

УДК 622:33.003.55:681.3

В.Г. Гринёв, А.А. Хорольский

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ

Институт физики горных процессов НАН Украины,  
49600, г. Днепр, ул. Симферопольская, 2-а.

*Описана методология оптимизации технологических параметров горного производства на основе применения сетей и графов. В статье приведено математическое описание процесса поиска рациональной комплектации очистного оборудования, дается обоснование области использования методов дискретной математики. На основе анализа фактических показателей работы комплексных механизированных забоев были построены и представлены в виде сетевых моделей универсальные графы выбора альтернатив очистного оборудования. Применение сетевых моделей позволило разработать программный комплекс оптимизации производственных процессов.*

**Ключевые слова:** производственный процесс, универсальный граф, сетевая модель, матрица смежности, механизированный комплекс.

### Введение

Анализ исследований [1, 2], проведенных в Институте экономики промышленности НАН Украины, установил, что угольные шахты государственной формы собственности осваивают производственные мощности на 59,5%. По данным Центра Розумкова [3] в 2016 году все предприятия (кроме ГП «Львовуголь» и ГП «Первомайскуголь») по сравнению с 2015 годом уменьшили объемы добычи. Основными причинами являются: низкие темпы модернизации оборудования, недостаточное финансирование, неблагоприятные горно-геологические условия. Средства, которые выделяет государство, преимущественно расходуются на финансирование неэффективных и глубоко убыточных предприятий. Мониторинг функционирования угольных шахт, показал, что эффективно работают только те предприятия, которые никогда не получали дотаций от государства [4–6]. Рано или поздно угледобывающая отрасль должна будет перейти на самофинансирование. Повышение эффективности производственных процессов – условие выживания предприятия. Совершенствование производственного процесса преследует

несколько задач: повышение эффективности производства, снижение уровня затрат. Решить задачу совершенствования технологии механизированной добычи угля можно с помощью методов дискретной математики: сетей и графов [7–9].

### **1. Постановка задачи**

Задача поиска наилучшего варианта среди предложенных может быть решена с использованием алгоритмов Дейкстры [10] и Флойда [11]. В работе [12] описана методология. Поиск наиболее оптимального решения включает несколько этапов:

- представление структуры производственных связей в виде сетевых моделей;
- поиск кратчайшего маршрута в сетевой модели при помощи алгоритмов оптимизации.

Применение методов дискретной математики в горном производстве позволяет решать задачи выбора оптимальных комплектаций очистного оборудования, упорядочивания структуры механизированного комплекса, поиска кратчайшего пути между пунктами в транспортной цепочке и др. В данной работе основной акцент сделан на выборе рациональных комплектаций очистного оборудования применительно к условиям эксплуатации. В соответствии с методологией выбора [12] процесс поиска рациональной комплектации заключается в формализации и представлении универсальных графов в виде сетевых моделей. Применение алгоритма Дейкстры позволяет найти комплектацию «крепь-комбайн-конвейер» с наименьшим значением параметра. Алгоритм Флойда применяется в том случае, когда необходимо упорядочить структуру механизированного комплекса на уровнях «крепь-комбайн», «комбайн-конвейер». Указанная методология обладает рядом преимуществ:

- учитываются комплектации с производительностью более 1000 т/сут.;
- учитывается фактический уровень взаимосвязи оборудования;
- рассмотрены существующие комплектации;
- возможность многократного анализа сетевых моделей.

Несмотря на все преимущества методологии выбора очистного оборудования [12] необходимо для соответствия современному уровню развития компьютерных технологий разработать специальное программное обеспечение.

### **2. Выбор рациональных комплектаций очистного оборудования.**

#### **Программная реализация**

Для выбора комплектаций очистного оборудования были использованы универсальные графы альтернатив очистного оборудования (рис. 1а). В графах содержится информация о технологических параметрах очистного забоя, структуре механизированного комплекса, уровне суточной нагрузки на

очистной забой. Графы построены для пластов мощностью 0,90 – 2,60 м, с шагом 0,20 м. Применительно к условиям горного производства задача заключается в представлении универсального графа в виде сетевой модели (рис. 1 б) и выборе технологической цепочки «крепь-комбайн-конвейер» с минимальным значением параметра. Минимальному значению соответствует кратчайший путь в сетевой модели, для его нахождения использовался алгоритм Дейкстры.

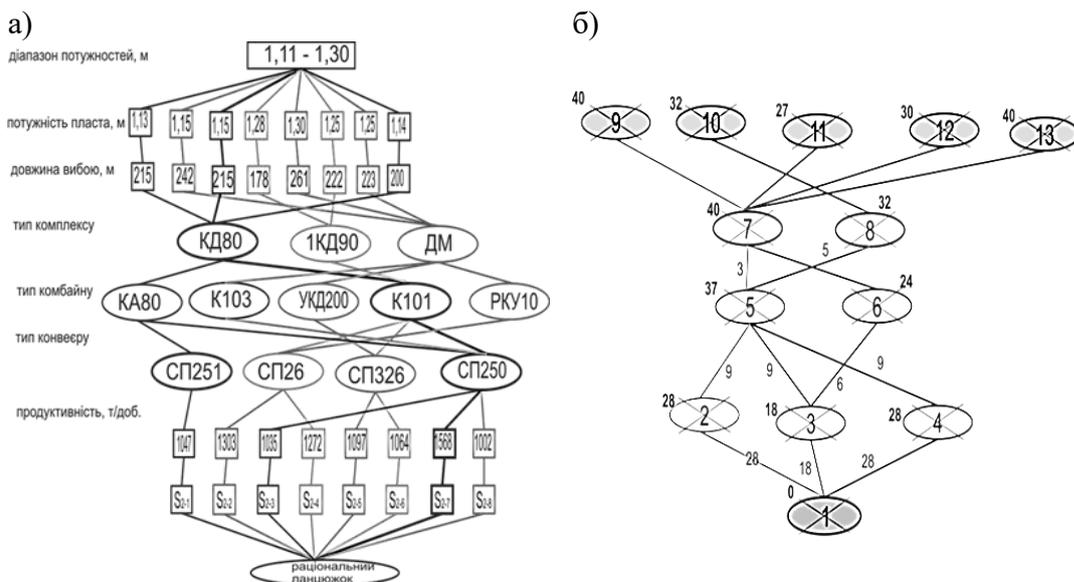


Рис. 1 Представление структуры очистного оборудования: а) – универсальный граф, б) – сетевая модель

За вершины сетевой модели приняты типы очистного оборудования, за ребра (дуги) значения параметра, который следует оптимизировать (себестоимость, стоимость единицы оборудования, затраты на обслуживание и др.). Алгоритм выполняется в следующей последовательности [13, 14]:

Шаг 1. Перед началом алгоритма все вершины и дуги не окрашены. Каждой вершине присваивается значение  $d(x)$ , которое соответствует кратчайшему пути из  $s$  в  $x$ . При этом:

$$d(s) = 0, d(x) = \infty, \text{ для всех } x \text{ отличных от } s \quad (1)$$

При этом стоит окрасить вершину  $s$  и положить  $y = s$  ( $y$  – последняя окрашенная вершина). Стоит отметить, что окрашиваются не только вершины, но и дуги, которые ведут к этим вершинам.

Шаг 2. Для каждой неокрашенной вершины  $x$  пересчитать длину  $d(x)$ :

$$d(x) = \min\{d(x), d(y) + a(y, x)\} \quad (2)$$

при этом:

$$\begin{aligned} &\text{если } d(x) = \infty, \text{ тогда путь отсутствует} \\ &\text{если } d(x) \neq \infty, \text{ тогда } y = x - \text{окрасить вершину} \end{aligned} \quad (3)$$

Шаг 3. Если  $y = t$  следует закончить процедуру, кратчайший путь из вершины  $s$  к вершине  $t$  найден (это единственный путь от начальной к конечной вершине, состоящий из окрашенных дуг).

Окрашенные дуги образуют в ориентированном графе дерево с корнем в вершине  $s$  до любой вершины  $x$ . Применительно к задаче поиска рациональной комплектации очистного оборудования будет найдена комплектация крепь «крепь-комбайн-конвейер» с наименьшим значением параметра. Кроме того будут найдены наиболее эффективные сочетания на уровне «крепь-комбайн», «комбайн-конвейер», тем самым на всех этапах будут найдены рациональные типы очистного оборудования.

Программная реализация предусматривает разработку способов ввода, вывода, хранения, записи информации. В нашем случае использовался комбинированный способ ввода и вывода результатов. Если сетевая модель построена на основе универсальных графов, а количество вершин не более 20, то целесообразно использовать матричное представление [15, 16]. Если проводится оптимизация производственных процессов, то целесообразно графически представить сетевую модель [17, 18]. Независимо от способов ввода, представления сетевых моделей программная реализация предусматривает наличие трех массивов [19]:

- $\{S\}$  – массив меток, при 0 – путь существует, при 1 – нет;
- $\{B\}$  – массив расстояний  $B[i, j]$  – длин дуг;
- $\{P\}$  – массив, который будет записывать длины от начальной вершины до рассмотренных вершин.

$$S = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} \infty & 18 & \infty & \dots & \infty \\ \infty & \infty & 9 & 6 & \infty \\ \infty & \infty & \infty & 12 & 9 \\ \infty & \dots & \dots & \dots & 1 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \end{pmatrix} \quad P = \begin{pmatrix} \infty & 18 & 27 & 33 & \infty \\ \infty & \infty & 9 & 6 & \infty \\ \infty & \infty & \infty & 12 & \infty \\ \infty & \dots & \dots & \dots & 1 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \end{pmatrix} \quad (4)$$

Разработанная программная реализация предусматривает автоматическое заполнение массива  $\{S\}$ , упрощенное заполнение массива  $\{B\}$ , вывод массива  $\{P\}$ . Размерность всех массивов  $N \times N$ , где  $N$  – количество вершин.

Разработанная нами программная реализация [19, 20] обладает рядом преимуществ:

- время поиска оптимальной комплектации равно времени ввода данных;
- вариативность способов ввода;
- автоматическое заполнение массивов меток и расстояний;

- минимальное количество данных, с которыми работает программа; для универсального графа, изображенного на рис. 1 а, необходимо заполнить 12 ячеек формы (количество ячеек соответствует количеству единиц оборудования); стандартная программная реализация предусматривает заполнение  $N^2 = 144$  ячеек, кроме того, можно исключать типы оборудования и альтернативы из расчетов;

- возможность сохранения, формирования, просмотра файлов отчета.

Практическая реализация предусматривала создание соответствующего программного обеспечения (рис. 2).

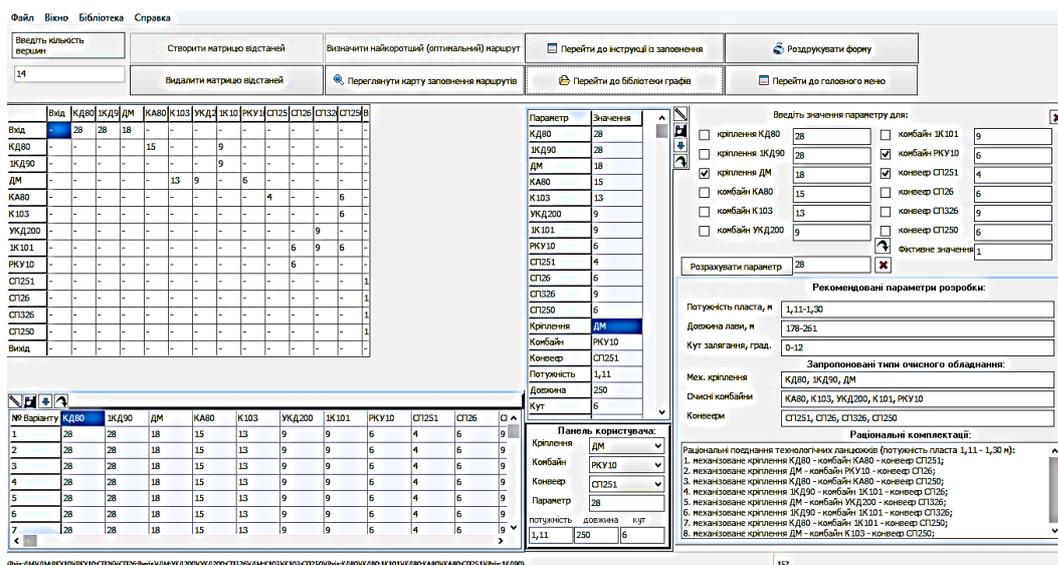


Рис. 2 Интерфейс программы выбора оптимальных технологических цепочек очистного оборудования

Программа содержит библиотеки универсальных, альтернативных, маргинальных графов, графов максимальных, минимальных вариантов. Программа выбора оптимальных комплектаций позволяет проводить экспресс-анализ альтернатив очистного оборудования, является незаменимой на стадии проектирования выемочного участка. Пользователь в процессе работы с программой может получить информацию о рациональной области эксплуатации, рациональных типах очистного оборудования.

Для оптимизации технологической цепочки «крепь-комбайн-конвейер» необходимо:

- выбрать форму, соответствующую мощности пласта;
- ввести значения оптимизационного параметра, для предложенных типов очистного оборудования.

Программа также предусматривает графическое представление сетевых моделей и вывод информации (рис. 3).

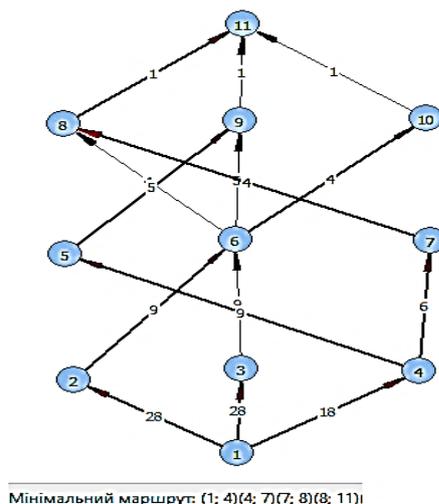


Рис. 3 Графическое представление сетевых моделей

Практическая и прикладная реализация программы описана в работах [21, 22].

Если дистанцироваться от проблемы поиска рациональных комплектаций очистного оборудования предложенная программа позволяет решать ряд задач связях с рационализацией технологических параметров горного производства:

- находить оптимальные сочетания оборудования в технологических цепочках;
- находить кратчайший путь между отправным пунктом и всеми остальными;
- упорядочивать структуру производственных связей на всех этапах.

Как и в рассмотренном ранее примере для оптимизации необходимо производственные связи представить в виде сетевой модели. После этого необходимо указать конечную точку (пункт) на котором процесс поиска должен быть завершен. Программа позволяет загружать, записывать данные о вершинах (пунктах) и ребрах (расстояниях) графа. Пользователь может сам задать значение параметра, назвать вершину и ребро в графе.

Кроме того, существует возможность сохранения данных и просмотра их в «Библиотеке пользователя», в ней содержатся сетевые модели пользователя, графические файлы, результаты поиска.

Практическая ценность работы заключается:

- в разработке способов ввода, вывода, сохранения, загрузки информации, если стандартная программная реализация требует ввода  $N^2$  ячеек (где  $N$  – количество вершин), то предложенная нами требует ввода  $N$  ячеек;
- в разработке программного обеспечения для оптимизации технологических цепочек очистного оборудования; в программе содержится набор сетевых моделей для различных мощностей пласта;

- в разработке программного комплекса оптимизации производственных процессов, без привязки к условиям функционирования горных предприятий.

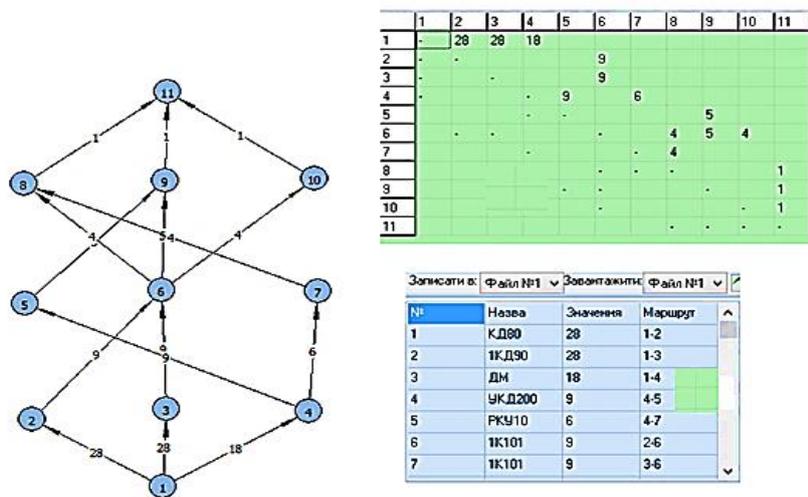


Рис. 4 Создание типизированных файлов программы

Научная ценность работы заключается:

- в обосновании области применения алгоритмов оптимизации;
- адаптации алгоритмов Дейкстры и Флойда для решения задач выбора и оптимизации технологических цепочек очистного оборудования;
- в разработке программной реализации алгоритмов на сетях и графах для оптимизации производственных процессов в различных отраслях промышленности.

Стоит отметить, что нами использованы «жадные алгоритмы», они позволяют найти единственное правильное решение, при этом скорость реализации высока, а вычислительные ресурсы минимальны. Рассмотренная методология и предложенная программная реализация позволит усовершенствовать производственные процессы горного производства. Аспекты выбора рациональных комплектаций очистного оборудования, приведенные в статье, являются практической реализацией известных методов дискретной математики на сетях и графах, при этом область их использования не ограничена.

### Выводы

Проведенный нами анализ фактической области использования очистных комплексов позволил построить универсальные графы альтернатив очистного оборудования. Формализация универсальных графов и представление их в виде сетевых моделей позволило применить алгоритмы оптимизации на основе сетей. Для поиска рациональных технологических цепочек очистного оборудования было разработано соответствующее программное обеспече-

ние. Применение методов дискретной математики в горном производстве позволило решить задачу выбора очистного оборудования с позиции максимизации производительности и минимизации удельной себестоимости. Стоит отметить, что область использования алгоритмов Дейкстры и Флойда не ограничивается рассмотренным примером, также можно улучшать технологические цепочки, процессы, связи, решать транспортные задачи и др. Разработанный нами программный комплекс позволяет решать задачи совершенствования производственных процессов на всех стадиях функционирования предприятия, при этом область использования не ограничивается угольной отраслью.

1. *Петенко И.В.* Проблемы рентабельности угольной продукции / И.В. Петенко, С.С. Майдукова // Уголь Украины. — 2014. — №10. — С.18–27.
2. Концептуальні положення щодо інституціонального забезпечення ефективності господарювання у вугільній промисловості (наукова доповідь) / О.І. Амоша, Л.Л. Стариченко, Д.Ю. Череватський, Ю.С. Залознова, Д.Д. Чейлях, О.С. Сердюк, О.І. Атабеков, С.І. Сліпенький, О.А. Грек, В.М. Юзвенко – Інститут економіки промисловості НАН України, К.: 2015.
3. *Маркевич К.* (укладач) Енергетична галузь України: Підсумки 2015 року / К. Маркевич. – Київ: Центр Розумкова. – 71 с.
4. *Амоша А.И.* Комплексное освоение угольных месторождений Донецкой области / А.И. Амоша, В.И. Логвиненко, В.Г. Гринев. – Донецк: ИЭ НАН Украины, 2007. – 216 с.
5. *Гринев В.Г.* Инновационные перспективы эксплуатации угольных пластов крутого падения / В.Г. Гринев, П.В. Череповский, А.И. Деуленко. – Днепропетровск: издательство «Пороги», 2015. – 180 с.
6. *Гринев В.Г.* Судьба украинского угля на фоне ситуации в Донбассе / В.Г. Гринев, Е.П. Калиущенко // Физико-технические проблемы горного производства. — 2016. — №18. — С.135–143.
7. *Гринев В.Г.* Приложение теории графов для эффективного выбора очистного оборудования на шахтах Донбасса / В.Г. Гринев, П.П. Николаев // Физико-технические проблемы горного производства. – Донецк. – 2011. – №14. – С. 166 – 172.
8. *Гринев В.Г.* Алгоритмы оптимизации сетевых моделей для выбора рациональных технологических цепочек очистного оборудования / В.Г. Гринев, П.П. Николаев // материалы 3-й межд. науч.-техн. конф. «Техногенные катастрофы: модели, прогноз, предупреждение». – Днепропетровск. – 2013. – НГУ – С. 90 – 95.
9. *Гринев В.Г.* Технологические аспекты физики горных процессов / В.Г. Гринев, П.П. Николаев, А.И. Деуленко, П.В. Череповский // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. – Донецк – 2013. – №13. С.197–208.
10. *Dijkstra E.W.* A Note on Two Problems in Connexion with Graphs / Numerische Mathematik. – 1959. – 269–271pp.
11. *Floyd R.Z.*, Algorithm 97, Shortest Path, Comm. ACM, 5, p.345, 1962.
12. *Гринев В.Г.* [моногр.] Графы и сети для выбора горно-шахтного оборудования / В. Г. Гринев. – Днипро: Пороги, 2016. – 247 с.

13. Зыков А.А. Основы теории графов / А.А. Зыков. – М. Наука, 1987. – 384 с.
14. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах.: Пер. С англ.— М.: Мир, 1981.— 323 с.
15. *Хорольский А.А.* Исследование структуры горно-шахтного оборудования с применением графов и сетевых моделей / А.А. Хорольский, В.Г. Гринев // Материалы международной конференции «Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта 2017», Д.: – Национальный горный университет. – С. 72–82.
16. Алгоритмы: построение и анализ (Introduction to Algorithms) / Томас Х. Кормен, Чарльз И. Лейзерсон, Рональд Л. Ривест, Клиффорд Штайн. — 2-е изд. — М.: «Вильямс», 2006. — 1296 с.
17. *Бакнелл Джулиан М.* Фундаментальные алгоритмы и структура данных в Delphi: Пер. с англ. / Джулиан М. Бакнелл. — СПб.: ООО «ДипСофтЮП», 2003. — 560 с.
18. *Стивенс Р.* Delphi. Готовые алгоритмы / Род Стивенс : Пер. с англ. — 2-е изд. — М.: ДМК Пресс, СПб: Питер, 2004. — 384 с.
19. *Левитин А.* Алгоритмы: введение в разработку и анализ. Пер. с англ. / А. Левитин. — М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. — 576 с.: ил.
20. *Сынков В.Г.* Применение базовых алгоритмов оптимизации для выбора очистного оборудования / В.Г. Сынков, В.Г. Гринев, А.А. Хорольский // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: Информатика, кибернетика, вычислительная техника. — 2016. — № 2. — С. 115 – 123.
21. *Хорольский А.А.* Совершенствование технологии механизированной добычи угля на основе рационального выбора комплектаций очистного оборудования / А.А. Хорольский, В.Г. Гринев, В.Г. Сынков // Материалы международной конференции «Форум горняков – 2016», 5 октября – 8 октября 2016 г., Днепропетровск. – Д.: Национальный горный университет, Т2. – С. 158–167.
22. *Хорольский А.А.* Выбор комплексов горно-шахтного оборудования на основе теории графов / А.А. Хорольский, В.Г. Гринев, В.Г. Сынков // Научный вестник НТУУ «КПИ». Серия: «Горное дело». — 2016. — № 31. — С. 57 – 64.

*В.Г. Гриньов, А.О. Хорольський*

## **ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВУГІЛЬНИХ РОДОВИЩ НА ОСНОВІ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗРОБКИ**

Описано методологію оптимізації технологічних параметрів гірничого виробництва на основі застосування мереж і графів. У статті наведено математичний опис процесу пошуку раціональної комплектації очисного обладнання, дається обґрунтування галузі використання методів дискретної математики. На основі аналізу фактичних показників роботи комплексних механізованих вибоїв були побудовані і представлені у вигляді мережевих моделей універсальні графи вибору альтернатив очисного обладнання. Застосування мережевих моделей дозволило розробити програмний комплекс оптимізації виробничих процесів.

**Ключові слова:** виробничий процес, універсальний граф, мережева модель, матриця суміжності, механізований комплекс.

*V.G. Grinyov, A.A. Khorolskiy*

OPTIMIZATION OF OPERATING PARAMETERS OF COAL DEPOSITS  
ON THE BASIS OF ASSESSMENT OF RELIABILITY TECHNOLOGY  
DEVELOPMENT

The article deals with solving the scientific problem of select mining equipment for selection longwall faces western Donbass. The main goal of the paper is to study technology of coal extraction in Donbass. The present paper describes new method for selection of mining equipment based on theory graph. Special attention is given to technological aspects; they are length longwall faces, depth of coal stratum. Predictions obtained for daily production of mining equipment are compared with design outputs. The present paper describes new method for selection of mining equipment based on theory graph. Conclusions regarding the main reason of instability of longwall faces workings are made.

**Keywords:** the area for the management; roos support, shearer, conveyor; graph theory; network model; the algorithm optimization.