

УДК 658.012.23

**В. С. Маевский** (д-р техн. наук, проф.)<sup>1</sup>, **Л. Н. Захарова**  
(аспирант)<sup>1</sup>, **А. В. Мерзликин** (канд. техн. наук, доц.)<sup>2</sup>

Донецкий государственный университет управления<sup>1</sup>

maevsky2008@rambler.ru

Донецкий национальный технический университет<sup>2</sup>

## **СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РИСКОВ НЕВЫПОЛНЕНИЯ ПРОГРАММЫ РАЗВИТИЯ ГОРНЫХ РАБОТ НА УГОЛЬНОЙ ШАХТЕ**

Разработана и испытана стохастическая модель для количественной оценки рисков невыполнения программы развития горных работ на угольной шахте. Учтены особенности подземной добычи угля в виде тренда темпов проходки и вариации подготовительных и очистных работ, а также взаимной корреляции входных параметров модели.

**Ключевые слова:** риски, стохастическое моделирование, управление проектами и программами.

### ***Введение***

Обеспечение рентабельности и безопасности угольной промышленности Украины является одной из основных стратегических задач народного хозяйства [1]. Однако с ростом глубины разработки и усложнением экономических условий, в которых угольная промышленность должна обеспечивать энергетическую безопасность нашего государства, возрастают риски производства, связанные с неопределенностью горно-геологических условий разработки, снижением надежности техники под действием интенсивного горного давления, повышением вероятности аварий, а также усилением неустойчивости финансирования проектов в условиях посткризисной экономики. В таких условиях адекватная оценка риска горного производства и совершенствование его параметров для снижения факторов риска является критически важной, что обуславливает актуальность выбранной темы исследований

По своей структуре программа развития горных работ угольной шахты очень близка к проектно-ориентированному стилю управления производством. Анализ проектных рисков посвящен ряд исследовательских работ. Модели для качественной и количественной оценки рисков предложены для атомных электростанций [2], инвестиционных строительных проектов [3], систем управления охраной труда [4], природопользования [5] и других процессов, отличающихся

сложной структурой, большим количеством входных параметров и высокой степенью неопределенности, которая и создает условия для возникновения рисков.

При этом исследователи часто прибегают к аналитическим моделям управления риском, основанным на формулах теории вероятности, а также системах алгебраических или дифференциальных уравнений, решение которых требует незначительных машинных ресурсов. Вместе с тем, как показывают авторы статьи [6] имитационные модели гораздо лучше приспособлены для отражения произвольной и сколь угодно сложной структуры управления проектом, а их универсальность компенсирует дополнительные затраты времени вычислений. Именно такой подход наиболее приемлем для описания процесса управления проектом в угольной шахте, условия работы которой характеризуются отличительными особенностями, главными из которых являются следующие.

- 1) Подземной добыче угля присущ очень высокий риск снижения надежности очистных работ и потери добычи из-за неопределенности горно-геологических условий разработки.
- 2) Заработная плата слабо зависит от объема выработки.
- 3) Темпы проходки уменьшаются с удлинением подготовительной выработки.
- 4) Доля основных фондов в себестоимости продукции очень высока (более 80%). Основная стоимость фондов сосредоточена в горных выработках.
- 5) Износ пассивных основных фондов (горных выработок) происходит не только в процессе их активного использования, но и из-за высокого уровня горного давления, которое действует всегда независимо от того, используется выработка в данный момент или нет.
- 6) Износ активных основных фондов и, в частности, добычной и проходческой техники происходит в тяжелых подземных условиях эксплуатации очень быстро. Поэтому техника не успевает морально устаревать, в результате чего технический прогресс почти не влияет на моральный износ техники.
- 7) Вид продукции угольной шахты один (товарный уголь), что повышает уровень рисков его производства.
- 8) Проходка горных выработок как внутренний продукт превращается (материализуется) в основные фонды предприятия.
- 9) С неизбежным ростом глубины и протяженности горных выработок относительный прирост добычи отстает от относительного прироста основных фондов.
- 10) Развитие добычи невозможно без постоянного пополнения пассивной части основных фондов (подготовительных выработок),

тогда как в других отраслях, например в машиностроении, это возможно за счет модернизации.

- 11) Увеличение темпов проходки горных выработок повышает риск снижения фондоотдачи из-за падения качества крепления и последующего ухудшения устойчивости выработок.
- 12) Нормы расхода материальных ресурсов и их удельный расход в частности могут в зависимости от вариации горно-геологических условий меняться в одном и том же забое в несколько раз.
- 13) Процедуры и алгоритмы массового обслуживания горно-шахтного оборудования (ГШО) имеют существенные особенности, поскольку надежность горных машин и механизмов сильно ограничена стесненностью подземного рабочего пространства, слабой или нулевой мобильностью ГШО, необходимостью ремонта ГШО на месте в проходческом или очистном забое.

Все выделенные обстоятельства увеличивают неопределенность из-за случайных колебаний входных параметров программы развития горных работ и прямо или косвенно повышают риск производства угля. На сегодняшний день нет обоснованной математической модели для осуществления количественной оценки риска угольной шахты с учетом особенностей ее функционирования. В связи с этим **целью** данной работы является оценка рисков программы развития горных работ на угольной шахте с учетом неопределенностей геологического, технического, финансового и организационного характера. Для достижения поставленной цели необходимо **решить задачу** разработки и апробации стохастической модели программы развития горных работ угольной шахты.

### ***Постановка задачи***

Последовательность процессов горного производства представляет собой логически связанную причинно-следственную связь событий, которые можно описать терминами условной вероятности. Например, если темпы проходки конвейерного штрека будут ниже на 30% планируемых, тогда очистной забой будет введен в действие с опозданием на 3 месяца, в результате чего плановая добыча будет невыполнена на 250 тыс тонн. В общем виде такая причинно-следственная связь описывается средствами математических графов [7]. Граф состоит из событий или отдельных моментов времени, которые связаны между собой дугами.

Для ввода в работу очистного забоя необходимо выполнить сотни отдельных процессов горного производства. Поэтому мультиграф будет состоять из десятков а то и сотен событий, которые связаны между собой направленными от прошлого к будущему дугами, то есть мультиграф является асимметрическим и направленным.

Мультиграф описывает процесс, применяемый в сетевом планировании. Одним из наиболее важных параметров сети является критический путь, от которого зависит время выполнения всего проекта или программы. В данной работе для нахождения критического пути применен алгоритм Дж. Келли и М. Фишберга [8,9, 10]. Веса дуг мультиграфа определяются с помощью специально разработанных математических моделей. Так, время проведения определенного отрезка (планового задания) подготовительной выработки находится по зависимости

$$v = v_0 \exp(-0,035t) \pm \Delta, \quad (1)$$

где  $v_0$  – начальная скорость проведения выработки,  $t$ - время проходки,  $\Delta$  – случайная вариация темпов проходки.

Начальные темпы проходки определяются горно-геологическими условиями, а также применяемой техникой для проведения выработки, типом и плотностью крепи.

Текущая добыча из очистного забоя определяется согласно зависимости

$$d = d_0 \pm \Delta_1, \quad (2)$$

где  $d_0$  – плановая добыча, рассчитанная согласно нормативной методики,  $\Delta_1$ - вариация добычи, определяемая сэмплингом из распределения вариации добычи.

Случайная вариация темпов проведения подготовительных выработок и подвигания очистных забоев находится путем сэмплинга темпов проходки и подвигания лав из распределений, параметры которых были установлены на основе статистической обработки фактических данных. Проверка полученных выборок с помощью критерия Пирсона подтвердила, что гистограммы вариации темпов подготовительных и очистных работ не противоречат нормальным или усеченным нормальным распределениям.

В процессе сэмплинга учитывались возможные корреляционные зависимости между входными факторами. Для этого один из факторов выбирался из всего диапазона заданного распределения, а второй – из диапазона, который получали в сечении с абсциссой, равной величине первого фактора.

В связи с тем, что при каждом запуске стохастической модели все входные величины выбираются из случайных значений, решения каждый раз будут отличаться. В результате вместо одного критического пути появляется целый список таких путей. При этом алгоритм подсчитывает число появлений каждого индивидуального критического пути. При большом числе запусков стохастической модели (например 200 запусков) частоты появлений критических путей приближаются к их вероятности, которые и являются количественной мерой рисков.

Шаг приращения времени в процессе стохастического моделирования принимается на основе автокорреляционного анализа посуточной добычи и проходки. Оказалось, что существует достоверная связь между темпами основных процессов горного производства, повторяющихся через 6-7 суток. В итоге шаг приращения времени в процессе стохастического моделирования принимали равным 7 суткам. В этом случае характер вариации темпов проходки и добычи является стабильным и не зависит от второстепенных факторов.

Таким образом программа развития подземных горных работ на угольной шахте описывается антисимметрическим ориентированным мультиграфом, веса дуг которого определяются стохастической моделью, имеющей нестационарную экспоненциально затухающую трендовую составляющую и вариационную компоненту, распределение которой согласуется с нормальным законом, а величина рисков невыполнения программы горных работ определяется стохастическим моделированием с шагом по времени, равным 7 суткам..

### **Описание алгоритма стохастического моделирования и анализ его результатов**

Алгоритм стохастического моделирования подготовительных и очистных процессов горных работ имеет следующий вид. Подготовка данных для моделирования начинается с составления совместной планограммы Ганта очистных и подготовительных работ (таблица 1).

Таблица 1. График проходки некоторых выработок на 2010 год, м/мес

<b>Участок УПР-4</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<u>Бригада.Гембора</u>												
Конв штр центр пан бл 8												
Конв.ход.ц.п.бл.8		150	150	150								
Конв.ход.ц.п.бл.8					100	150	150	150	150	150	150	80

Такая объединенная программа записывается в виде таблицы 2 и представляется в виде графа. Ребра (векторы) графа представлены отдельными работами, например, «проведение ходка центральной панели блока 8», или «отработка 4 южной лавы блока 10» и т.д. Каждый вектор графа имеет вершины, обозначающие моменты времени начала и окончания работы, и указывающие с какой вершины и в какую направлен вектор. Каждый вектор имеет конечную вероятность.

Таблица 2. Пример исходных данных для стохастического моделирования

Номер работы (вектора)	Вероятность	Откуда	Куда	Закон распределения	Коеф вариации	Код работы	Объем	Темпы	Объем	Темпы	Объем	Темпы
1	1	44	55	2	0,3	1	350	70				
2	1	32	45	2	0,3	0	960	70				
4	1	14	15	2	0,3	1	120	40	405	45		
5	1	26	27	2	0,3	1	420	140	600	100	460	140

Если точно известно, что эта работа будет выполняться согласно плану работ, тогда вероятность вектора равна единице. В противном случае вероятность вектора меньше единицы, а величина вероятности задается на основе предварительного анализа моделируемого объекта, в частности часто величина вероятности определяется на основании экспертных оценок.

Каждый вектор характеризуется своим коэффициентом вариации и законом распределения. В исходных данных вводится код работы. Например очистные работы имеют код 1, подготовительные 0 и т.д. В зависимости от кода компьютер выбирает соответствующую модель сэмплинга и алгоритм стохастического подсчета темпов выполнения работы. Так при коде равном 1 компьютер использует текущую порцию плановой добычи из лавы, которая должна накапливаться из суммы недельных добыч, темпы которой указываются в исходных данных.

При накоплении добычи используется следующая пара исходных данных: очередной планируемый объем добычи и ее текущие темпы. Такой подход весьма удобен для моделирования реальных ситуаций, например изменения темпов подвигания лавы на участках перехода малоамплитудной нарушенности и т.п.

Так, данные последней строки таблицы означают, что работа под номером 5 выполняется в обязательном порядке и осуществляется между моментами времени 26 и 27. Средние темпы данной работы распределены согласно нормальному закону (его код равен 2), коэффициент вариации темпов составляет 30%. При этом первые 420 тыс. тонн угля планируется добыть со средними темпами 140 тыс. т/мес, последующие 600 тыс. тонн с темпами 100 тыс. т/мес и последние 460 тыс. тонн с темпами 140 тыс т/м.

Данные строки 2 говорят о том, что работа №2 выполняется между моментами времени 32 и 45, закон распределения ее начальных темпов согласуется с нормальным, коэффициент вариации составляет 30%,

причем коду работы 0 соответствует проходка выработки. Общая протяженность выработки составляет 960м, причем начальная скорость ее проходки составит 70м/мес.

Стохастическое моделирование годовой программы развития горных работ выполнялось для годовых программ современных производительных угольных шахт Донбасса. Оценивались годовые программы за 2009, 2010 и 2011 годы. Ниже приводится в качестве примера результаты моделирования рисков невыполнения годовых программ ш/у Покровское. Указанная угольная шахта отрабатывает запасы пласта  $d_4$  в весьма сложных горно-геологических условиях, которые существенно повышают неопределенность планирования и увеличивают риск невыполнения годовой программы горных работ в целом.

Мультиграф горных работ состоит в зависимости от года, в котором осуществлялся анализ, из 55-70 узлов и 92-112 векторов, обозначающих отдельные этапы основных производственных процессов (подготовку или отработку запасов). В процессе моделирования подсчитывается количество сценариев (реализаций критических путей), которые возникают по ходу моделирования. Чем сложнее граф работ и чем сильнее вариация темпов горных работ, тем разнообразнее сценарии, которые возникают при случайных комбинациях возможных значений темпов добычи и проходки.

Сценарий характеризуется критическим путем графа, который определяется в виде последовательности узлов. Кроме того вычисляются самые ранние и самые поздние сроки начала и окончания каждой работы, а также ее длительность в каждом узле графа.

На основании полученных данных можно осуществлять детальный анализ всего проекта с учетом всех возможных нюансов в каждом узле или векторе. Ниже приведены результаты стохастического моделирования при исходных условиях и ограничениях, которые обсуждались выше.

В результате стохастического моделирования было выделено 20 возможных сценариев, при реализации которых критический путь проекта (программы развития горных работ на 2010) пролегает через следующие последовательности узлов графа (таблица 3).

В конце каждой строки указана вероятность реализации данного сценария. Практический интерес представляют те сценарии, вероятность которых значительна. В данном анализе целесообразно проанализировать сценарии, вероятность которых превышает 10%.

Наиболее вероятные сценарии реализации критического пути связаны с подготовкой 1 южной лавы блока 10, которую будут выполнять конкретные бригады. С этими подготовительными работами связаны критические пути 1, 2, 8, 9, 15, 16 и 20. Суммарная вероятность указанных сценариев составляет 55%.

Таблица 3. Список наиболее вероятных сценариев критического пути

Номер критического пути	Критический путь	Вероятность, %
1	-1-44-44-45-45-46-46-55	29
2	-1-44-44-48-48-49-49-55	17
3	-1-44-44-46-55	13
4	-1-35-35-36-36-37-37-55	8
5	-1-22-22-55	5
6	-1-27-27-28-28-29-29-55	4
7	-1-23-23-24-24-25-25-26-26-55	3
8	-1-44-44-45-44-48-45-46-46-55-48-49-49-55	3

Первый вектор (вектор №75 с узла 1 в узел 44) в указанных цепочках представляет собой проведение 1 южного конвейерного штрека блока 10 до точки, с которой будет нарезаться монтажный ходок 1 южной лавы. Проверка по критерию Колмогорова-Смирнова показала, что гистограмма согласуется с нормальным законом распределения (рис. 1). Средняя длительность этой работы составляет  $45,6 \pm 13,4$  недели, хотя планируется ее выполнить за 6 месяцев или 24 недели. Минимальная длительность выполнения указанной подготовительной работы может составить 16 недель с вероятностью не более 2%, а максимальная 75 недель с такой же вероятностью. Наиболее вероятно проведение указанного участка выработки в течение 35-60 недель, что видно на гистограмме сроков выполнения данной работы, приведенной на рис. 1

Как следствие, высока вероятность невыполнения работ в срок по подготовке монтажного ходка 1 южной лавы блока 10. Эта работа входит в критические пути по сценариям 2, 8, 9, 15, 16 суммарная вероятность которых составляет 28%. При этом критическим является процесс подготовки ходка со стороны вентиляционного штрека.

Определенный риск связан с отработкой 6 южной лавы центральной панели блока 8, 7 южной лавы блока 6, 4 южной лавы блока 10 и проходкой вспомогательного уклона блока 10 (сценарий 3, имеющий вероятность 13%). Есть также риск не уложиться в сроки при проведении 1 и 2 северных конвейерных штреков (сценарий 4).

Сопоставление прогноза с фактическим выполнением программы развития горных работ показало хорошее совпадение как по объектам рисков, так и по количественным задержкам выполнения программы развития горных работ. Расхождение средних прогнозных сроков и фактических не превысила 32%. В результате невыполнения годовой программы развития горных работ фактическая себестоимость угля увеличилась по сравнению с плановой на 5,6%, а потеря прибыли из-за нереализованной продукции составила 640 млн. гривен.



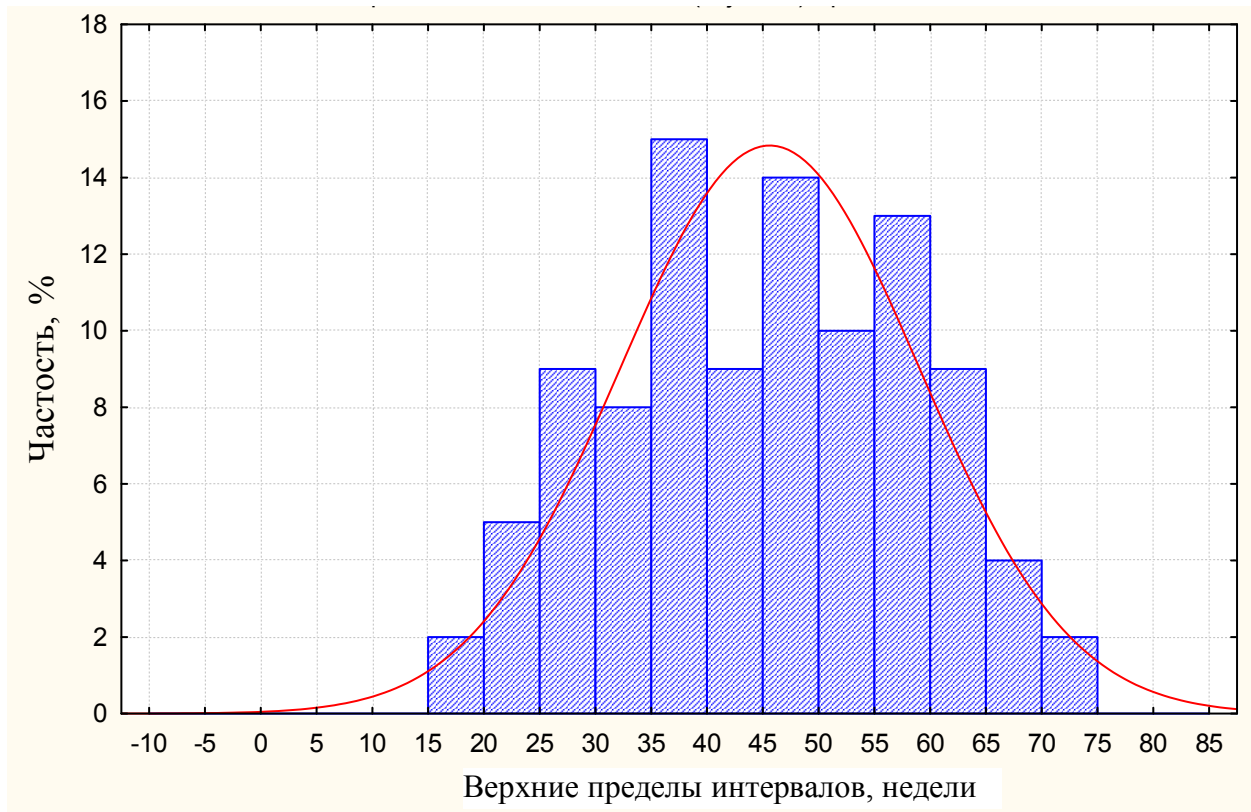


Рисунок 1 – Гистограмма сроков проведения 1-го южного конвейерного штрека блока 10 шахтного поля

### **Заклучение**

Программа развития горных работ угольной шахты моделируется в виде антисимметрического ориентированного мультиграфа, веса дуг которого определяются стохастической моделью, имеющей нестационарную экспоненциально затухающую трендовую составляющую и вариационную компоненту, распределение которой согласуется с нормальным законом, а величина рисков невыполнения программы горных работ определяется стохастическим моделированием с шагом по времени, равным 7 суткам.

С помощью разработанной имитационной модели выполнена количественная оценка рисков невыполнения программы горных работ на угольной шахте и выделены критические пути, которые имеют максимальный риск.

### **Список литературы**

1. Пискунова Н.В. Системный подход к разрешению проблем шахт Украины / Н.В. Пискунова // Уголь Украины. – 2002. – №5. – С.13-16.
2. Бегун В.В. Задача определения текущего риска объекта повышенной опасности / В.В. Бегун // Математичні машини і системи. – 2011. – №1. – С. 120-126.

3. Плахотников К.В. Организация управления рисками инвестиционных строительных проектов / К.В. Плахотников // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Вып 1/7 (49). – С.17-19.
4. Исследование риск-ориентированного подхода в системе управления охраной труда (СОУТ) машиностроительного предприятия / Н.А. Касьянов, В.А. Медяник, О.В. Гунченко, и др. // Вісник КДПУ: Нові технології в машинобудуванні. – 2008. – Вип.4/(57). – Ч. 2. – С.75-77.
5. Ковальчук В.П. Імітаційно-ігровий метод сценарного моделювання в системах природокористування за умов невизначеності і ризику / В.П. Ковальчук, Т.В. Матяш // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки. – 2010. – Вип. 3. – С.37-45.
6. Евсеев В.В. Моделирование функционирования проектной организации в условиях риска и неопределенности / В.В. Евсеев, Ю.В. Шовкопляс // Вестник ХНТУ: Информационные технологии. – 2011. – №2(41). – С.135-141.
7. Латкин М.А. Системное представление системы управления проектными рисками предприятия / М.А. Латкин // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – №2 (43). – С. 141-145.
8. Библиотека алгоритмов 16-506: справочное пособие / М.И. Агеев, В.П. Алик, Р.М. Галис и др. – М.: Советское радио, 1975. – 176с.
9. Kelly J.E. Critical path planning and scheduling / J.E. Kelly // Proc. Eastern Joint Computer Conference. – Michigan, 1969. – P. 121-123.
10. Fishberg M.C. Least cost estimating and scheduling / M.C. Fishberg. – IBM 650 Program Library. File #10.3.005.

*Надійшла до редакції 30.09.2011.*

*Рецензент: канд. техн. наук, проф. Анопрієнко О.Я.*

**В.С. Маевський<sup>1</sup>, Л.М.Захарова<sup>1</sup>, Мерзликін А.В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Донецький державний університет управління, <sup>2</sup>Донецький національний технічний університет

**Стохастичне моделювання ризиків невиконання програми розвитку гірничих робіт на вугільній шахті.** Розроблено та випробувано стохастичну модель для кількісної оцінки ризиків невиконання програми розвитку гірничих робіт на вугільній шахті. Враховано особливості підземного видобутку вугілля у вигляді тренду темпів проходки і варіації підготовчих та очисних робіт, а також взаємної кореляції вхідних параметрів моделі.

**Ключові слова:** ризики, стохастичне моделювання, управління проектами і програмами.

**V.C. Maevsky<sup>1</sup>, L.N. Zaharova<sup>1</sup>, A.V. Merzlikin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Donetsk state university of management, <sup>2</sup>Donetsk National Technical University

**Stochastic Simulation of Risk of a Program for Mining Development at a Coal Mine**

Stochastic model has been developed and successfully tested for assessment of failure to accomplish a program for mining development at a coal mine. Underground conditions were considered as a driving rate trend and variation of coal face advance. Model accounts symmetric correlation between input factors

**Keywords:** risks, stochastic simulation, project management.