

## ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Хорольский А.А., Гринев В.Г.

*Институт физики горных процессов Национальной академии наук Украины, Днепр, Украина, [khorolskiyaa@ukr.net](mailto:khorolskiyaa@ukr.net)*

Проектирование горного производства весьма сложный и трудоемкий процесс. Сложность заключается в многообразии горно-геологических условий, технологических схем, организационных мероприятий и прочее. На первый взгляд, необходимо спроектировать производство, при этом учесть параметры, которые не всегда взаимосвязаны между собой. Основная проблема состоит в многообразии инструментов и подходов. Целью данной статьи является обоснование области применения разработанных авторами данной статьи подходов применительно к проектированию горного производства.

Выбор рационального средства принятия решений, которое позволит минимизировать себестоимость готовой продукции, обеспечить непрерывность производственного процесса, а также выбрать едино правильный вариант освоения месторождения полезного ископаемого принято называть оптимальным проектированием параметров горного производства. Из этого определения следует, что на первоначальной стадии проектировщику уже предложен набор инструментов, а также параметров, которые могут быть оптимизированы, тогда возникает ряд вопросов: Какими инструментами воспользоваться? Какие параметры стоит оптимизировать? Какие существуют средства поддержки принятия решений? Именно ответам на эти вопросы посвящено данное исследование.

Нами проанализированы реальные экономико-математические подходы для управления горным производством и составлена классификация (табл. 1). В качестве исходной характеристики (класса) принято деление на информационные и оптимизационные модели [1].

Таблица 1 – Классификация методов принятия решений в горном производстве

Класс моделей	Группа методов	Название	Исследователи
информационные	метод анализа иерархий	АНР	Kursunoglu N., Onder M.
		PROMETHEE	Bogdanovic D., Nikolic D., Ilic I.
		ELECTRE	Iphar M., Alpay S.
		VIKOR	Hayati M.
		Grey-АНР	Huang, W, Cai, S.
		Fuzzy-АНР	Naghadehi, M. Z., Mikaeil, R.
		WPM	Balusa B. C., Singam J.
	исследование операций	принятие решений в условиях неопределенности	Krzak M.
		деревья принятия решений	Lee S., Park I.
		графы	Hrinov V., Khorolskyi A.
оптимизационные	математическое программирование:	линейное	Kulshreshtha M., Parikh J. K.
		квадратичное	Li P.

Класс моделей	Группа методов	Название	Исследователи
		целочисленное	Bakhtavar E.
		геометрическое	Erdogan, G.
		стохастическое	Dimitrakopoulos R., Ramazan S.
		динамическое	Beaulieu M., Gamache M., Гринев В.Г.
	детерминированные модели	управление запасами	Mamaikin O.
		корреляционные модели	Fomichov V.
		сетевые модели	Гринев В.Г., Brazil M.
	вероятностные модели	теория игр	Liu Q., Гринев В.Г.
		теория надежности	Musingwini C.
		имитационное моделирование	P. Huang, C. Chen

Данная классификация подразумевает в своей основе целевую функцию, если в оптимизационной модели на первый план выходит задача минимизации (максимизации) параметра, то в информационных моделях рассматриваем стратегию (поведение). В работе [2] дано сравнение методов принятия решений. Как видно из табл. 1 количество моделей и подходов весьма разнообразно, поэтому вначале стоит сузить количество подходов до двух-трех. Как показывают исследования [3, 4] для решения задач оптимального проектирования горного производства могут быть применены методы дискретной математики: графы и сети [3], а также динамическое программирование [4]. Это обусловлено рядом преимуществ:

- во-первых, проектировщик получит конкретный ответ на вопрос какая из альтернатив наиболее рациональна с позиции минимизации (максимизации) оптимизационного параметра;

- во-вторых, применение графов позволяет в наглядной форме предоставить информацию о существующих альтернативах, что в дальнейшем позволит сформировать банк проектных решений;

- в-третьих, минимизировать временные затраты на стадии принятия решений.

В результате первоначального выбора мы остановились на методах дискретной математики и динамического программирования. Дальнейшая задача состоит в обосновании области применения подходов для предложенных методов. Для этого нами использованы следующие критерии:

- непрерывность процесса, под непрерывностью процесса понимают изменение состояния полезного ископаемого во времени, т.е. исследуется категория «запасов», которые с течением времени пребывают в различных состояниях – переданы к освоению, обеспечены трудовыми ресурсами, обеспечены транспортными связями, обеспечены непромышленными объектами, энерговооружены, готовы к вскрытию и т.д. [5];

- продолжительность во времени, здесь стоит рассматривать данную категорию с позиции рациональности применения инструментов, если процесс непродолжителен, к примеру, стоит отработать очистной забой, то задача состоит в выборе средств механизации – для этой задачи достаточно воспользоваться методами дискретной математики – сетевыми моделями, т.к. это позволит получить однозначный ответ, какая из альтернатив оптимальна с позиции минимизации себестоимости, трудовых, временных затрат и проч.;

- оптимизируемый параметр, в тоже время, если бы задача рассматривалась более широко (в отличие от предыдущего примера) и шахта была бы в структуре «уголь-кокс-металл» или «уголь-обогащительная фабрика-тепловая электростанция», то в качестве параметра ис-

пользовали бы зольность угля, т.е. осуществлялся переход запасов из состояния угля в электроэнергию, то стоит применить динамическое программирование.

Таким образом, для оптимального проектирования необходимо:

- дать характеристику процессу;
- на основе характеристики стоит представить структуру процесса в виде упорядоченной структуры – сетевой модели;
- воспользовавшись разработанным авторами программным обеспечением [6, 7] принять решение.

Итак, суть оптимального проектирования определяется не только конечным результатом в виде проекта эффективного освоения месторождения, но и рационального выбора инструментов с помощью, которых принимается решение [8, 9].

Область использования методов динамического программирования – непрерывные процессы, т.е. осуществляется переход запасов из одного состояния в другое, при этом состояние на предыдущем этапе определяет текущие и все последующие состояния. В качестве критерия оптимальности не всегда могут быть использованы категории себестоимости, трудовых затрат и прочее, более рационально использовать качественные категории. Применительно к угольной промышленности – это зольность угля, т.е. шахта рассматривается как составляющая в системе генерации металла или электроэнергии, т.е. от качества угля (зольности) зависит качество металла, либо исходя из требований тепловых электростанций диктуются требования к обогащению угля, следовательно, необходимо учитывать интересы всех «игроков». Область применения данного подхода – вертикально интегрированные компании, в структуре, которых есть предприятия по добыче, обогащению угля и генерации электроэнергии.

Область применения методов дискретной математики – обособленные во времени и пространстве процессы. Например, выбор средств механизации, организация технологии крепления выработок и т.д. Необходимо дать однозначный ответ. Если предприятие не интегрировано в цепочку генерации энергии или металла, то нецелесообразно применять методы динамического программирования, т.к. процесс прерывен.

Рассмотрим алгоритмы динамического программирования, а также средства принятия решений.

Процесс принятия решения (поиска стратегии управления) заключается в представлении процесса в виде упорядоченной структуры – сетевой модели [10]. Вершинам соответствуют типы оборудования, варианты технологии, а расстоянию (длине) между вершинами – значение оптимизационного параметра (стоимость, временные затраты и др.). Наиболее короткий путь (иногда наиболее длинный – все зависит от целевой функции) будет соответствовать оптимальному решению. При этом связи между вершинами соответствуют реальным взаимосвязям, что исключает принятие неверного решения [11]. Задача решается поэтапно, с конца, т.е. мы определяем каким образом эффективно организовать работы. Важно сделать следующее замечание – на каждом этапе следует принимать единое оптимальное решение, после того как возможность принятия его исчерпана следует переходить к следующему этапу и так от конечной точки к начальной. Методы ручного перебора не позволят это осуществить, поэтому стоит уделить внимание разработке инструментов.

Принятие единого решения на каждой стадии способствует принятию верного решения и на последующих этапах, что согласуется с принципом Р. Беллмана (принцип динамического программирования) [12]: оптимальная стратегия имеет свойство, что какими бы ни были начальное состояние и начальное решение, последующие решения должны составлять оптимальный курс действий по отношению к состоянию, полученному в результате первого решения. Иными словами оптимальная стратегия зависит только от текущего состояния и цели, и не зависит от предыстории [13]. В работе [14] обобщен многолетний опыт эффективного применения методов динамического программирования при освоении месторождений полезных ископаемых. Институтом физики горных процессов НАН Украины раз-

работано специализированное программное обеспечение, которое позволяет решить данную задачу [15].

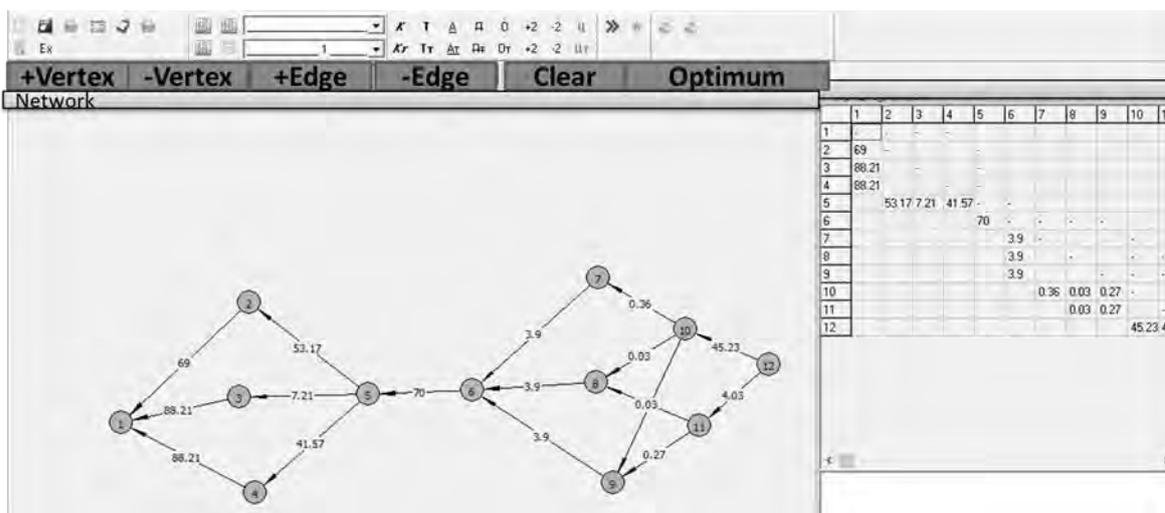


Рисунок 1 – Фрагмент рабочего окна программы «Динамического программирования альтернативного графа на минимум»

Применение описанной программы позволит учесть взаимосвязи между различными состояниями запасов во времени.

Для решения задач оптимизации параметров эксплуатации можно воспользоваться методами дискретной математики – сетями и графами. Прежде всего, это обусловлено наглядностью и информативностью. К примеру, для решения задачи о комплектации очистных забоев необходимо иметь представление о наборе альтернатив, их количестве, условиях эксплуатации, фактических показателях производительности, а также реальных взаимосвязях между типами очистного оборудования. Идея заключается в том, что описанные характеристики можно представить универсальным графом, т.е. упорядоченной структурой, в качестве вершин принимаем параметры, а в качестве расстояний между вершинами значения этих параметров (рис. 2).

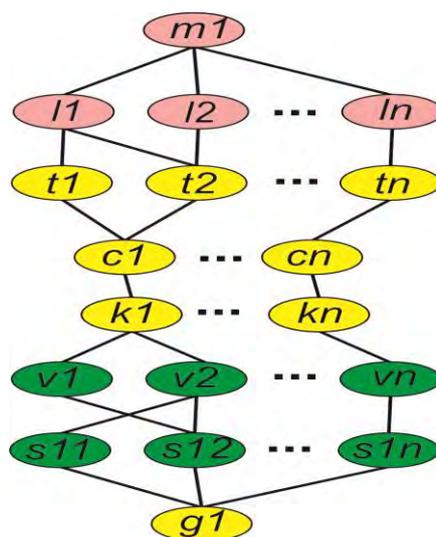


Рисунок 2 – Универсальный граф выбора альтернатив

Фактически универсальный граф (рис. 2) представляет собой совокупность трех моделей: информационной (красный цвет), которая содержит информацию о рациональных усло-

виях эксплуатации; статической оптимизационной (желтый цвет), которая позволяет на начальном этапе проектирования установить типы оборудования с максимальной производительностью и минимальными затратами; оптимизационной динамической (зеленый цвет), которая позволяет решать задачи о снижении себестоимости и максимизации производительности на протяжении функционирования производства. В данной графе (рис. 2) вершинам будут соответствовать следующие значения технологических параметров:  $m_1$  – мощность пласта,  $l_1 \dots l_n$  – длина очистного забоя,  $t_1 \dots t_n$  – стоимостные параметры механизированной крепи,  $c_1 \dots c_n$  – стоимостные параметры очистных комбайнов,  $k_1 \dots k_n$  – стоимостные параметры забойных конвейеров,  $v_1 \dots v_n$  – объемы добычи рассматриваемых цепочек;  $s_{11} \dots s_{1n}$  – удельная себестоимость;  $g_1$  – рациональная цепочка компонента цепи. Для каждого набора условий эксплуатации существует отдельная модель. Кратчайший маршрут будет соответствовать оптимальной альтернативе с позиции минимизации оптимизационного параметра. Для решения поставленной задачи могут быть использованы алгоритмы Дейкстры [16], Флойда [17]. Нами разработано соответствующее программное обеспечение (рис. 3) [18, 19, 20].

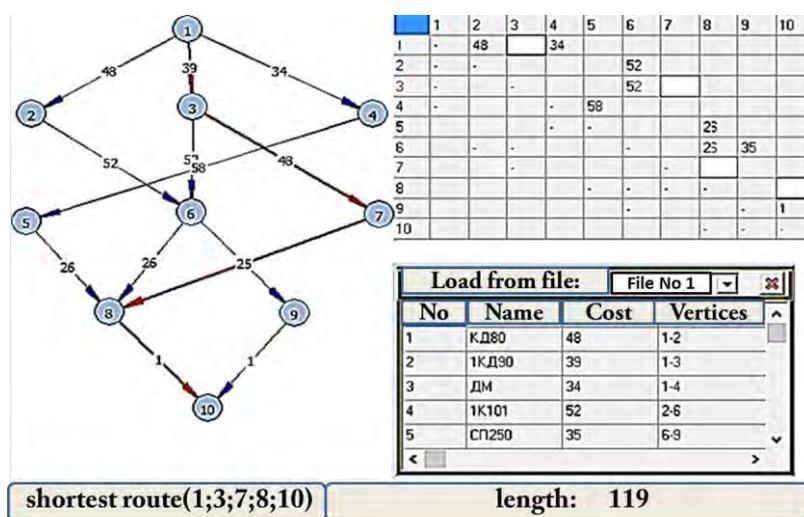


Рисунок 3 – Окно программы «Нахождения кратчайших маршрутов между всеми вершинами сетевой модели»

Подводя итоги можно сформировать область использования приведенных подходов (табл. 2).

Таблица 2 – Область применения инструментов оптимизации параметров эксплуатации

Метод	Характеристика процесса	Критерий оптимальности	Алгоритмы	Программы
динамическое программирование	непрерывный процесс	качество продукции через изменение состояния запасов	Р. Беллмана	динамического программирования альтернативного графа на минимум (максимум)
дискретная математика	обособленный процесс	себестоимость и др.	Дейкстры, Флойда	поиска кратчайшего маршрута между всеми вершинами сетевой модели

Рассмотренные в данной работе ситуации и их решение являются интерпретациями уже известных задач динамического программирования, дискретной математики, однако, с развитием информационных технологий удастся получить новые алгоритмы приближенных и точных методов вычислений, а также существенно увеличить размерность задач. Характерной особенностью приведенных инновационных решений является возможность их применения в качестве дополнительных к другим методам [21, 22, 23] и подходам [25, 26, 27, 28].

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- для решения задач оптимального проектирования необходимо использовать методы динамического программирования и дискретной математики, при этом эти подходы объединяет одно преимущество – наглядность и возможность создания банка проектных решений;
- для определения каким инструментом следует воспользоваться следует дать характеристику процесса с позиции непрерывности, т.к. именно непрерывность процесса главное требование динамического программирования;
- использование разработанного авторского программного обеспечения позволяет решить указанные задачи и повысить размерность задач.

#### Список литературы

1. Кухарев В.Н. Экономико-математические методы и модели в планировании и управлении / В.Н. Кухарев, В.И. Салли, А.М. Эрперт. – К.: Выща. шк., 1991. – 304 с.
2. Hrinov, V.G., Khorolskyi, A.A. Improving the Process of Coal Extraction Based on the Parameter Optimization of Mining Equipment. *E3S Web of Conferences, Ukrainian School of Mining Engineering*. Vol. 60. pp. 1-10. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000017>.
3. Хорольский, А.А., Гринев, В.Г. Выбор сценария освоения месторождений полезных ископаемых. *Геология и охрана недр*. 2018. №3 (68). С. 68–75.
4. Хорольский, А.А. Использование динамического программирования для проектирования горного производства при ограниченных ресурсах / А.А. Хорольский, В.Г. Гринев // Информационные технологии в образовании, науке и производстве: VI Международная научно-техническая интернет-конференция, 17–18 ноября 2018 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rep.bntu.by/handle/data/49907>.
5. Гринев В.Г. Решение проблем разработки рудных месторождений Севера / Новосибирск: ВО «Наука», 1992. – 205 с.
6. Хорольский, А.А. Исследование структуры горно-шахтного оборудования с применением графов и сетевых моделей / А.А. Хорольский, В.Г. Гринев // Матеріали міжнародної конференції «Сучасні інноваційні технології підготовки інженерних кадрів для гірничої промисловості і транспорту 2017» (17–18 квітня 2017 р.). Дніпро : Національний гірничий університет, 2017. – С. 72–82.
7. Сынков, В.Г., Гринев, В.Г., Хорольский, А.А. Применение базовых алгоритмов оптимизации для выбора очистного оборудования. *Наукові праці Донецького національного технічного університету*. Серія: «Інформатика, кібернетика, обчислювальна техніка»: зб. наук. праць. ДВНЗ ДонНТУ. – Красноармійськ, 2016. № 23. С. 115–123.
8. Petlovanyi, M., Lozynskyi, V., Saik, P., & Sai, K. (2019). Predicting the producing well stability in the place of its curving at the underground coal seams gasification. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 123, p. 01019). EDP Sciences.
9. Petlovanyi, M., Kuzmenko, O., Lozynskyi, V., Popovych, V., Sai, K., & Saik, P. (2019). Review of man-made mineral formations accumulation and prospects of their developing in mining industrial regions in Ukraine. *Mining of Mineral Deposits.*, 13(1), 24-38.
10. Гринев В.Г., Хорольский А.А. Обоснование параметров выбора комплектаций очистного оборудования с учетом области рациональной эксплуатации. *Вести Донецкого горного института*, 2017, 1(40), 139–144.

11. Гринев, В.Г. Проектирование технологических схем очистного оборудования с использованием сетевых моделей: опыт и перспективы / В.Г. Гринев, А.А. Хорольский // Горная механика и машиностроение. – 2018. – №4. – С. 12-21.
12. Беллман Р. Динамическое программирование. М.: Иностранная литература, 1960. – 400 с.
13. Беллман Р., Гликсберг И., Гросс О. Некоторые вопросы математической теории процессов управления. – Пер. с англ. – М.: Издательство иностранной литературы, 1962. – 339 с.
14. Гринев В.Г., Зубков В.П. Изаксон В.Ю. Шкулев С.П. Решение горных задач на ЭВМ при освоении рудных месторождений: Монография / Новосибирск, Наука, 1999. - 215 с.
15. Гриньов, В.Г. Розроблення екологічних сценаріїв ефективного освоєння цінних родовищ корисних копалин / В.Г. Гриньов, А.О. Хорольський, О.П. Каліущенко // Мінеральні ресурси України. – 2019. – №2. – С. 46–50.
16. Окулов С.М. Программирование в алгоритмах / С. М. Окулов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2002. – 341 с.
17. Исследование операций : В 2-х т. / Пер. с англ.; Под. ред. Дж. Моудерав, С. Элмаграби.- М.: Мир, 1984. – Т.1. - 712 с.; 1987. – Т.2 – 264 с.
18. Хорольський, А.О., Гриньов, В.Г. Закономірності формування технологічних схем для ефективної експлуатації вугільних родовищ. // Форум гірників–2018: матеріали міжнародної науково практичної конференції. – Дніпро, 2018. – С. 43–51.
19. Гринев В.Г. Обоснование рациональных параметров механизированной добычи угля на пластах пологого падения. / В.Г. Гринев, А.А. Хорольский // Фізико-технічні проблеми гірничого виробництва: зб. наук. праць / ІФГП НАН України. – Дніпропетровськ, 2016. – Вип. 18. – С. 145–152.
20. Гриньов В.Г., Хорольський А.О. Комп'ютерна програма «Програма знаходження найкоротших відстаней між усіма вершинами мережевої моделі» («GraphON.v1.2017»). Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №75055. — зареєстр. 28.11.2017 р.; опубл. 26.01.2018 р. // «Авторське право та суміжні права». – 2018. – Вип. 47.
21. Кононенко М., Мальцев Д. Усовершенствование технологии очистных работ во вторичных камерах в условиях Южно-Белозерского месторождения, 2008. Науковий вісник НГУ. №. 4. С. 32–35.
22. Зубко С. А., Кононенко М. Н. Обоснование рациональных параметров технологии буровзрывных работ при добычи железных руд подземным способом. Межд. науч.-техн. конф.: Школа подземной разработки, 2007. С. 302–306.
23. Khomenko O. Y. Implementation of energy method in study of zonal disintegration of rocks. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2012. Vol. 4, pp. 44–54.
24. Zhanchiv B., Rudakov D. V., Khomenko O. Ye., Tsendzhav L. Substantiation of mining parameters of Mongolia uranium deposits. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2013. Vol. 4, pp. 28–35.
25. Mamaikin, O., Sotskov, V., Demchenko, Y., and Prykhorchuk, O. (2018). Productive flows control in coal mines under the condition of diversification of production. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 60, p. 00008). EDP Sciences. doi.org/10.1051/e3sconf/20186000008.
26. Fomichov, V., Sotskov, V., Pochevov, V., and Mamaikin, O. (2018). Formation of a calculation model determining optimal rate of stoping face movement with a large deformation of a rock massif. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(7), 2381–2389.
27. Astafiev, D., Niedbalski, Z., Leschhorn, F., and Tymoshenko, Y. (2016). Technological, economic and ecological aspects of selective coal mining from ultra-thin seams in conditions of Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 10(1), 83-88. dx.doi.org/10.15407/mining10.01.083.
28. Salli, S., Pochevov, V., and Mamaykin, O. (2014). Theoretical aspects of the potential technological schemes evaluation and their susceptibility to innovations. In *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining* (pp. 491-496).