

УДК 622.272:622.06

**В.В. Мельник, Л.И. Шулятьева, А.В. Шабловский**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ  
ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
СХЕМ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ШАХТ  
НОВОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ**

*Обоснована необходимость выработки нового подхода к обоснованию основных параметров шахт нового технического уровня. Изложен новый подход к формированию модели современной шахты и совместной оптимизации параметров её технологической схемы в условиях использования высокопроизводительной очистной техники.*

*Ключевые слова: подсистемы шахты, параметры технологической схемы, параметры процессов, совместная оптимизация, технико-технологический потенциал.*

**Семинар № 16**

---

**А**нализ состояния и использования шахтного фонда угледобывающих бассейнов России и Казахстана [1, 2, 3], а также научных направлений оптимизации вариантов его эффективного функционирования на современном этапе экономического развития, позволяет сделать вывод о том, что проблема поиска оптимальных решений при выборе среднесрочной и долгосрочной стратегии, оставаясь недостаточно исследованной, в настоящее время получила новое содержание. Это обусловлено, в первую очередь, реструктуризацией угледобывающих предприятий, а также использованием мировых достижений в области технического перевооружения шахт, что определило необходимость поиска новых научных и методологических подходов обеспечения сбалансированного распределения объемов производства и инвестиций, на основе оценки и рационального использования георесурсов и технико-технологического потенциала с целью создания высокоэффективного производства.

В основу разработки прогрессивных технологических схем шахт были положены наивысшие достижения работы шахт бывшего СССР при использовании технологического оборудования на основных подземных процессах, технико-технологические характеристики которого значительно уступают мировым аналогам, применяемым в настоящее время на шахтах стран СНГ. Это обусловило несоответствие параметров шахт и технологических схем подготовки и отработки запасов параметрам технологических процессов, определяемых для высокопроизводительного оборудования. Отсутствие единого методологического подхода при обосновании целесообразности принимаемых решений приводило к неэффективности применения метода непрерывной оптимизации вариантов развития шахт на различных стадиях её эксплуатации. Научные исследования посвящены либо решению проблем оптимизации технологических схем вскрытия, подготовки и отработки, либо оптимизации параметров отдельных про-

цессов производства. При этом обоснование выбора технологических схем и их параметров осуществлялось с использованием среднебассейновых или среднеотраслевых нормативных параметров технологических процессов, а обоснование параметров технологических процессов и подсистем – с использованием нормативных параметров технологических схем, что приводило, и в том, и в другом случае, к созданию статических моделей. Такой подход приводит к погрешности расчётов. При обосновании оптимальных вариантов использовались либо стоимостные параметры, рассчитанные с учётом ограниченного числа влияющих факторов, либо фактические данные работы шахт, что усиливало статический характер модели, ограничивало сам процесс оптимизации и приводило к необходимости разработки механизма оптимизации для конкретной задачи исследования.

Решение проблемы оптимального комплексного использования и развития шахтного фонда может быть осуществлено на основе разработки нового научно-методического подхода к моделированию и совместной оптимизации параметров технологических схем шахт с целью создания высокоэффективного производства и обеспечения необходимых темпов его развития путём рационального использования георесурсов, материальных и финансовых средств. В основу реализации методологии положены следующие принципы:

1. Повышение эффективности подземной угледобычи в сложных горно-геологических условиях обеспечивается путём разработки метода совместной оптимизации параметров технологических схем и поэтапного проектирования долгосрочного развития шахт нового технического

уровня. Преемственность принимаемых на каждом этапе проектных решений обеспечивается путём их увязки с существующими технологическими схемами вскрытия и подготовки запасов.

2. Классификация факторов, учитывающих условия разработки угольных пластов, которые определяют единое информационное пространство, позволяет рассматривать шахту как сложную геотехнологическую систему с иерархической структурой, определяемой подсистемами «запасы», «технологические схемы вскрытия, подготовки и системы разработки пластов», «технологические схемы процессов подземных горных работ» для установления взаимосвязи их параметров и ограничений для разработки проектных решений, обеспечивающих создание высокоэффективных производств.

3. Формирование проектных решений строящихся и действующих шахт, обеспечивающих высокую эффективность их работы, осуществляется на основе синтеза адаптируемых к горно-геологическим условиям залегания пластов и взаимопределяемых технологических схем вскрытия и подготовки и технологических схем процессов подземных горных работ.

4. Высокий уровень интенсификации горного производства обеспечивается за счёт рационального использования высокопроизводительного оборудования на основных подземных процессах, что достигается путём совместной оптимизации параметров технологических процессов дегазации, подготовки и отработки запасов, а также транспортирования угля в шахте.

5. Высокая адаптивность параметров технологических схем выделенных подсистем при обосновании рациональной технологической схемы

шахты нового технического уровня к сложным горно-геологическим условиям обеспечивается посредством такого оптимального сочетания технологических схем вскрытия, подготовки и отработки пластов и параметров применения единого подхода к их формированию, основанного на применении расчётно-аналитических методов, а также методов пооперационного и математического моделирования.

6. Высокий уровень эффективности принимаемых проектных решений обеспечивается путём совместной оптимизации параметров конструктивных элементов технологических схем вскрытия и подготовки запасов и технологических схем процессов подземных горных работ с учётом пространственно-временной динамики их изменения в соответствии с комплексом решаемых задач на определённом этапе развития горных работ.

7. Повышение эффективности использования шахтного фонда, а также всех источников финансирования угледобывающей компании, определяющей единую инвестиционную стратегию, обеспечивается посредством концентрации во времени и пространстве собственных и привлечённых источников финансирования, максимальной реализации геотехнологического потенциала входящих в её состав шахт.

8. Высокий уровень достоверности результатов обоснования рациональных параметров технологических схем строящихся и действующих шахт обеспечивается за счёт использования методов пооперационного моделирования параметров технологических процессов (посредством формирования оптимального баланса рабочего времени), применения математических методов их совместной оптимизации с учётом пространственно-

временной динамики развития горных работ на любом этапе разработки и принятия проектных решений.

В соответствии с принятыми направлениями исследования взаимного влияния параметров технологических схем и технологических процессов, установления закономерности их формирования, решение проблемы повышения эффективности работы угледобывающих компаний осуществляется в двух направлениях, имеющих единую цель:

- обоснование параметров технологических схем при проектировании новых горизонтов действующих и строящихся шахт нового технического уровня на основе их совместной оптимизации, которая преследует цель выявить их технико-технологический потенциал в обеспечении максимально возможного объёма угледобычи, резервов её роста;

- распределение объёмов производства по шахтам угледобывающей компании таким образом, чтобы обеспечить стабильность угледобычи при рациональном использовании геотехнологического потенциала, согласно принятым на себя коммерческим обязательствам.

Шахта может рассматриваться как сложная геотехнологическая система, формируемая путем оптимального сочетания взаимоувязанных подсистем, которые в свою очередь могут рассматриваться как сложная технологическая взаимосвязь составляющих ее подсистем второго порядка.

Основополагающими условиями их выделения являются:

- их функциональная и технологическая однородность;

- четко выраженная иерархия внутреннего построения;

- внутренняя логическая взаимосвязь и многовариантность развития.

Выделены подсистемы шахты первого порядка:

I - подсистема «Запасы», её элементы – запасы вскрытые, подготовленные, готовые к отработке;

II - технологические схемы вскрытия, подготовки и системы разработки пластов – подсистема ТСВП;

III - технологические схемы процессов, реализующих данные технологические схемы во времени и пространстве - ТСПР.

Формирование структуры геотехнологической системы «шахта» представлено на рис. 1.

Подсистема «Запасы» представляет собой совокупность её элементов, характеризующих горно-геологическими условиями залегания, количественные параметры которой и ее качественные составляющие определяют формирование подсистем ТСВП и ТСПР.

Формирование и развитие подсистемы ТСВП осуществляется под воздействием параметров подсистемы «Запасы». Элементами подсистемы являются: способ вскрытия, схема вскрытия шахтного поля, схема подготовки, способ отработки пластов в шахтном поле, система разработки и порядок ввода лав в эксплуатацию. Они характеризуются следующими качественными и количественными параметрами: типами технологической схемы вскрытия шахтного поля, способов вскрытия, схем подготовки и систем разработки угольных пластов, общими объемами проведения вскрывающих и подготавливающих горных выработок и их поддержания в период эксплуатации, их количеством и протяжённостью, углом наклона, максимальным количеством одновременно проводимых горных выработок, максимальным количеством одновременно обрабатываемых очистных забоев.

Подсистема ТСПР представляет собой совокупность взаимосвязанных

технологических схем процессов в шахте. Она может рассматриваться также как сложная система взаимодействия элементов - технологических схем процессов угледобычи – подсистем второго порядка, характеризующих совокупностью количественных и качественных параметров:

II-1 - технология очистных работ – технологическая схема очистных работ, элементами являются очистной забой и сопряжения (верхнее и нижнее), параметры элементов: способ выемки угля и средства механизации очистного забоя, способ крепления очистного забоя и сопряжений, способ управления кровлей, способ транспортирования угля до магистральных выработок (в пределах выемочного столба), схема проветривания очистного забоя, длина столба, длина лавы, вынимаемая мощность пласта, коэффициент присечки породы;

II-2 – технология проведения горноподготовительных выработок – схема работы горноподготовительного забоя, элементом является проводимая горная выработка, её параметры: тип выработки (протяженная, непротяженная), способ проведения, способ крепления выработок, тип крепи, способ транспортирования горной массы до магистральных выработок, наличие закруглений, механизация процесса, типы оборудования, схема его размещения и работы в забое, количество единиц используемого оборудования, способ проветривания и пылеподавления, общая длина, площадь сечения в черне и в свету, коэффициент присечки породы, плотность установки крепи, угол наклона выработки;

II-3 – технология поддержания горных выработок – технологическая схема поддержания горной выработки, элементом является поддерживаемая горная выработка, её параметры:



тип выработки (протяженная, непротяженная), способ охраны, тип крепи, назначение выработки (вентиляционная, транспортная), схема проветривания, механизация процесса ремонта, тип ремонтного оборудования, схема его размещения и работы в выработке, количество единиц используемого оборудования, общая длина или объем, площадь сечения в свету, коэффициент присечки породы, плотность установки крепи, угол наклона выработки;

II-4 – технология монтажа-демонтажа оборудования в шахте – технологические схемы монтажно-демонтажных работ, элементами являются типы технологического оборудования принятого к монтажу-демонтажу, способ доставки оборудования к месту ведения работ и способ их механизации, а также объекты монтажа-демонтажа: очистной забой, горноподготовительный забой, транспортная выработка или сеть выработок, параметры оборудования;

II-5 – технология дегазации, предотвращения внезапных выбросов – технологическая схема дегазации, элементами являются объекты дегазации: угольный пласт или свита пластов, выемочное поле, выемочный столб, вмещающее пространство проводимой горной выработки, параметры элементов: способ и технологическая схема дегазации, используемое оборудование, диаметр и длина дегазационных скважин;

II-6 – технология управления кровлей в очистном забое – технологическая схема управления кровлей, элементами которой является кровля в выработанном пространстве выемочного столба, параметры элементов: способ и технологическая схема обрушения кровли, тип кровли, используемое оборудование, его параметры длина лавы, шаг обрушения;

II-7 – технология транспортирования в шахте – схемы транспорта угля, породы, материалов, оборудования и людей в шахте, элементами являются способ транспортирования, магистральные транспортные сети и составляющие их транспортные выработки, характеризующиеся качественными и количественными параметрами: типом транспортного оборудования, протяженностью транспортных сетей, согласно топологии транспортных горных выработок;

II-8 – вентиляция шахты – технологические схемы вентиляции, элементами являются: способ проветривания, оборудование для проветривания шахты и объекты проветривания: поддерживаемые горные выработки, очистные и подготовительные забои, количественные параметры которых (аэродинамические параметры выемочного поля и горных выработок) формируются согласно принятым схемам подготовки, системам разработки, схемам транспорта и их параметрам;

II-9 – технология спуска-подъема угля, породы, оборудования и людей в шахту – технологические схемы спуска-подъема; элементами являются подъемные установки и выработки, в которых они расположены, характеризующиеся качественными и количественными параметрами: назначением (спуск-подъем по вертикальным стволам и шурфам, спуск-подъем по наклонным стволам), видом и типом технологического оборудования, высотой подъема;

II-10 – технология поверхности шахты – технологические схемы размещения угольных складов и породных отвалов, складов оборудования, прочих участков и цехов на территории техкомплекса поверхности шахты, элементами являются технологическая схема транспортирования грузов на поверхности в зависимости от их назначения, сооружения техкомплекса поверхности

и планировочные решения их размещения, которые характеризуются параметрами: назначением, способом транспортирования, видом и типом оборудования, протяженностью транспортных сетей.

Многообразии факторов, формирующих параметры ТС шахты и её подсистем, их тесная взаимосвязь определяют необходимость их классификации не только по количественному и атрибутивному признакам, но и по степени взаимодействия и взаимовлияния, то есть по признаку управляемости. Все факторы, формирующие параметры системы и её подсистем могут быть представлены двумя группами: управляемые, и управляющие, которые в свою очередь могут быть абсолютно управляющими и условно управляющими.

К управляемым относятся те из них, нейтрализация негативного воздействия которых на те или иные параметры возможна путём использования определённых технических средств, технологических, организационных и экономических решений. Эти факторы формируют множество вариантов, а также области определения функций переменных величин. К ним относятся: газоносность пласта, обводнённость, склонность к внезапным выбросам угля и газа, а также параметры процессов при их совместной оптимизации.

К управляющим факторам причислены все факторы, которые либо невозможно изменить, а только учитывать при принятии того или иного решения, либо они приняты в качестве ограничений при выборе этих решений. К абсолютно управляющим факторам относятся большинство количественных горно-геологических характеристик пластов. При установлении взаимосвязей между отдельными факторами и параметрами они принимаются либо как некоторая детерминанта, либо как

некоторое распределение вероятности этого фактора, количественное определение которого возможно с учётом некоторой доли неопределённости. При формировании моделей – это факторы, ограничивающие принятие решения. К условно управляющим факторам относятся те, которые могут быть изменены в зависимости от изменения стратегии, например, объёмы производства продукции сроки строительства объекта инвестирования.

Эффективное функционирование всей технологической системы достигается путем оптимального сочетания параметров элементов этих подсистем с использованием метода принятия решения на основе исследования целевой функции и её ограничений, формируемой в зависимости от решаемой задачи на определённом этапе оптимизации. Такой методологический подход позволяет рассматривать основные технологические схемы подсистем в их взаимодействии и пространственно-временной динамике, обосновать области определения их параметров.

Идея моделирования и оптимизации параметров подсистем основывается на формировании объёмов производства угольной продукции на момент оптимизации варианта развития шахты  $t$  и на весь период оптимизации  $T$  с учётом развития процесса угледобычи в пространстве и во времени. Цель - формирование технологической схемы шахты, обеспечивающей оптимальные параметры её технологических процессов и подсистем - достигается путём обоснования области их совместного варьирования, в пределах которой осуществляется их совместная оптимизация в рассматриваемый период развития шахты

$$T = t_m - t_0, (t \in T).$$

Разработана модель пространственно-временной динамики развития

очистных и подготовительных работ, в которой, в привязке к ТС подготовки и отработки выемочного поля, обоснована последовательность отработки выемочных столбов в пространстве и времени. Модель является основой для привязки технологических моделей дегазации, развития подсистем монтажно-демонтажных работ и внутришахтного транспорта.

Модель выбора оптимальных параметров технологии подсистем «очистные работы» и ГПР, являющаяся основой для привязки технологических моделей поддержания выработки, дегазации, монтажно-демонтажных работ, внутришахтного транспорта, подъема и техкомплекса поверхности, имеет вид:

для всех  $l \in Z, z \in j$  необходимо выполнение условия

$$T_{\text{подг}}^{\text{ij}} - T_{\text{экс}}^{\text{ij-1}} \rightarrow \min,$$

при условии

$$D_{\text{ti}} - R_{\text{ti}} \leq 0; D_{\text{см}}^{\text{tj}} - D_{\text{см}}^{\text{rф}} \leq 0;$$

$$m_{\text{ti}} - m_{\text{роз}}^{\text{ti}} \leq 0;$$

$$\frac{\sum_{j=1}^m A_{\text{tj}}^c \times D_{\text{tj}}}{D_{\text{tj}}} - \bar{A}_{\text{ti}}^c \leq 0;$$

$$V_{\text{пр}}^{\text{пл}} - V_{\text{пр}}^{\text{рф}} \leq 0; V_{\text{пр}}^{\text{пл}} - V_{\text{пр}}^{\text{тл}} \leq 0$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \frac{L_{\text{в}}^{\text{il}} + t_{\text{рм}}^{\text{пз}} + t_{\text{рд}}^{\text{пз}}}{\bar{V}_{\text{пр}}^{\text{il}}} - m_{\text{пз}}^{\text{тс}} \leq 0,$$

$$\max\{T_{\text{пр}}^{\text{ik}}\}$$

где  $z$  - индекс сети выработок по подготовке выемочного поля (столба),  $z=1,2,\dots,Z$ ;  $T_{\text{подг}}^{\text{ij}}$  - продолжительность подготовки  $j$ -го выемочного поля (столба),

$$T_{\text{подг}}^{\text{ij}} = \tau_{\text{подг}}^{\text{ij}} - \tau_{\text{подг}}^{\text{ij}^0},$$

$T_{\text{экс}}^{\text{ij-1}}$  - продолжительность эксплуатации  $j-1$ -го выемочного поля (столба);

$$T_{\text{экс}}^{\text{ij-1}} = \tau_{\text{экс}}^{\text{ij-1}} - \tau_{\text{экс}}^{\text{ij-1}^0},$$

$\tau_{\text{подг}}^{\text{ij}^0}, \tau_{\text{подг}}^{\text{ij}}$  - момент времени соответственно начала и окончания подготовки  $j$ -го выемочного столба;

$\tau_{\text{экс}}^{\text{ij-1}^0}, \tau_{\text{экс}}^{\text{ij-1}}$  - момент времени соответственно начала и окончания отработки  $j-1$ -го выемочного столба;  $A_{\text{tj}}^c$ ,

$\bar{A}_{\text{tj}}^c$  - соответственно фактическая и

планируемая зольность угля, %;  $m_{\text{пз}}^{\text{тс}}$

- возможное количество одновременно действующих подготовительных забоев, ограниченное условиями ТС подготовки.

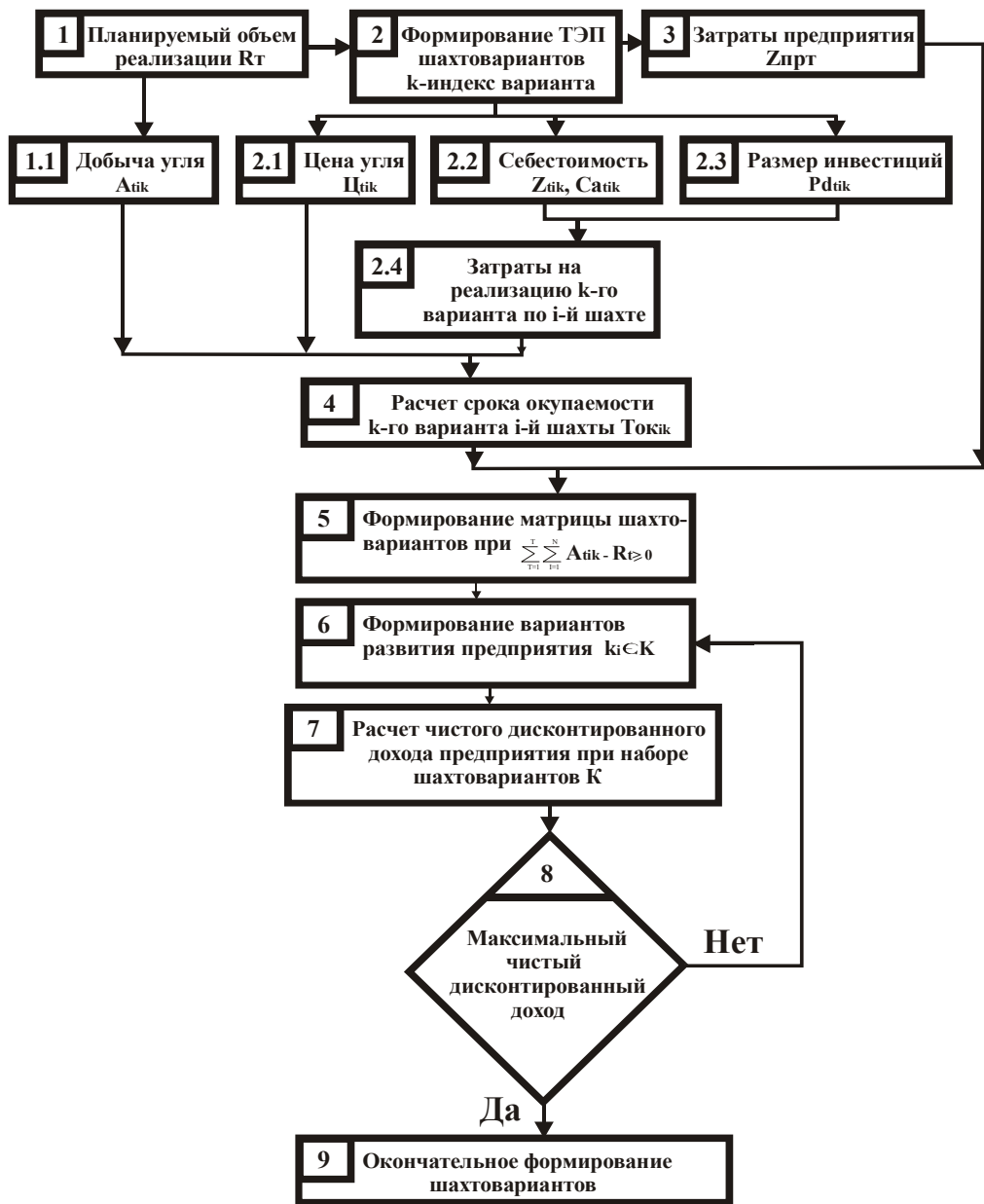
$\bar{V}_{\text{пр}}^{\text{il}}, V_{\text{пр}}^{\text{il}}, V_{\text{пр}}^{\text{рф}}$  - соответственно оптимальная в момент времени  $t$ , максимально возможная и ограниченная газоносностью скорости проходки  $l$ -й

выработки;  $t_{\text{рм}}^{\text{пз}}, t_{\text{рд}}^{\text{пз}}$  - продолжительность

соответственно монтажа и демонтажа оборудования в подготовительном забое.

В соответствии с изложенным разработан алгоритм последовательности поиска их оптимальных соотношений, на основании чего устанавливаются области совместного варьирования этих параметров. Далее определяются варианты развития очистных и подготовительных работ, которые в дальнейшем принимаются к оптимизации.





**Рис. 2. Логическая схема оптимизации вариантов при принятии проектных решений по угледобывающей компании**

На основании сформированных таким образом параметров подсистем очистных и подготовительных работ формируются параметры подсистем ремонт горных выработок, а также

ВШП: количество ( $S_{тс_i}$ ) и протяжённость ( $L_{тс_{is}}$ ,  $s=1,2,\dots,S$ ) транспортных сетей, грузопоток транспортной сети в момент времени  $t$  ( $Q_{тс_{is}}$ ) в со-

ответствии с её типом, определяемым набором оборудования и видом транспортируемого груза.

Оптимизация параметров технологической схемы шахты осуществляется на основе разработанной технологико-экономической модели, представляющей собой синтез технико-технологической и экономико-математической моделей. Формирование экономико-математической модели основано на использовании расчетно-аналитического метода моделирования затрат по элементам и процессам угледобычи в увязке с параметрами технологических процессов. Логическая схема формирования технологико-экономической модели шахты и угледобывающей компании приведена на рис. 2.

При обеспечении ритмичной работы шахты в условиях негативного воздействия горно-геологических факторов, отказов оборудования имеет место риск производственных потерь в виде снижения объемов добычи угля, фор-

мирующих общий объем товарной продукции производственно-технологического комплекса, в состав которого анна входит. Это обусловило необходимость обоснования резервов увеличения нагрузки на одни шахты комплекса в случае отказов в работе других шахт. Предложен метод определения резервов увеличения нагрузки на шахту, на основе обоснования технико-технологического потенциала отдельных подсистем и системы «шахта» в целом, с тем, чтобы рационально распределить объемы добычи и компенсировать потери объемов производства. Метод основан на расчете интегрального показателя технико-технологического потенциала системы «шахта» по сравнению с фактически достигнутым на основе максимального использования ее геотехнологического потенциала, который позволяет определить возможный прирост объемов угледобычи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лангольф Э.Л., Вылегжанина И.И., Мазикин В.П. Проблемы эффективности реструктуризации промышленности Кузбасса. Кемерово. Кузбассвуиздат. 1997 – 248 с.

2. Презент Г.М., Баймухаметов С.К., Квон С.С., Роот Э.Г., Алиев С.Б. Проблемы реструктуризации и интенсификации угледобычи в Карагандинском бассейне. – Караганда, 2000. – 279 с.

3. Торопко Л.А. Угольная промышленность России: опыт реструктуризации, проблемы, перспективы развития отрасли и со-

трудничества со странами СНГ. // Уголь. № 10, 2003. – С. 3-7.

4. Шулятьева Л.И. Выбор технологических схем подготовки и отработки угольных пластов на основе оценки поддержания горных выработок // Вестник Восточно-Казахстанского технического университета. – ВКГТУ, Усть-Каменогорск. - № 4, 2004. – С. 5-7.

5. Шулятьева Л.И. Техничко-технологические проблемы оптимального комплексного развития угледобывающих предприятий. // Уголь, № 9, 2004. – С. 51-60. **ГИАБ**

#### Коротко об авторах

Мельник В.В. – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Подземной разработки пластовых месторождений, smsu-prpm@yandex.ru

Шулятьева Л.И. – кандидат технических наук, докторант кафедры Подземной разработки пластовых месторождений,

Шабловский А.В. – аспирант, Московский государственный горный университет, Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru