценки действия комплекса экскаваторов по  $G$  заходкам на всем множестве “элементарных” периодов  $j$ , т. е. методом дискретной оптимизации. Образованная система формально представляется как система с действием прямых и обратных связей. Поиск решения ведется методом дискретного программирования в двух группах ограничений: на управление техническими ресурсами и пространственным развитием добычной зоны. Первая группа ограничений в модели имеет вид

$$\sum_g^G \sum_k^M \sum_i^I x_{kig_nj} = Q_j, \quad j = 1, 2, \dots, U, \quad (12)$$

$$Q_{kj}^{\min} \leq \sum_g^G \sum_i^I x_{kig_nj} \leq Q_{kj}^{\max}, \quad j = 1, 2, \dots, U, \quad (13)$$

$$\sum_j^U \sum_k^M x_{kig_nj} \leq V_{ig}, \quad g \in G, \quad i \in I, \quad (14)$$

где  $Q_j$  — плановый объем добычи в период  $j$ ;  $Q_{kj}^{\min}$ ,  $Q_{kj}^{\max}$  — допустимый предел варьирования производительности экскаватора.

Вторая группа ограничений формализует возможности и варианты управления последовательностью отработки запасов на заданных маршрутах передвижения экскаваторов и включает ограничения, связанные:

- с последовательностью отработки геолого-технологических блоков;
- с отдельной выемкой выделенных по качеству блоков и перегонами;

- с допустимым опережением забоев при работе на смежных уступах, выражение (8);
- с остановками экскаваторов на ремонт.

Аналитически не связанные действия, отраженные в ограничениях второй группы, приводят к введению в модель большого количества булевых переменных, как в выражениях (9)–(11). При этом условии задача, реализуемая на основе полной динамической модели, входит в класс задач большой размерности. Результаты решения задачи, проведенной при небольшом числе переменных, раскрывают большие возможности по сглаживанию изменчивости качества добываемых углей и могут служить эталоном для оценке решений приближенными методами.

Чтобы довести до практической реализации рассматриваемую задачу, разработан приближенный метод “раскройки” запасов с использованием метода случайного поиска. Он основан на генерации некоторого множества допустимых вариантов разбиения запасов в заданных контурах на участки, обрабатываемые каждым экскаватором  $k \in M$  и периодам  $j \in U$ . Генерация каждого варианта производится путем пошагового нахождения траектории продвижения  $w_{kij}$  для каждого экскаватора  $k \in M$  по периодам  $j \in U$ .

Экспериментальные расчеты по определению “раскройки” переходной зоны Нерюнгринского месторождения (Южная Якутия) с установлением траектории передвижения запасов показали, как и при решении задачи с полной динамической моделью с критерием (5), высокую сходимость результатов, полученных за приемлемое для практических расчетов время. На рис. 1 дана иллюстрация результатов решения задачи методом случайного поиска.

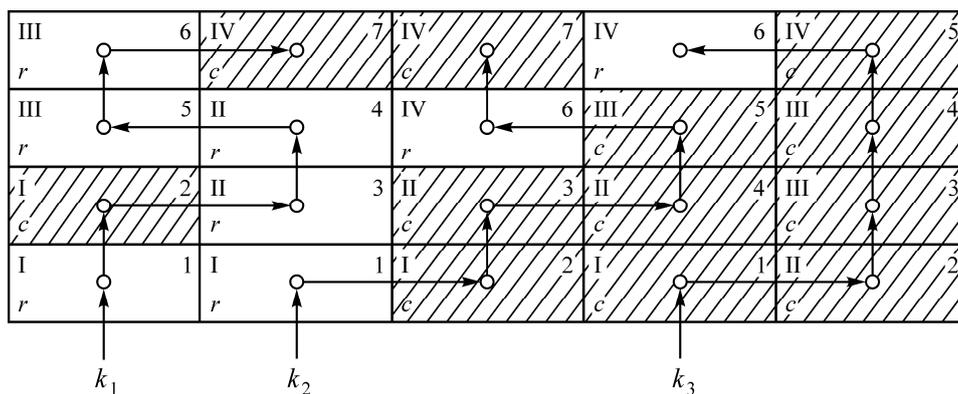


Рис. 1. “Раскройка” запасов углей по траекториям продвижения экскаваторов: I–IV — период; 1–7 — блок  $n$ ;  $r$  — порода;  $c$  — уголь;  $k_1$ – $k_3$  — номер экскаватора

Выделенные траектории продвижения экскаваторов  $w_{kij}$ ,  $k \in M$ , по добычной зоне карьера принимаются за исходную информацию. На следующей иерархии плановых решений рассчитывается детальный план, определяющий интенсивность отработки запасов ( $x_{kij}$ ), осуществляемых комплексом экскаваторов ( $k \in M$ ) по траекториям продвижения ( $w_{kij} \in S_j$ ) периода  $j$  (посуточный цикл) с управлением по выбранной целевой функции (см. табл. 1) и системе следующих ограничений:

- предел на разброс значений главного и основных показателей качества;
- предел варьирования производительностью экскаватора;
- предел продвижения экскаваторов в пространстве добычной зоны;
- ограничения, учитывающие остановки экскаваторов на ремонт, исключаяющие его из работы.

На этом этапе используются два класса моделей: полные динамические и условно-динамические. Структура полной динамической модели планирования добычных работ аналогична описанной ранее модели “раскройки” запасов с тем различием, что в качестве дискретного периода принимается период наименьшей остановки экскаватора на ремонт с последующим дифференцированием полученных данных по соответствующим суткам. С использованием этой модели разрабатывается базовый план, представляющий собой наилучший вариант по стабилизации качества. Возможность по сглаживанию природной изменчивости качества (на примере толщины пластического слоя  $y$ ) при разработке планов с использованием функции равномеризации и полной динамической модели проиллюстрирован на рис. 2.

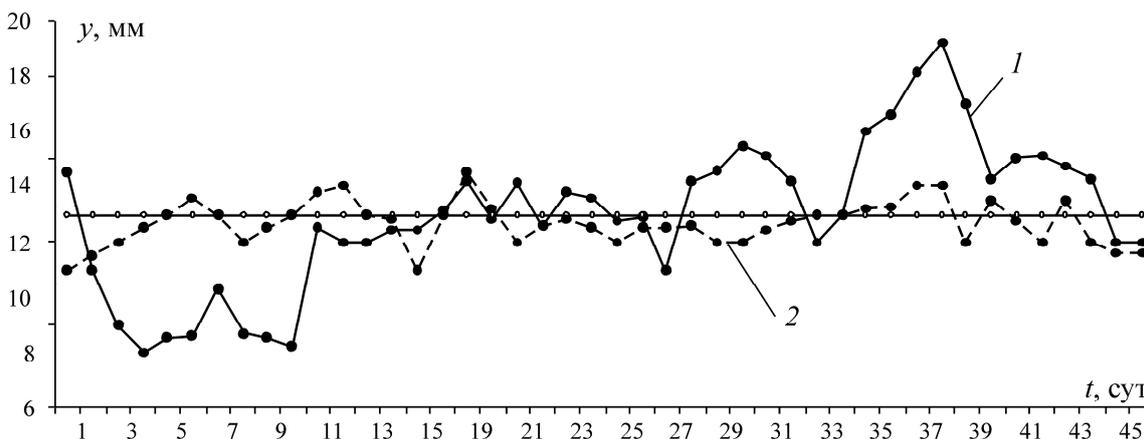


Рис. 2. Природная (1) и технологическая (2) изменчивость качества угля в выходящем из карьера потоке

Условно-динамические модели разработаны с целью сведения сложного к более простому представлению процедуры принятия решений. Получен метод, позволяющий найти решение за приемлемое для практического использования автоматизированных расчетов время. В отличие от полной динамической модели, действия комплекса экскаваторов по отработке запасов, продвигающихся по заданным траекториям, представляются как система, в которой между ее состояниями рассматриваются только прямые связи.

Целевая функция имеет вид

$$\max_{k \in K} \frac{x_{kj}}{W_k - Z_{kj}} - \min_{k \in K} \frac{x_{kj}}{W_k - Z_{kj}} \rightarrow \min, \quad (15)$$

где  $x_{kj}$  — искомый объем добычи экскаватором  $k$  в период  $j$  (сутки);  $W_k$  — заданный объем запасов, подлежащих отработке экскаватором  $k$ ;  $Z_{kj}$  — фактический объем добычи, выполненный экскаватором  $k$  на текущий период  $j$ .

Суть выражения (15) — “сжатие” разброса текущего объема добычи. Задача решается с применением линейного программирования с разработкой процедур линеаризации целевой функции. При целевой функции равномеризации объемов добычи относительно базового плана по всем показателям качества устанавливается предел допустимой их вариации:

$$P_{ej}^c - \Delta_{ej} \leq \frac{\sum_k \sum_i P_{ekij} x_{kij}}{\sum_k \sum_i x_{kij}} \leq P_{ej}^c + \Delta_{ej}, \quad (16)$$

где  $P_{ej}^c$  — плановое (контрольное) значение показателя качества  $e = 1, 2, \dots, E$ , установленное при расчете базового плана;  $\Delta_{ej}$  — допустимое отклонение, которое возможно погасить до требуемого уровня в процессах перевозки, складирования и аккумуляции угля.

В условно-динамической модели выстраивается весь арсенал ограничений на управление техническими ресурсами (11)–(13) и пространственным развитием добычной зоны, например, как (9)–(11) [4].

**Этап 3.** Оперативное управление. Система добычных работ, как и любая производственная система, формально относится к классу вероятностных систем, для которых объективной реальностью является флуктуация выходных результатов. Для рассматриваемой системы — это качество и объемы добычи полезного ископаемого. Потребность в корректировании плана — возвращение системы в пределы устойчивой работы — возникает на вторые или третьи сутки.

Процесс корректирования плана — задача оперативного управления технологическими процессами. Для этой процедуры применяется условно-динамическая модель с целевой функцией (15), ограничениями вида (11)–(13) и ограничениями на пространственное развитие горных работ.

Основная задача оперативного управления состоит в стабилизации качества по всем процессам добычных работ — это выемка и погрузка, перевозка, складирование, аккумуляция. Каждый технологический процесс обладает определенными техническими возможностями по стабилизирующему воздействию на изменение управляемых показателей качества. При выемке — дифференцирование нагрузки на забой, что следует из целевой функции (15). Процесс перевозки углей в системе оперативного управления настраивается на создание высокочастотной изменчивости показателей качества в потоке, поступающем на склад или в бункер с целью повышения эффективности усреднения.

Для выполнения этой задачи перевозка углей выстраивается по дискретным порциям, каждая из которых формируется из нескольких транспортных средств (углевозов). Здесь флуктуация уменьшается за счет технологии усреднения, объема и конструкции устройства: управляемая укладка угля слоями, отработка сформированного склада, выпуск с помощью активного днища бункера большой емкости или дифференцирование углей по качеству в нескольких бункерах малой емкости.

### СПОСОБЫ И ИНСТРУМЕНТЫ СТАБИЛИЗАЦИИ КАЧЕСТВА

Для каждого технологического процесса необходимо установить коридор *допустимых* колебаний показателей, которые способны частично демпфировать последующие после него процессы, и *критических*, требующих изменения организации работ. Как только вводится область допустимых значений (16), то появляется возможность селекции сигналов и отбора таких, на которые необходимо реагировать. Пример ситуаций по селекции сигналов показателя  $X$  от времени  $t$  показан на рис. 3.

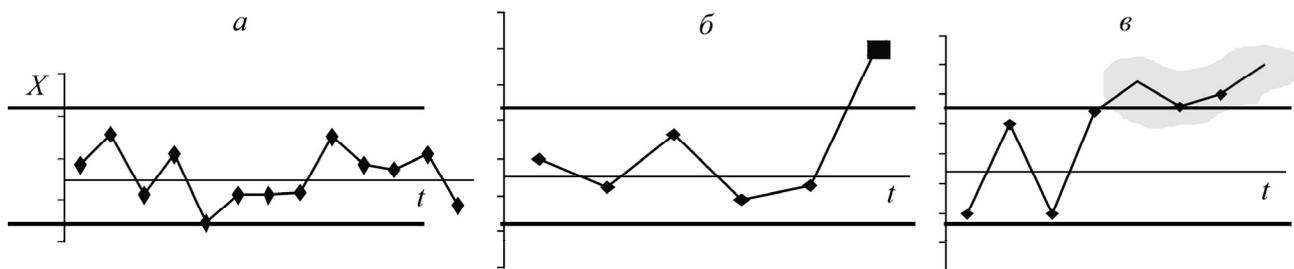


Рис. 3. Ситуации в управлении системой: *a* — устойчивый режим; *б* — появление сигнала к управляющему воздействию; *в* — неустойчивый режим

Предел допустимой флуктуации определяется граничными значениями управляемого показателя, т. е. значениями, при превышении которых управляемая система выходит за границу устойчивости. Тогда цель управления качеством состоит в поддержании управляемых переменных по процессам технологии в заданном диапазоне значений. Задание предела вариации показателей переводит высокочувствительную технологическую систему — карьер — в разряд робастных систем.

В целом способ стабилизации качества добываемых углей, как и любого полезного ископаемого, состоит в последовательном “сжатии” размаха значений показателя качества относительно средневзвешенного его значения, сформированного при выемке, по процессам технологии добычи и подготовки углей к переработке (рис. 4).

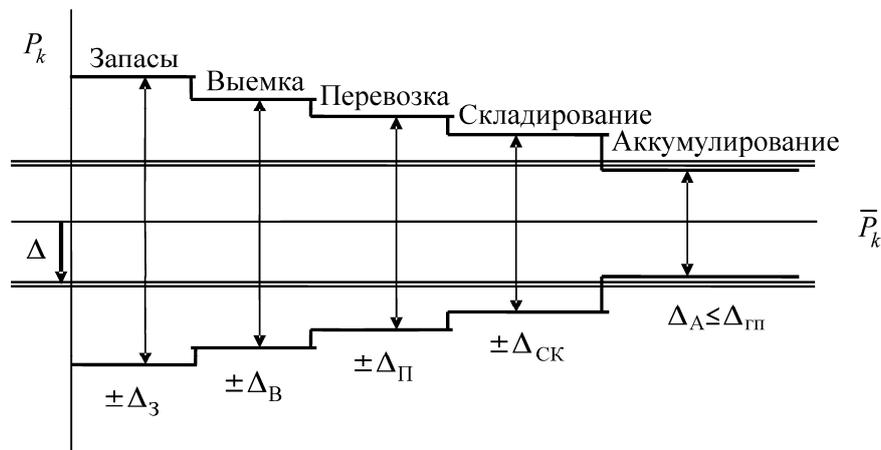


Рис. 4. Шаблон контрольной  $\Delta$ -карты для управления качеством по процессам добычи полезного ископаемого:  $P_k$  — показатель качества;  $\Delta$  — средневзвешенное отклонение показателя

Представленный шаблон стабилизации качества при оперативном управлении инициирует такой управленческий процесс, как выстраивание контрольных карт качества, рассматривая их как инструменты статистического управления качеством.

К типам карт, соответствующих условию управления качеством полезного ископаемого, следует отнести контрольную карту расположения исследуемого средневзвешенного значения показателя  $\bar{P}$ , именуемую в каталоге контрольных карт качества  $\bar{X}$ -карта, и карту размаха  $\Delta$  единичных значений, именуемую  $R$ -карта [9]. Это не исключает введение карты расположения значений единичного показателя ( $X$ -карта) и карты стандарта отклонения ( $s$ -карта), а также карты с ограничением на разброс объемов отработки запасов углей каждым экскаватором по заданной траектории движения типа  $X$ -карты. В практической деятельности по управлению качеством промышленной продукции, как правило, пользуются совмещенной картой, состоящей из  $\bar{X}$ -карты и  $R$ -карты (рис. 5). Таким образом, ведется двойной контроль изменчивости средневзвешенной величины, так и размаха ее значений.

Переход к робастности в управление технологическими системами и процессами вводит в традиционное управление новые процедуры, такие как:

- установка возмущающих воздействий, относительно которых система и процесс должны обладать устойчивостью;
- определение границ допустимых отклонений исходя из технологических и экономических факторов;

- распознавание сигналов и выделение области флуктуации параметров, способных вывести систему из устойчивого состояния;
- выработка управляющих воздействий для возврата функционирования системы в стационарное состояние, т. е. в пределы допустимых колебаний.

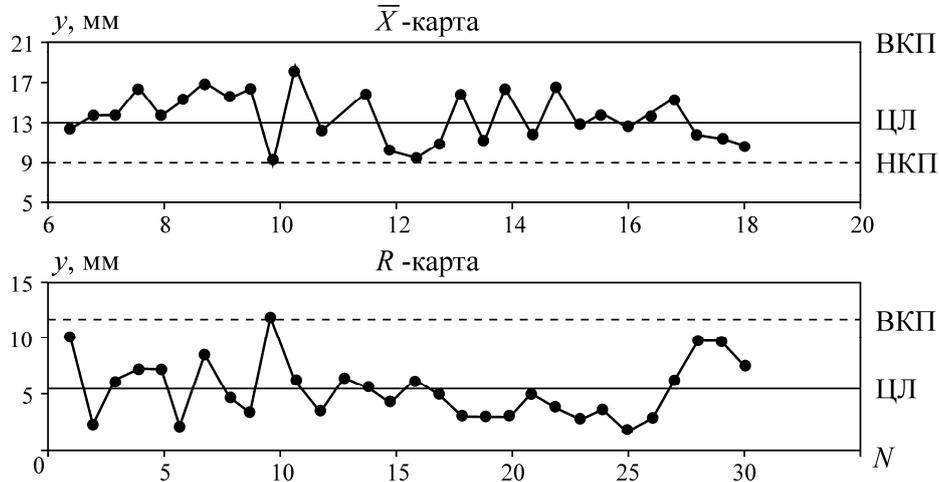


Рис. 5. Фрагмент совмещенной контрольной карты:  $\bar{X}$ -карты и  $R$ -карты; ЦЛ — центральная линия (нормативное значение); ВКП, НКП — верхний и нижний контрольный предел соответственно;  $N$  — номер смены оценки качества полезного ископаемого

Отметим возможности, которые раскрывают изложенные методологические основы и математическое обеспечение для развития робастного (прочностного) управления качеством добываемого полезного ископаемого на карьерах. Создана система для проведения автоматизированных экспериментов и расчетов по всем этапам планирования и управления на модели месторождения, включающая следующие модули:

- геометрическая модель месторождения с пакетами карт качества;
- многовариантная оценка направления развития добычных работ на стадии проектирования;
- конструирование рабочей зоны карьера, элементами которой являются уступы и заходки по пластам в соответствии с заданным углом рабочего борта карьера;
- конструкция рабочей зоны карьера в геологической среде, представленной пакетом карт качества;
- “раскройка” запасов с установлением траекторий продвижения экскаваторов, обеспечивающих определенный уровень стабилизации качества;
- модели технологических систем, обеспечивающие управление качеством;
- разработка развернутых годовых и месячных планов ведения добычных работ в режиме управления качеством;
- разработка регламента функционирования процессов добычных работ и построение контрольных карт качества для каждого процесса;
- технико-экономическое обоснование состава готовой продукции, в наибольшей степени реализующего потенциал месторождений и удовлетворяющего запросам рынка.

## ВЫВОДЫ

Математическое представление целей на всех этапах постановки задачи по управлению качеством отражает действия по равномеризации некоторого вектора показателей качества. Равномеризацией достигается не равновесие, а определенная устойчивость, при которой не утра-

чивается качество продукции. В результате управляющее воздействие на процессы формирования и управления качеством состоит в поддержании устойчивости и в реакции на состояние выхода процесса из коридора устойчивости. Таким образом, управление качеством полностью встраивается в модель робастного управления и переводит принятие решений на новый “прочностной” уровень с минимизацией рисков.

Эффективность достижения равномеризации определяется пределом введенных допустимых колебаний измеряемой величины. В теории управления качеством на современном этапе ее развития поставлена для решения новая проблема, состоящая в разработке методов для оценки стоимости соответствия качества продукции требованиям потребителей [10]. Этот факт свидетельствует о том, что происходит движение к тому, чтобы границам устойчивости придать свойство не только потребительской, но экономической робастности. Такую направленность следует отнести к актуальной задаче горной экономики, а управление качеством рассматривать как управление экономикой предприятия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Моисеев Н. Н.** Алгоритмы развития. — М.: Наука, 1987.
2. **Певзнер Л. Д.** Теория систем управления. — М.: Изд-во МГГУ, 2002.
3. **Freidina E.V., Botvinnik A. A., Dvornikova A.N.** On problem of the quarry management as a robust system, Proceedings of National scientific and technical conference of automation with international participation, Sofia, 2006.
4. **Фрейдина Е. В., Третьяков А. С., Молотилов С. Г.** Методы текущего планирования на карьерах. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 1988.
5. **Щадов М. И., Фрейдина Е. В., Ботвинник А. А., Дворникова А. Н.** Системное управление качеством углей при открытой разработке месторождений // Уголь. — 2003. — № 2.
6. **Ботвинник А. А., Дворникова А. Н.** Картирование запасов по нескольким показателям при формировании качества угольной продукции // Научные технологии добычи и переработки полезных ископаемых: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2003.
7. **Ботвинник А. А.** Интегрированная модель управления качеством выходного потока угля при открытой разработке свиты пластов // ФТПРПИ. — 2010. — № 3.
8. **Фрейдина Е. В., Ботвинник А. А., Дворникова А. Н.** Геоинформационные технологии в обосновании коммерческого потенциала угольного месторождения // Проблемы комплексного освоения георесурсов: материалы IV Всерос. науч. конф. — Хабаровск, 2011. — Т. 2.
9. **Чекмарев А. Н., Барвинок В. А., Шалавин В. В.** Статистические методы управления качеством. — М.: Машиностроение, 1999.
10. **Фрейдина Е. В., Ботвинник А. А., Дворникова А. Н.** Основы управления качеством добываемых углей в контексте международных стандартов ISO 9000–2000 // ФТПРПИ. — 2008. — № 6.

*Поступила в редакцию 4/II 2014*