

## СЕТЕВЫЕ МОДЕЛИ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА

Хорольский А.А., Гринев В.Г.

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

В условиях рыночной экономики на первый план выходят задачи, которые тесно связаны с повышением организационно-технологической надежности производства. Независимо от того на какой стадии развития находится предприятие требуется постоянно снижать себестоимость продукции, налаживать транспортные цепочки, оптимизировать производственные взаимосвязи. Безубыточная работа предприятия невозможна без соблюдения двух условий: производительность должна быть максимальной, а себестоимость минимальной. Оптимизация производственных процессов позволяет решить эти задачи, при этом стоит отметить, что поиск наилучшего решения (технологической цепочки, взаимосвязи оборудования и др.) тесно связан с повышением уровня организационно-технологической надежности производства.

Под организационно-технологической надежностью подразумевается способность технологической схемы сохранять свои параметры при заданных условиях. Исходя из первой цели оптимизации производства («производительность должна быть максимальной») мерой надежности принято считать уровень производительности. Технологические схемы с высокими показателями работы считаются надежными, а с низкими – ненадежными и нежелательными. Второй задачей оптимизации является снижение себестоимости продукции, решение данной задачи заключается в выборе наилучшей, в зависимости от набора ограничивающих факторов, структуры технологической цепочки производства.

При поиске наилучших решений в производстве используют следующие подходы:

- оценка технологической схемы (оборудования, цепочки, взаимосвязи) величиной критерия, в качестве критерия принимают уровень энергозатрат, удельная себестоимость, временные затраты на обслуживание, металлоёмкость и др.;
- многокритериальная оптимизация, подразумевается применение экономических средств: PROMEETHE, ELECTRE, VIKOR, АНР, оптимизация с ограничениями; математических методов: теория нечетких множеств, деревьев решений, мультимодельный;
- применение методов линейного, динамического, квадратического программирования, используют также генетические алгоритмы;
- представление технологических схем в виде графов и сетей, с последующим применением алгоритмов оптимизации на сетях и графах.

Рассмотренные подходы обладают существенным недостатком – оптимизация каждой новой технологической цепочки требует построения отдельной сетевой модели. Поэтому, возникла актуальная задача, которая заключается в разработке и программной реализации подхода, который базируется на представлении структуры технологических цепочек в виде сетевой модели и последующей оптимизации с использованием алгоритмов на сетях и графах.

Специалисты Института физики горных процессов имеют практический опыт решения сложных многопараметрических задач, с которыми сталкиваются горняки, металлурги, энергетики на стадии получения конечной продукции [1–3]. В.Г. Гриневым разработан ряд научных основ и подходов к выбору очистного оборудования [4], управления процессами изменения состояния минеральных ресурсов [5], оценке и стабилизации деятельности угледобывающей и сопутствующих отраслей [6, 7]. В работе [4] отмечено, что для популяризации и внедрения методов дискретной математики в производство необходимо разработать подход, который соответствует уровню современных информационных технологий.

Новый подход базируется на соблюдении принципов системного подхода, к ним относятся: целостность, структуризация, системность, иерархичность, множественность.

Целостность подразумевает рассмотрение всей технологической цепочки, процесса или взаимосвязи как единого целого без разделения на отдельные уровни. Именно соблюдение данного принципа позволяет на первоначальном этапе исключить альтернативы, которые не соответствуют нашим требованиям.

Иерархичность подразумевает, что на стадии оптимизации и упорядочивания структуры технологических цепочек следует учитывать и производственные взаимосвязи между отдельными узлами, типами оборудования. Выполнение данного условия, способствует тому, что уровень взаимосвязи оборудования будет максимальным.

Структуризация предусматривает возможность упорядочивания структуры на всех уровнях, это не что иное, как оптимизация взаимосвязей на всех стадиях производственного процесса. Данный принцип позволяет снизить себестоимость готовой продукции, т.к. стоимость производства на каждом этапе будет минимальной.

Системность заключается в соответствии области эксплуатации оборудования параметрам эксплуатации всей технологической цепочки.

Множественность подразумевает наличие набора сетевых моделей для различных ограничивающих факторов. Соблюдение данного условия позволяет увеличить «гибкость» производственного процесса, т.е. оперативно реагировать на смену структуры технологической цепочки.

Основным требованием при разработке программной реализации является наличие структурной оптимизации, т.е. процесс получения системных эффектов с целью оптимизации прикладных задач в зависимости от заданных ограничений.

Как отмечалось ранее, повышение организационно-технологической надежности производства заключается в выборе такой структуры производственных взаимосвязей, при которой производительность будет максимальной, а себестоимость минимальной. Для решения поставленной задачи могут быть использованы методы дискретной математики: сети и графы. Графы позволяют наглядно и компактно представить данные о существующих взаимосвязях, а сети способствуют программной реализации.

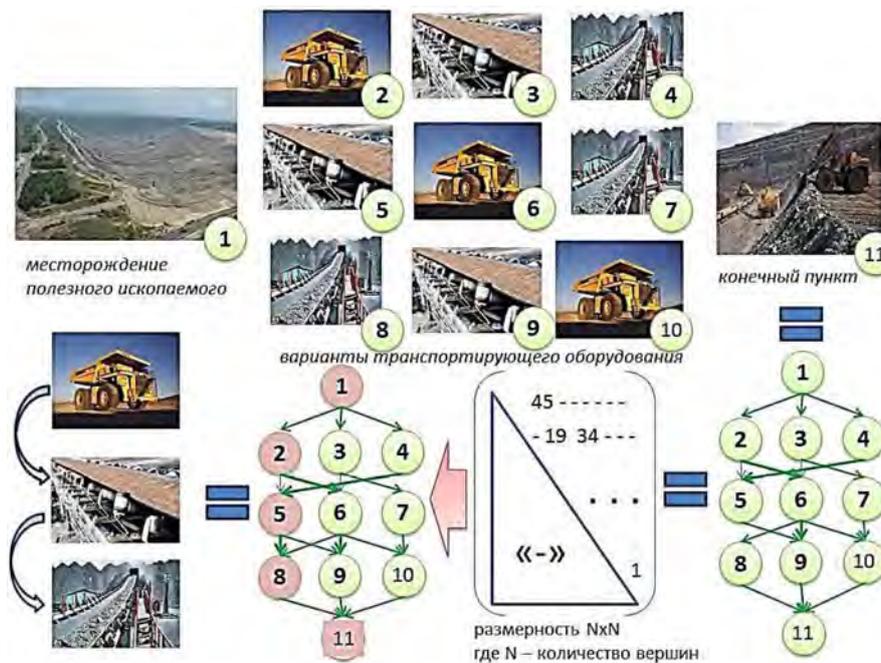


Рисунок 1 – Схема оптимизации технологической цепочки (на примере выбора транспортной цепочки)

Как видно из рис. 1 процесс поиска наилучшей технологической цепочки заключается в представлении структуры производственных взаимосвязей в виде сетевой модели. В качестве вершин принимаются типы оборудования, пункты назначения, этапы; в качестве длин ребер (дуг) – значения параметра (себестоимость, затраты на перевозку, затраты на обслуживание, стоимость единицы оборудования, временные затраты на обслуживание и др.). Суть оптимизации заключается в поиске кратчайшего маршрута в сетевой модели от начальной (1 – «месторождение полезного ископаемого») до конечной вершины (11 – «конечный пункт»). Найденный путь соответствует наиболее эффективной структуре технологической цепочки с позиции минимизации оптимизационного параметра. Для поиска кратчайшего маршрута в сетевой модели могут быть использованы классические алгоритмы оптимизации на сетях и графах [8, 9].

Программная реализация предусматривает ряд этапов:

- разработка способов ввода данных о структуре производственных взаимосвязей, в нашем случае программа предусматривает матричное и графическое задание сетевой модели; матричная реализация предпочтительна при количестве вершин до 20, также данный вид реализации позволяет работать с «банком данных» сетевых моделей [10]; графическая реализация позволяет наглядно и компактно представить данные о структуре взаимосвязей, существующих типах оборудования и др. [11];
- разработка способов вывода данных; при матричной реализации [12, 13] программа выводит список вершин, через которые проходит кратчайший маршрут (с указанием длины маршрута); при графической реализации [14, 15] кратчайший маршрут выделяется другим цветом (также выводится список вершин и длина маршрута);
- разработка способов представления сетевых моделей [16, 17];
- разработка способов «интерпретации» информации о результатах оптимизации; программа позволяет в процессе работы данные о вершинах и маршрутах вносить в базы данных – это значительно упрощает сопоставление данных, кроме того, программа позволяет автоматически сформировать и сохранить отчет и продолжить процесс оптимизации по другому параметру;
- необходимо предусмотреть наличие библиотек сетевых моделей, баз данных о вершинах, ребрах сети;
- немаловажным атрибутом программы является модуль «справочник оборудования»;
- процесс повышения организационно-технологической надежности предусматривает многопараметрическую оптимизацию технологической цепочки, поэтому необходимо предусмотреть возможность автоматического формирования отчетов и записи данных в типизированный файл.

Независимо от способов ввода, представления сетевых моделей программная реализация предусматривает наличие трех массивов [16, 17]:

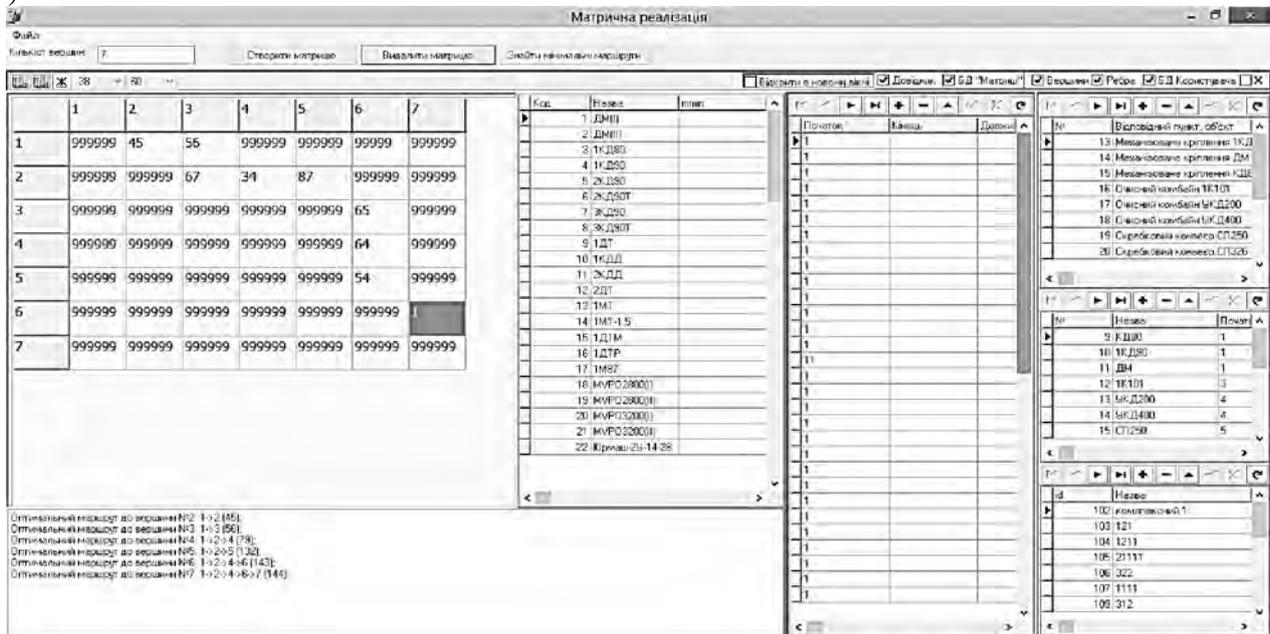
- $\{S\}$  – массив меток, при 0 – путь существует, при 1 – нет;
- $\{B\}$  – массив расстояний  $B[i, j]$  – длин дуг;
- $\{P\}$  – массив, который будет записывать длины от начальной вершины до рассмотренных вершин.

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

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

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

а)



б)

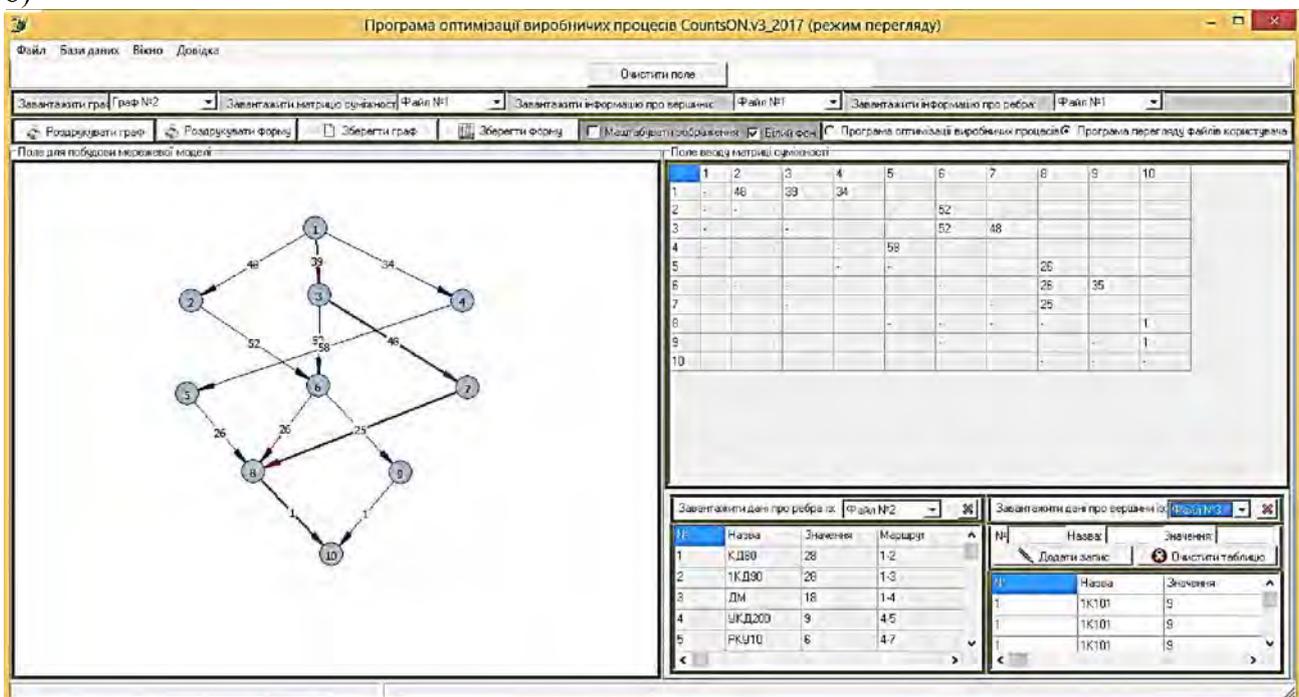


Рисунок 2 – Программная реализация поиска кратчайшего маршрута в сетевой модели: а) – матричная реализация; б) – графическая реализация

Предложенная реализация [18, 19] обладает рядом преимуществ:

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

- минимальное количество данных, с которыми работает программа; для сетевой модели, изображенной на рис. 1, необходимо заполнить 11 ячеек формы (количество ячеек соответствует количеству единиц оборудования); стандартная программная реализация предусматривает заполнение  $N^2 = 121$  ячеек, кроме того, можно исключать типы оборудования и альтернативы из расчетов;

- возможность сохранения, формирования, просмотра файлов отчета.

Стоит отметить, что при матричной реализации данные о сетевой модели представляются в виде матрицы смежности, если маршрут существует то в ячейку стоит ввести значение оптимизационного параметра, если маршрут отсутствует или его стоит исключить из процесса расчета, то в ячейку стоит ввести значение «999999» (программная бесконечность). Рабочая область окна включает набор инструментов редактирования и форматирования матриц смежности, набор баз данных о вершинах, ребрах сетевой модели, характеристиках объектов технологической цепочки. Существует возможность вывода сохраненных данных. В процессе работы пользователь решает, с какими данными стоит работать, по желанию можно отключить все вспомогательные рабочие области окна.

Графическая реализация предусматривает задание данных о технологической цепочке в виде ориентированного графа. Существует возможность подключения вспомогательных панелей (базы данных, формирование отчетов и др.). Как видно из рис. 2 б кратчайший маршрут выделяется другим цветом (красный).

Программа позволяет формировать отчеты на базе ранее полученных данных (рис. 3).

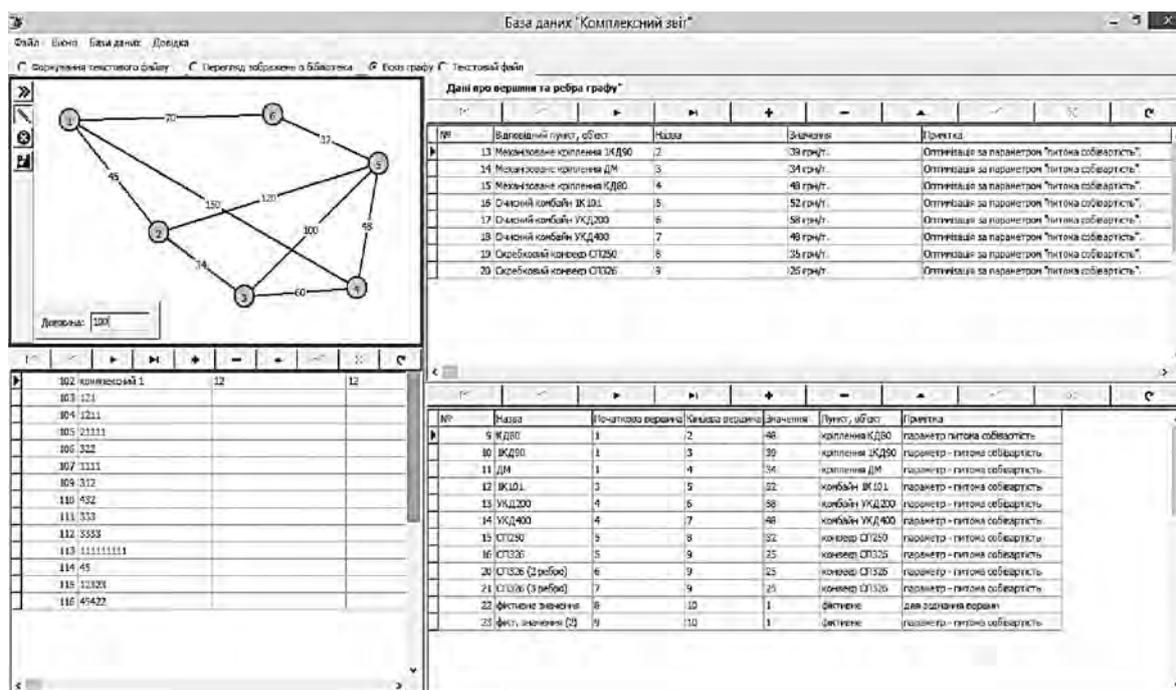


Рисунок 3 – «Система формирования отчетов» программы

Активное окно модуля «Система формирования отчетов» работает в 4 – х режимах:

- режим «формирования текстового файла»; в данном случае программа позволяет внести и добавить в базу данных информацию о сетевой модели (количество вершин, количество ребер, начальная и конечная вершина), результаты оптимизации (точки через, которые проходит кратчайший маршрут, параметр по, которому проводилась оптимизация, значение параметра); по желанию все приведенные данные могут быть представлены в виде текстового файла отчета;

- режим «просмотра файлов из библиотеки», данный режим позволяет просматривать графические файлы созданные пользователем, кроме того, существует возможность распечатки, загрузки и редактирования сторонних файлов;

- «эскиз графа», в данном режиме пользователь создает произвольный эскиз графа, существует возможность сохранения изображения в отдельный файл;

- «текстовый файл», основное назначение – создание и редактирование текстовых файлов, существует возможность загрузки, редактирования, вывода на печать других текстовых файлов, которые не созданы в программе.

Следует отметить, что основная концепция данной программы заключается в доступе ко всем возможностям программы (базы данных, справочная информация, создание графических и текстовых файлов, вызов библиотеки сетевых моделей) независимо от модуля, с которым работает пользователь (поиск оптимального маршрута, создание файлов отчета и др.).

Как отмечалось ранее, соблюдение всех принципов системных подходов приводит к тому, что программа позволяет проводить структурную оптимизацию, т.е. получать серию различных системных эффектов в зависимости от накладываемых ограничений.

Основным преимуществом данной реализации, среди других подобных, является возможность создания «банка данных сетевых моделей», т.е. для различного набора ограничений, ситуаций, которые встречаются на практике эксплуатации месторождения или другого производства, получать отдельные сетевые модели.

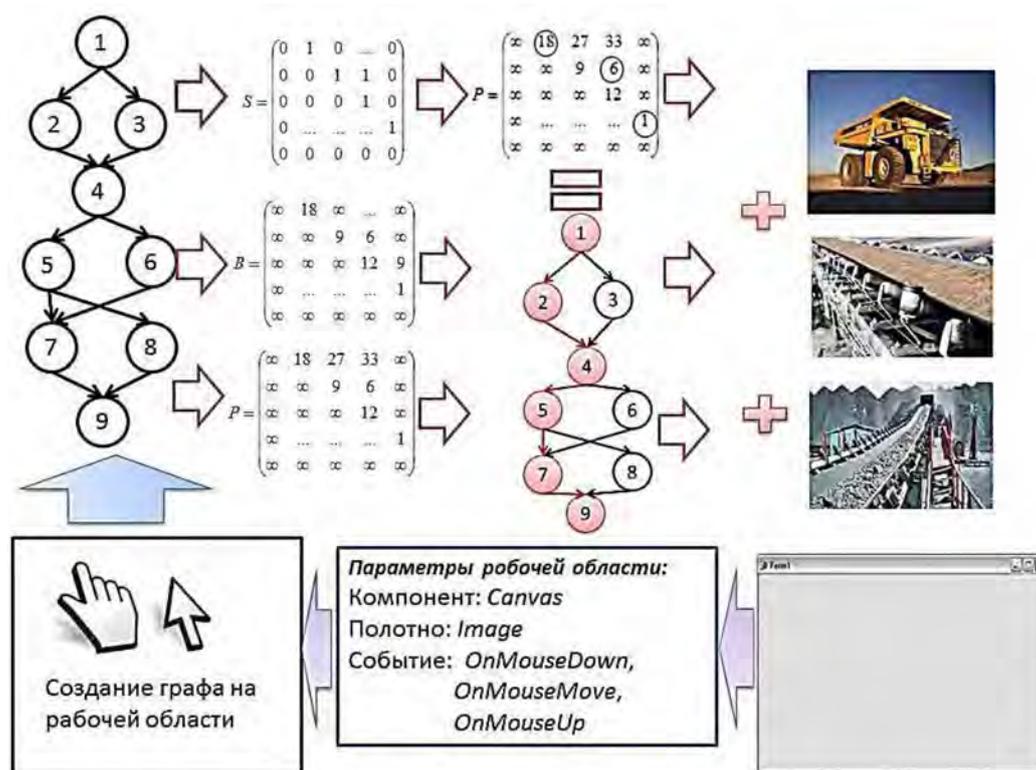


Рисунок 4 – Принцип программной реализации процесса поиска оптимальной цепочки (на основе применения сетевых моделей)

Область применения программы не ограничивается оптимизацией уже существующей технологической цепочки. Приложение позволяет проводить экспресс-анализ возможных вариантов производственного процесса на стадии проектирования. Пользователь может систематизировать данные о различных типах оборудования, это в дальнейшем может быть использовано в качестве оценки приоритетов на изготовление техники отечественными машиностроительными заводами.

Формализация универсальных графов и представление их в виде сетевых моделей позволяет применить алгоритмы оптимизации на основе сетей. Для поиска рациональных технологических цепочек было разработано и зарегистрировано Институтом физики горных процессов НАН Украины соответствующее программное обеспечение «Программа оптимизации сетевых моделей». Применение методов дискретной математики в производстве позволило решить задачу выбора очистного оборудования с позиции максимизации производительности и минимизации удельной себестоимости. Стоит отметить, что область использования классических алгоритмов 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.

Стоит отметить, что использование «жадных алгоритмов» (т.е. алгоритмов заключающихся в принятии локально оптимальных решений на каждом из этапов, при этом подразумевается, что и окончательное решение будет оптимальным), позволяет найти единственное правильное решение, при этом скорость реализации высока, а вычислительные ресурсы минимальны.

### Список литературы

1. Гринев В.Г. Алгоритм оптимизации сетевых моделей для выбора рациональных технологических цепочек очистного оборудования / В.Г. Гринев, П.П. Николаев // материалы III межд. конф. «Техногенные катастрофы: модели, прогноз, предотвращение». – Днепропетровск. – 2013. – НГУ. – С. 90 – 95.
2. Хорольский А.А. Рациональный выбор состава механизированных комплексов в условиях эксплуатации забоев Донбасса / А.А. Хорольский, В.Г. Гринев, В.Г. Сынков // Материалы международной конференции «Форум горняков – 2015», 30 сентября – 3 октября 2015 г., Днепропетровск. – Д.: Национальный горный университет, Т1 – С58–68.
3. Хорольський А.О. Вдосконалення структури технологічних ланцюжків очистного обладнання на основі оптимізації мережевих моделей / А.О. Хорольський, В.Г. Гріньов, О.П. Калиущенко // Форум гірників – 2017: матеріали міжнар. конф., 4 – 7 жовтня 2017 р., м. Дніпро. – Д.: Національний гірничий університет, 2017. – С. 55-61.
4. Гринев В.Г. [моногр.] Графы и сети для выбора горно-шахтного оборудования / В.Г. Гринев. – Днепро: Пороги.- 2016. – 247 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. Оценка перспектив повышения эффективности получения конечной продукции из угля // Физико-технические проблемы горного производства. – №11. – 2008. – С.126–135.
8. Dijkstra E. W. A Note on Two Problems in Connexion with Graphs / Numerische Mathematik. – 1959. – 269–271 pp.
9. Floyd R.Z., Algorithm 97, Shortest Path, Comm. ACM, 5, p.345, 1962.
10. Гріньов В. Г. Математична модель оптимізації та впорядкування структури технологічних процесів (на прикладі гірничо-видобувної галузі) / В.Г. Гріньов, А.О. Хорольський // Тези доповідей II Міжнародної науково-технічної конференції «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення – 2017» (17–19 жовтня 2017 р.). Житомир : Вид. О. О. Євенок, 2017. — С. 80–81.

11. 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.
12. Ahuja, Ravindra K. Network flows: theory, algorithms and applications / Ravindra K. Ahuja, Thomas L. Magnanti, James B. Orlin. — Prentice Hall Inc. — 1993. — 863 pp.
13. Aldous, Joan M. Graphs and Applications an Introductory Approach / Joan M. Aldous, Robin J. Wilson. — Springer. — 2004. — 454 pp.
14. Daskin S. Mark. Network and Discrete location: Models, Algorithms and Application. / Mark S. Daskin. — John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. — 2013. — 516 pp.
15. Jungnickel D. Graphs, Networks and Algorithms. / Dieter Jungnickel. — Springer, Heidelberg, New York, Dordrecht, London. — 2013. — 675 pp.
16. Even Sh. Graph algorithms. / Shimon Even, Guy Even. — Cambridge University Press, New York. — 2012. — 189 pp.
17. Courcelle B. Graph Structure and Monadic Second-Order Logic. A Language-Theoretic Approach / Bruno Courcelle, Joost Engelfriet. — Cambridge University Press, New York. — 2012. — 728 pp.
18. Гринев В.Г. Обоснование параметров выбора комплектаций очистного оборудования с учетом области рациональной эксплуатации / В.Г. Гринев, А.А. Хорольский // Вісті Донецького гірничого інституту. — 2017. — №2 (40). — С. 139–144.
19. Хорольский А.А. Выбор комплексов горно-шахтного оборудования на основе теории графов / А.А. Хорольский, В.Г. Гринев, В.Г. Сынков // Науковий вісник НТУУ «КПІ». Серія: «Гірництво». — 2016. — № 31. — С.57–64.