

Исследование изменчивости темпов проходки под влиянием стохастических факторов

Ильяшов М. А.^{*}, Чумаченко И. И., Яйцов А. А., Варвашенко В. П.,
Захарова Л. Н.

ЗАО «Донецксталь», Донецк, Украина

Поступила в редакцию 14.01.10, принята к печати 22.02.10.

Аннотация

Выполнен анализ факторов риска, оказывающих существенное влияние на темпы проведения подготовительных выработок. Установлено, что основными являются геологические факторы, надежность проходческого оборудования, уровень оплаты труда и ряд других. Доказано, что темпы проходки выработки узким забоем представляют собой нестационарную функцию от времени проходки, трендовая составляющая которой затухает по экспоненте с показателем $-0,0355$. Автокорреляционная функция темпов проходки описывается кубической зависимостью и имеет знакопеременный характер.

Ключевые слова: темпы проходки, геологические факторы, риски.

Введение

Уголь всегда был и остается гарантом энергетической независимости Украины, что становится еще очевиднее после мирового экономического кризиса [1]. Однако угольные месторождения нашего государства отрабатываются на глубине 700–900 м и более, что усложняет добычу угля по ряду важных факторов. Одним из таких факторов является увеличение уровня горного давления и усложнение горно-геологических условий отработки в целом [2]. Эти факторы имеют стохастическую природу, а количественная оценка их вариации весьма сложна. Случайное ухудшение горно-геологических условий приводит к непредвиденным негативным проявлениям горного давления, которые могут в несколько раз снизить темпы подготовительных и очистных работ, что существенно повышает риск горного производства. В связи с этим разработка новых методик оценки риска очистных и подготовительных работ в условиях сильной неопределенности является актуальной задачей.

Вместе с тем на сегодня методические подходы к количественной оценке рисков подземных горных работ разработаны недостаточно и, более того, не исследованы параметры случайной вариации факторов основных процессов подготовки и добычи угля. В связи с этим в данной работе исследуются характеристики случайного разброса темпов подготовительных и очистных работ в условиях неопределенности.

Обоснование объекта исследования

В качестве базовой шахты для исследований принята шахта Красноармейская-Западная №1 в связи с тем, что она является типичным примером производства, которое отрабатывает угольный пласт d_4 в весьма сложных горно-геологических условиях. Вместе с тем сам пласт является высокопроизводительным и перспективным для развития горного производства. Строение угольного пласта приведено на рис. 1. Пласт имеет сложное строение на большей части шахтного поля, а его мощность изменяется от 0,9 м до 2,2 м. В настоящее время горные

^{*} E-mail: ggf@mine.dgtu.donetsk.ua

работы ведутся в блоке 10, запасы в пределах которого залегают на глубине свыше 800м, причем угольный пласт интенсивно изрезан малоамплитудными нарушениями, предсказать которые без предварительной разведки подготовительными работами практически невозможно.

Сводная
стратиграфическая
колонка
М 1:200

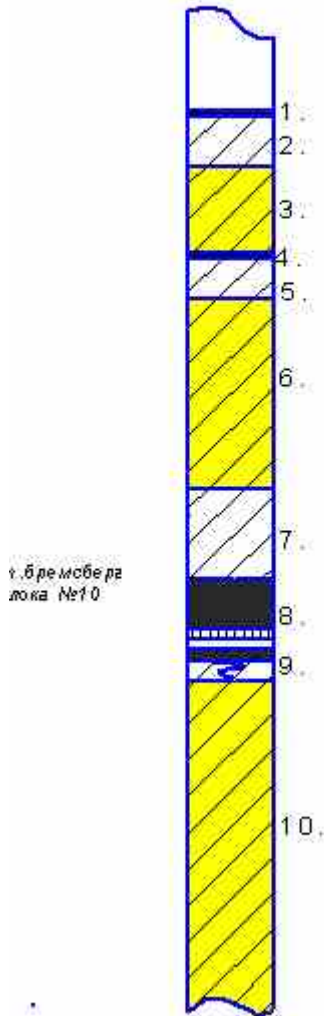


Рис. 1. Структура пласта

Так вся верхняя граница блока 10 отрабатывается у Котлинского надвига, амплитуда которого изменяется в широких пределах от 30м до 120м, причем зона дробления в окрестности надвига распространяется на расстояние от его сместителя равное 141м, а ширина зоны интенсивного проявления надвига составляет 167м.

Так прохождение вентиляционного штрека 1 южной лавы бл.№10 будет осуществляться в интервале ПК0–ПК160 в зоне интенсивного проявления мелких разрывов у Котлинского надвига (рис. 2). Амплитуда надвига по данным горных работ составляет 36-40 м. Угол падения плоскости сместителя 12-30°. На этом участке ведение горных работ будет осложнено повышенной трещиноватостью горных пород и их обрушением.

Горными работами могут быть встречены мелкоамплитудные тектонические нарушения, переход которых будет сопровождаться повышенным выделением газа метана и воды, обрушениями пород кровли. При прохождении выработки обводненность будет связана с двумя водоносными горизонтами: песчаником d_3 Sd_4 , залегающим в почве, и песчаником d_4 Sd_4^1 , залегающим в кровле. Приток воды будет увеличиваться по мере удлинения выработки и составит 15-20 м³/час. В местах пониженного профиля необходимо будет предусмотреть сооружение водосборников.

Воды, формирующиеся в горных выработках, хлоридно-натриевого типа с минерализацией 16,5-28,3 г/л, жесткие, сильноагрессивные к стальным конструкциям. Это представляет дополнительный риск с точки зрения снижения устойчивости подготовительных выработок из-за корроирования рамных металлических крепей.

Природная газоносность угольного пласта на участке проведения выработки составляет 15.0-20.0 м³/т.с.б.м., природная газоносность песчаников - 10-18.9 м³/м³ породы. Повышенное выделение метана ожидается в зонах тектонических нарушений и повышенной трещиноватости из песчаников, залегающих в почве и кровле, пласта спутника d_3 , залегающего на расстоянии 15,00-19,0 м, а также при проведении выработки в зоне влияния от Котлинского надвига.

На участке проведения выработки угольный пласт d_4 является угрожаемым по внезапным выбросам угля и газа, песчаники являются выбросоопасными. Угольный пласт является опасным по пыли, не склонен к самовозгоранию. Выработка не опасна по разрушению и прорыву метана из нее.

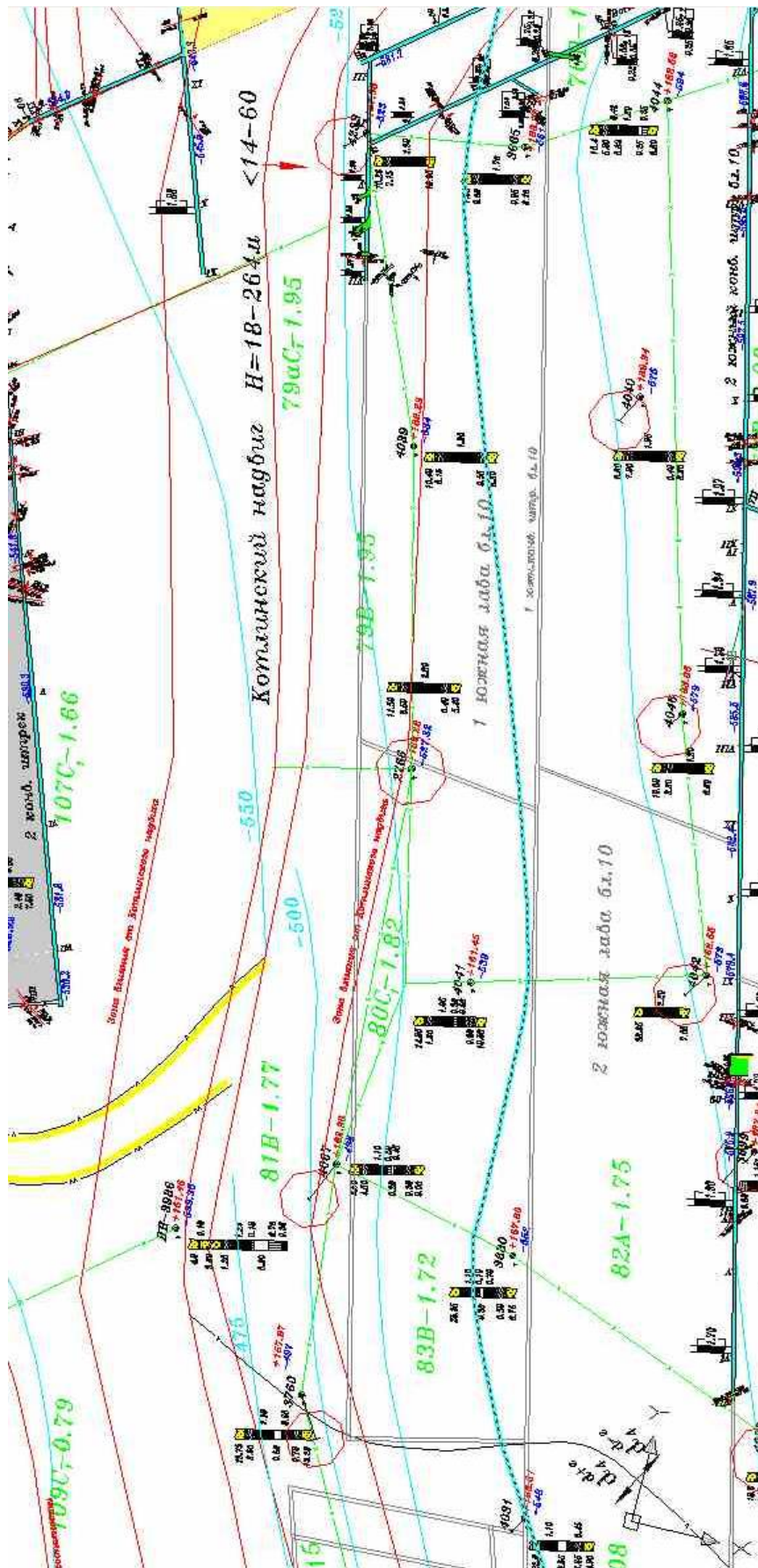


Рис. 2. Фрагмент плана горных выработок в районе Котлинского надвига

Выделение факторов риска и их анализ

Указанные особенности являются прямыми источниками повышения риска основных процессов горного производства. При этом чем больше вероятность падения темпов подвигания подготовительных забоев и добычи из лав, тем выше степень риска. Анализ условий отработки пласта показал, что главными факторами, вносящими максимальный вклад в повышение уровня риска являются следующие.

Малоамплитудные нарушения представляют собой главную угрозу, снижающую степень безопасности горных работ. Так при встрече малоамплитудного нарушения подготовительный забой входит в зону повышенной опасности с точки зрения возможного обрушения пород кровли, повышенного газовыделения из трещин, окружающих нарушение, выбросов угля, породы и газа, горных ударов. В результате темпы проходки в таких зонах уменьшаются из-за необходимости проведения специальных дополнительных мероприятий по снижению опасности негативных проявлений горного давления.

При переходе малоамплитудного нарушения очистным забоем происходит падение добычи в связи с аналогичными негативными проявлениями горного давления, которые были описаны выше. Для адекватной количественной оценки риска горного производства важно исследовать параметры вариации темпов проходки и добычи при случайном воздействии горно-геологических факторов, имеющих стохастическую природу.

На рис. 3 приведен характерный фрагмент плана горных выработок, на котором показан отрезок 3 южного конвейерного штрека блока 10. Видно, что трасса выработки пересекает множество малоамплитудных нарушений, угол падения которых изменяется от 20° до 90° , азимут простираения чаще всего составляет $130-150^{\circ}$, а амплитуда нарушений находится в диапазоне 0.2-1.4м. В среднем нарушение встречается через каждые 73м, а на сто метров выработки выпадает 1,37 нарушений со средней амплитудой 0,6м. Это весьма неблагоприятно сказывается на темпах подготовительных и очистных работ.

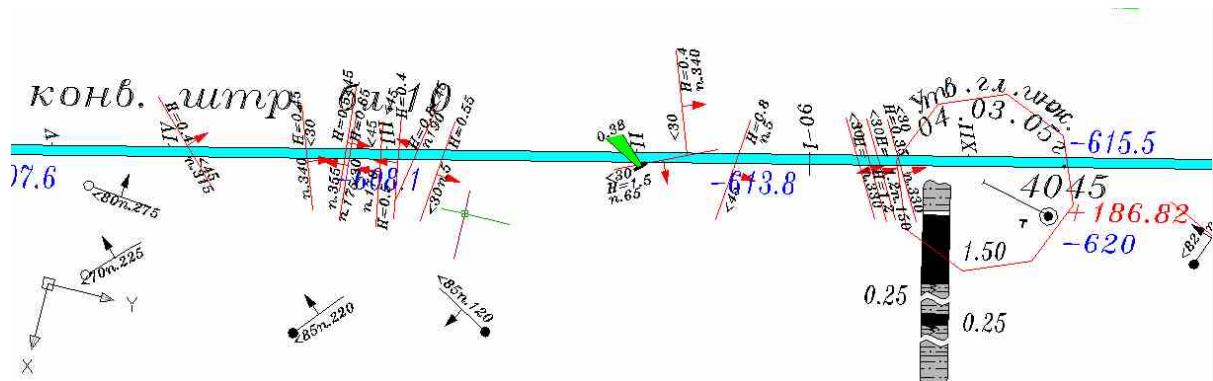


Рис. 3. Типичная нарушенность пласта

Фрагменты геологических разрезов на рис. 4 наглядно демонстрируют степень неопределенности горно-геологических условий отработки пласта. Так на верхнем фрагменте показан прогнозный разрез, выполненный по разведочным скважинам, расстояние между которыми составляет от 300м до 800м и более. Такое расстояние между разведочными скважинами не дает возможности выявить малоамплитудные нарушения и тем более спрогнозировать их параметры. Фрагмент (б) иллюстрирует реальный геологический разрез, построенный по трассе 1 южного вентиляционного штрека блока 10. Сравнение прогнозного и фактического разрезов на одном и том же участке выработки свидетельствует о разительном различии, что и определяет высокую степень риска горных работ.

Отсюда ясно, что надежность планирования развития горных работ, основанная на прогнозах типа (а) будет весьма низкой. Так в таблице 1 показан пример планирования графика проведения двух типичных подготовительных выработок. На этом графике темпы проходки задаются постоянными, а, следовательно, возможная вариация темпов под воздействием случайных изменений горно-геологических условий не учитывается. Это приводит, как правило, к срыву графиков развития горных работ и ухудшению экономических показателей предприятия.

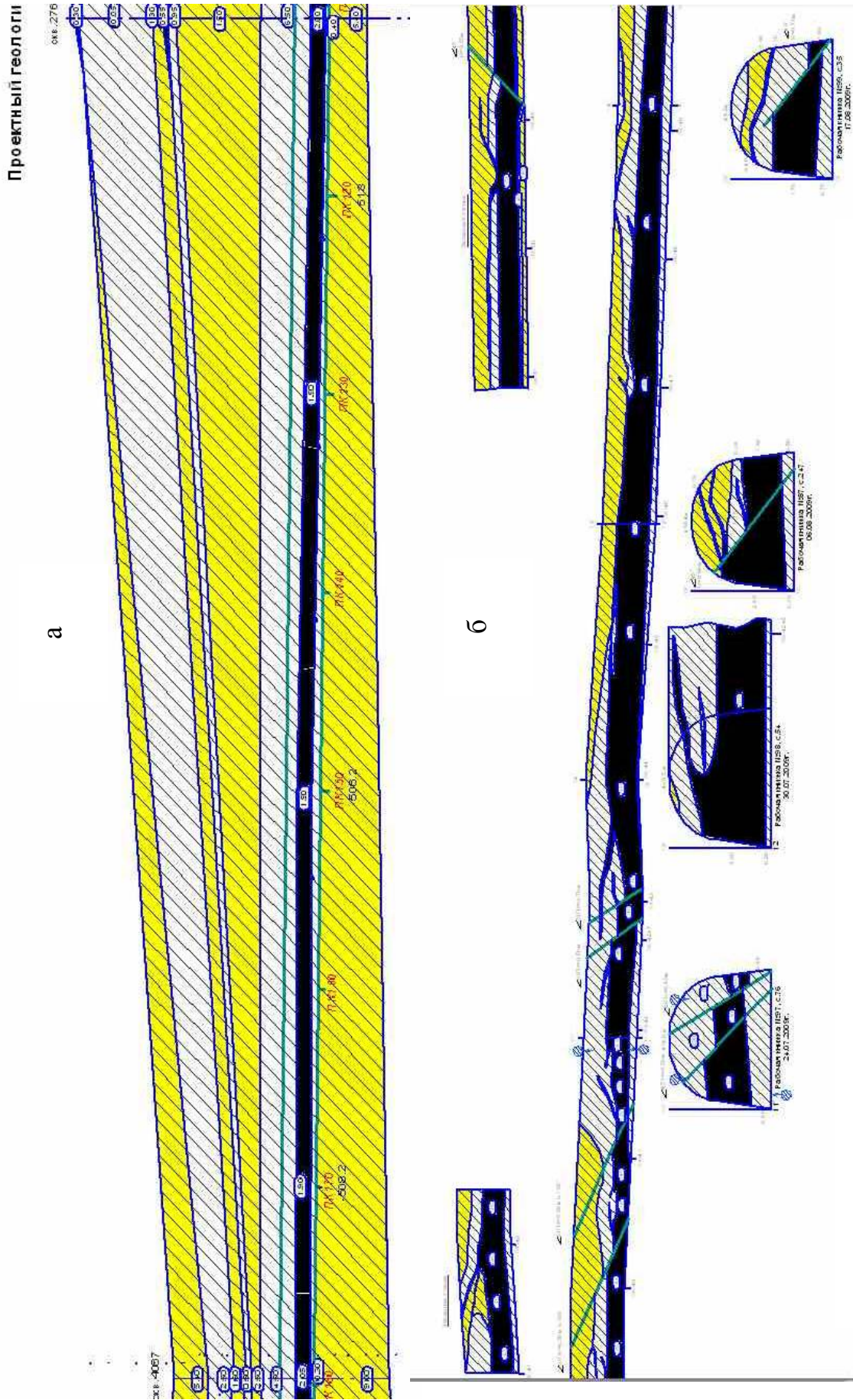


Рис. 4. Проектний розрез (а) і фактичне строение толщи (б) вдоль 1 южного вентиляционного штрека блока 10

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

УПР-4	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<u>Бр.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

Кроме горно-геологических факторов на нестабильность темпов проходки влияют аварии и поломки оборудования и техники, используемой для проведения выработки. При этом выход из строя оборудования является классическим вероятностным процессом, степень неопределенности которого изучается специальной теорией надежности оборудования. Добавим к этому, что надежность оборудования, применяемого в процессе проведения выработки будет изменяться по сложному закону, поскольку кроме стохастической составляющей в изменение вероятности поломки может вносить и детерминированная составляющая, обусловленная например трендом. Тренд может быть обусловлен увеличением длины выработки. Так с увеличением длины выработки увеличивается длина ленточного конвейера, используемого для выдачи из выработки горной массы, возрастает число стыков в гибкой ленте, число пересыпов.

Существенным фактором, который может повышать риск аварии или останова подготовительного забоя является фактор вентиляции. Чем длиннее выработка, тем больше длина вентиляционной трубы, в результате чего количество продуваемого через нее воздуха буде неизбежно уменьшаться как из-за роста потерь энергии на трение, так и по причине утечек.

Немаловажным фактором, вносящим вклад в рост риска срыва темпов проходки является условия, в которых работают проходчики, а именно: эргономика и санитария. Так согласно санитарным нормам при превышении длины выработки более 1км или времени передвижения пешим порядком более 40минут следует обеспечивать доставку людей в забой. Такие правила выполняются далеко не всегда, что неизбежно негативно влияет на производительность труда проходчиков и в конечном итоге сказывается на темпах проходки.

Гидрогеологические условия являются также важным фактором, который может существенно снижать темпы проходки, а также влиять на их флуктуации. При проведении подготовительных выработок по направлению неизбежны колебания профиля выработки, что при обводнении часто приводит к затоплению отдельных участков выработки. В случае выхода из строя насосов локального водоотлива затопления препятствуют свободному передвижению по выработке, что также снижает производительность труда подземных рабочих.

Температурные условия также существенно влияют на производительность и нарушают ритмичность труда проходчиков. Не секрет, что техника кондиционирования воздуха в подземных условиях далека от совершенства и удовлетворительного решения.

Даже неполный перечень факторов, определяющих темпы проходки свидетельствует о том, что темпы проведения подготовительной выработки являются случайной функцией, параметры которой важно знать достоверно для возможности оценки риска подготовительных работ. При наличии множества факторов и примерно равноценном вкладе этих факторов в значение случайной функции должна работать центральная предельная теорема вероятности, которая гарантирует нормальный закон распределения значений функции и определенную зависимость параметров ее разброса (стандарта) от параметров разброса влияющих факторов независимо от законов распределения значений самих факторов. Такая связь облегчает нахождение параметров распределения случайной функции.

Анализ параметров случайных функций темпов проходки

Для исследования указанных параметров были построены зависимости темпов проходки от длины выработок. Эти построения были выполнены на примере подготовительных

выемочных штреков южного крыла блока 10 шахты Красноармейская-Западная №1. Эти выработки подготавливают выемочные столбы 4 – 1 южных лав к отработке и имеют длину до 3км, что обеспечивает представительный статистический материал для анализа. Выработки проходились комбайновым способом. При этом применялся комбайн типа КСП-43, для выдачи горной массы из выработок использовались ленточные конвейеры. На рис. 5 показаны функции темпов проходки от времени или длины проведения выработок.

Анализ построенных функций показал следующее. Судя по внешнему виду, все зависимости темпов от времени проходки являются случайными функциями, причем очевиден временной тренд, который проявляется в затухании темпов по мере удлинения выработок. Видно, что указанный тренд описывается экспоненциальными зависимостями с показателем экспоненты в пределах $-0,023 \dots -0,073$. При этом начальные темпы проходки изменяются от 117 до 198 м/мес. Однако теснота связи достаточно низка для того, чтобы воспользоваться указанными зависимостями. В связи с этим был осуществлен более детальный анализ темпов проходки. Оказалось, что четыре точки, характеризующие особо малые скорости проведения выработок, обусловлены вполне определенной причиной, которая состояла в том, что из-за большой длины выработок необходимо было проводить сбойки. Поэтому проходка штрека останавливалась и вся бригада какое-то время проходила сбойку, то есть совсем другую выработку. Именно на этот период (порядка месяца) останавливалась проходка основной выработки.

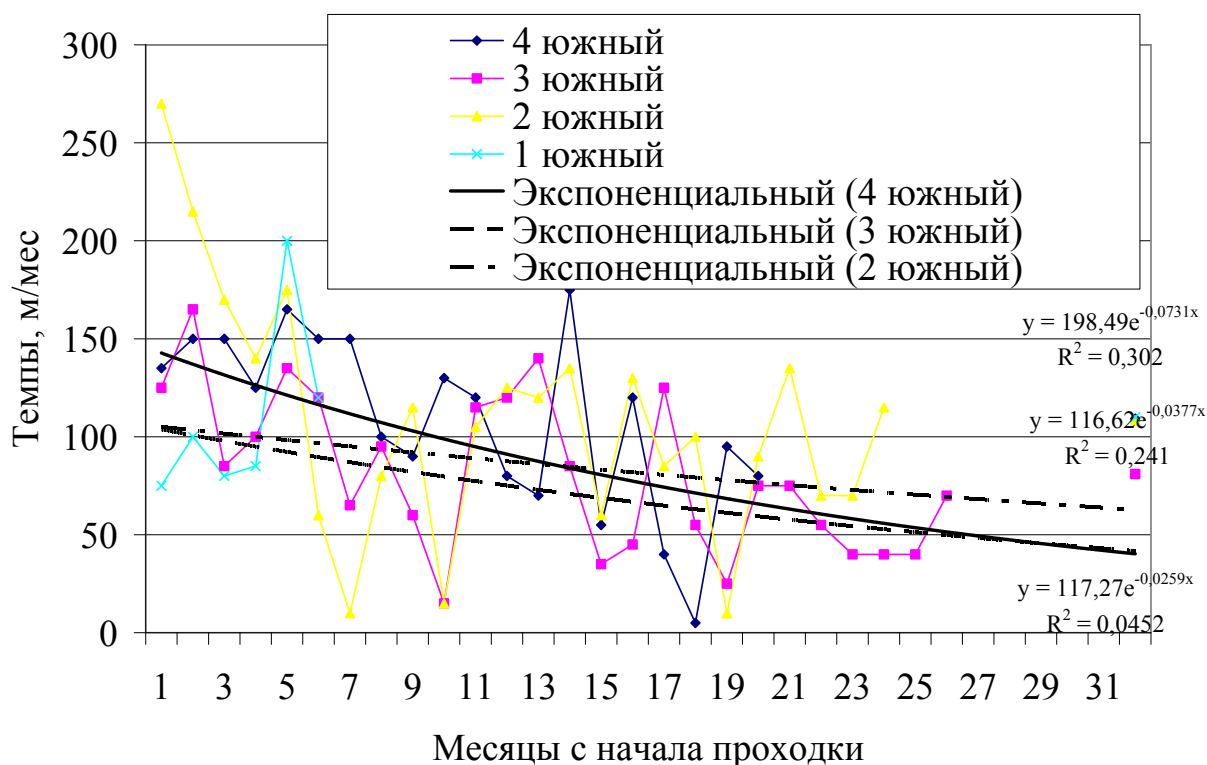


Рис. 5. Характер изменения темпов проходки с удлинением выработки при неизменной технологии и условий проведения

После отбрасывания указанных точек были построены распределения темпов проходки для каждой выработки в отдельности. Типичная гистограмма темпов приведена на рис. 6. Закон распределения подбирался с помощью критериев Пирсона и Колмогорова-Смирнова. Оказалось, что во всех случаях гистограммы темпов проходки удовлетворительно согласуются с нормальными усеченными законами распределения. Более того, расхождение между гистограммами для отдельных выработок различаются незначимо. Это позволило объединить все данные в одну выборку и построить сводную случайную функцию изменения темпов от времени проведения выработки или от ее длины.

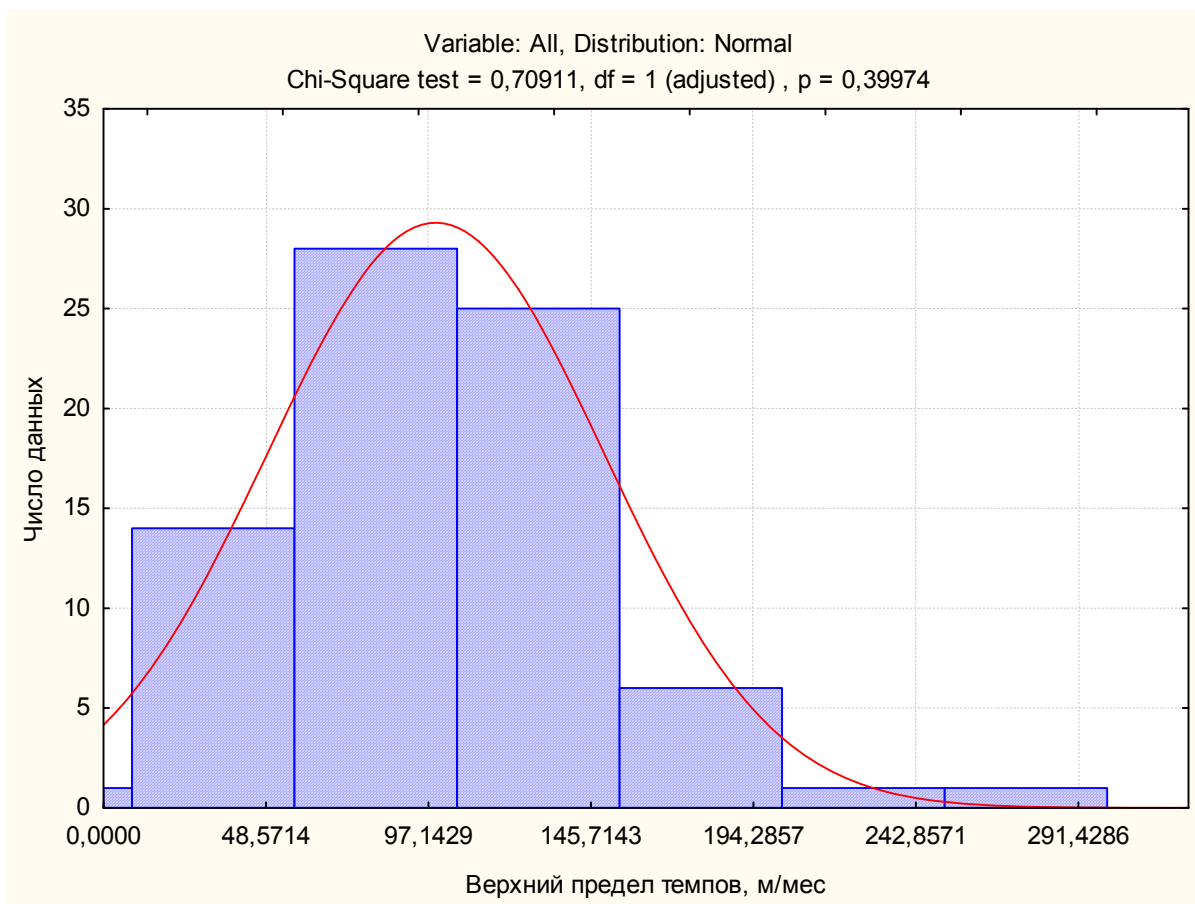


Рис. 6. Типичная гистограмма темпов проходки

Указанная случайная функция приведена на рис. 7. После такой модификации исходной статистической выборки экспоненциальная зависимость тренда темпов была установлена уже с достаточно высоким показателем тесноты связи, равным 0,77. При этом средние начальные темпы проходки составляют 151 м/мес., а показатель экспоненты равен $-0,0355$. Характерно, что при этом средняя величина коэффициента вариации снизилась до 32%, что вполне приемлемо для практики прогнозирования в сложных условиях подземной угольной шахты

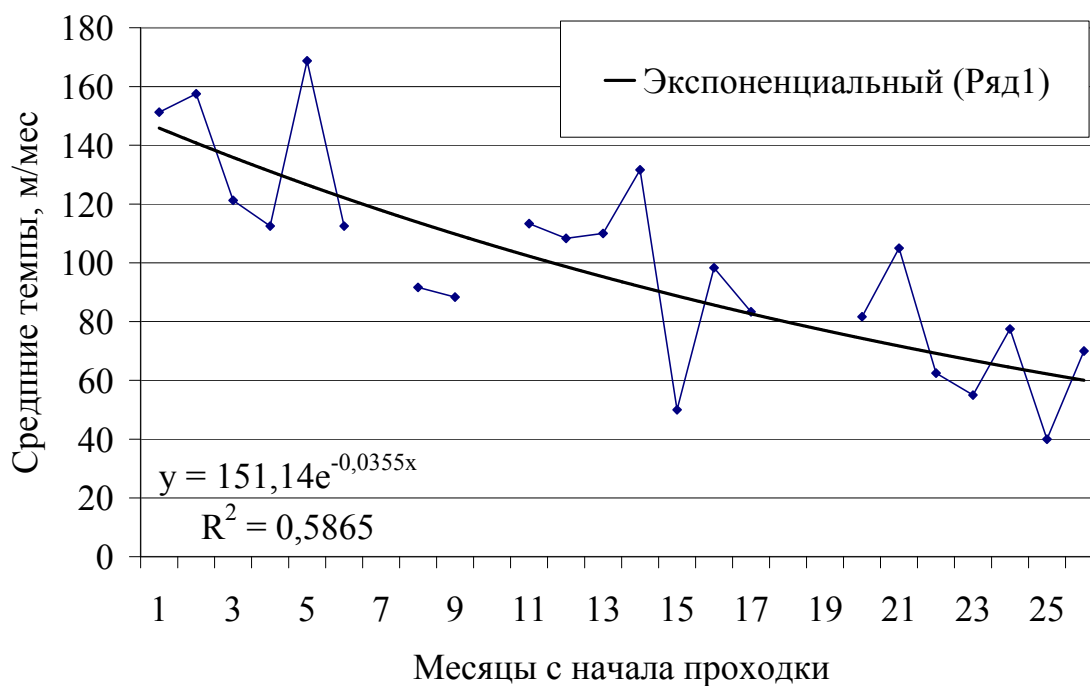


Рис. 7. Характер затухания темпов проходки по усредненным данным

Отсюда следует очень важный практический вывод: темпы проходки любой подготовительной выработки будут падать по мере ее увеличения по экспоненте при постоянных условиях проходки, то есть при примерно постоянных горно-геологических условиях проходки и той же самой технике и технологии, а также той же самой бригаде. Это значит, что при планировании графиков проходки необходимо закладывать затухающий характер темпов проходки как закономерный и существующий независимо от нашего сознания. Для того, чтобы обеспечить средние заданные в плане темпы проходки необходимо планировать повышенные темпы вначале проведения выработки и заниженные на конечной стадии ее проведения. Характерно, что для прерывания такого нежелательного для производства тренда затухания темпов следует осуществлять кардинальные изменения, например менять старый изношенный комбайн на новый, менять технологию и т.п.

Рис. 8 иллюстрирует этот вывод. Так в третьем южном конвейерном штреке к 23 месяцу его проведения сложилась нежелательная ситуация, когда темпы проходки упали до 40м/мес вместо 150м/мес планируемых. Для исправления ситуации технология проходки была полностью изменена, что позволило поднять темпы проходки до 150м/мес в среднем. Однако следует иметь ввиду, что в дальнейшем темпы будут неизбежно падать снова, поскольку это объективная закономерность. Достоверность установленной закономерности подтверждается анализом темпов проходки в других условиях.

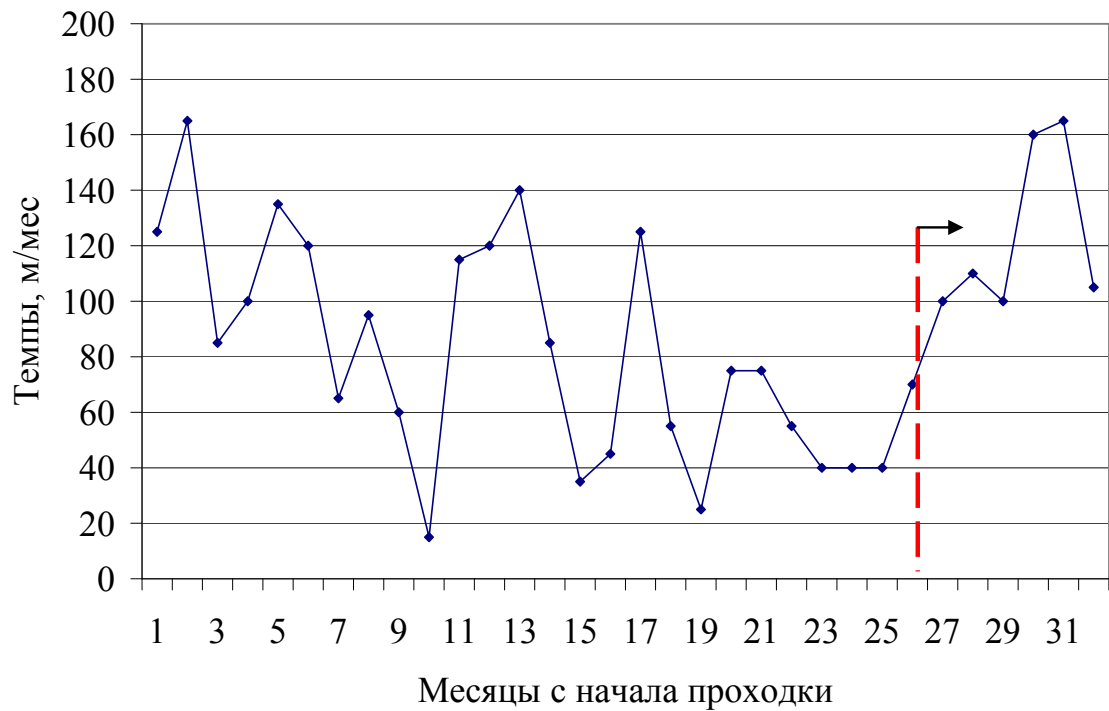


Рис. 8. Влияние улучшения технологии проведения на темпы проходки

Так на рис. 9 показан график изменения темпов проходки выработки вентиляционного горизонта для 18 западной лавы в условиях шахты им. Засядько. Выработка проводилась комбайновым способом сечением в свету 18 м^2 . Видно, что тренд темпов затухающий, причем показатель экспоненты равен $-0,042$, что близко к установленному $-0,0355$ для условий шахты Красноармейская-Западная №1. Разница не превышает 19%, а показатель тесноты связи равен $0,75$, что свидетельствует о достоверности полученной зависимости.

Анализ пяти участков, на которых подготовительная выработки пересекала зоны малоамплитудной интенсивной нарушенности показал, что темпы проходки могут замедляться в 1,4-2 раза. Главными причинами снижения темпов проведения являются ухудшение устойчивости кровли выработки, а также повышение опасности газодинамических явлений. На дополнительные работы по обеспечению устойчивости кровель, а также для проведения специальных мероприятий по снижению выбросоопасности затрачивается время, что замедляет темпы проведения.

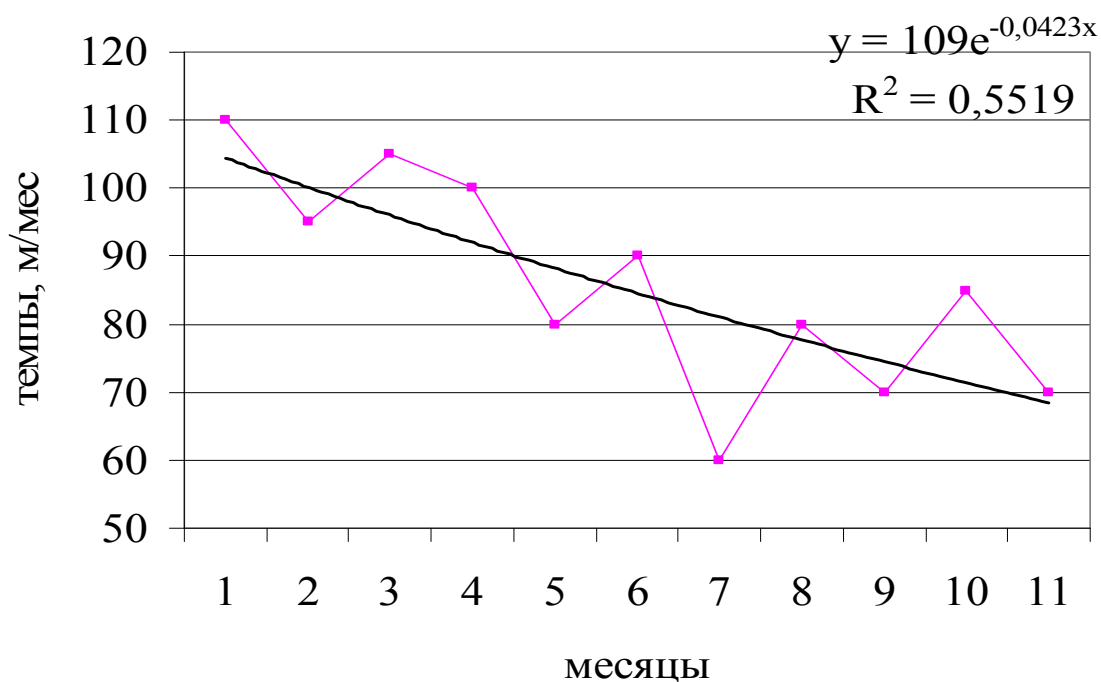


Рис. 9. Изменение темпов проходки выработки вентиляционного горизонта для 18 западной лавы

Исследование автокорреляционной функции

Перед тем, как продолжить более детальный анализ случайной функции темпов проходки, следует подчеркнуть, что все случайные функции темпов проходки являются нестационарными, то есть зависят от времени проходки. Проверка подтвердила правомерность объединения указанных выборок в общую выборку. Теоретически такая возможность обусловлена действием теорем Чебышева и центральной предельной теоремы [3]. Действительно, существует по крайней мере десяток факторов, которые оказывают примерно равномерное воздействие на стохастичность темпов проходки: вариация горно-геологических условий, факторы надежности проходческого оборудования (комбайна), ленточного конвейера, работы доставки материалов и людей, группа финансовых факторов в первую очередь своевременность выплаты заработной платы, ее уровень и т.д.

Правомерность применения центральной предельной теоремы подтверждается также соответствием гистограммы коэффициента вариации нормальному распределению. Правомерность объединения отдельных наборов случайных значений темпов проходки в общую выборку свидетельствует также и об эргодичности стохастического процесса колебания темпов проходки. Отсюда следует важный вывод о возможности нахождения корреляционной функции. Для этого значения тренда принимаем за средние, которые используем для центрирования функции на каждом месяце наблюдений.

$$\dot{x}(t) = x(t) - mx(t)$$

где $x(t)$ -темпы проходки в течение месяца t ; $mx(t)$ -средние темпы согласно тренду; t – изменяется от 1 до n , где n -количество месяцев, в течение которого определяется тренд.

Корреляционную функцию определяем по тем же формулам, которые используются для определения корреляционной функции для стационарного стохастического процесса [4] с той разницей, что в качестве среднего используем среднее, зависящее от времени и определенное с помощью тренда (1). Для определения корреляционной функции используем четыре лага $\tau=1,2,3,4$. ($m=4$). Тогда корреляционная функция определится согласно формуле

$$Kx(t + \tau) = \frac{1}{n - m} \sum_{i=1}^{n-m} \dot{x}(t) \dot{x}(t + m)$$

а нормированная корреляционная функция $kx(t+\tau)$ из формулы

$$kx(t + \tau) = \frac{1}{n - m} \sum_{i=1}^{n-m} \frac{\dot{x}(t) \dot{x}(t + m)}{\sigma x(t) \sigma x(t + m)}$$

где $\sigma x(t)$ и $\sigma x(t+m)$ – стандарты функции в моменты времени t и $t+m$ соответственно.

На рис. 10 приведена нормируемая корреляционная функция, которая по сути является коэффициентом автокорреляции случайной функции темпов проходки и хорошо аппроксимируется кубическим полиномом. Видно, что темпы в соседних месяцах практически не коррелируют. Это значит, что для установления значимой корреляции темпов следует использовать меньший лаг, например неделю. Однако отмечается отрицательная корреляция, близкая к -0,5 между темпами проходки в течение месяцев, которые отстают друг от друга на два месяца. Это значит, что через каждые два месяца (на второй) происходит изменение тренда темпов проходки. Например, если темпы были выше среднего тренда, то через месяц на второй эти темпы скорее всего упадут ниже трендового уровня. Это означает, что мероприятия по управлению производством запаздывают на месяц. Скажем на текущий месяц набирают данные, на следующем месяце осуществляется анализ и выдача управляющих мероприятий, и только на третий месяц происходит заметное улучшение состояния производственных процессов. При этом уровень контроля постепенно снижается и спустя месяц на второй получаем опять падение темпов.

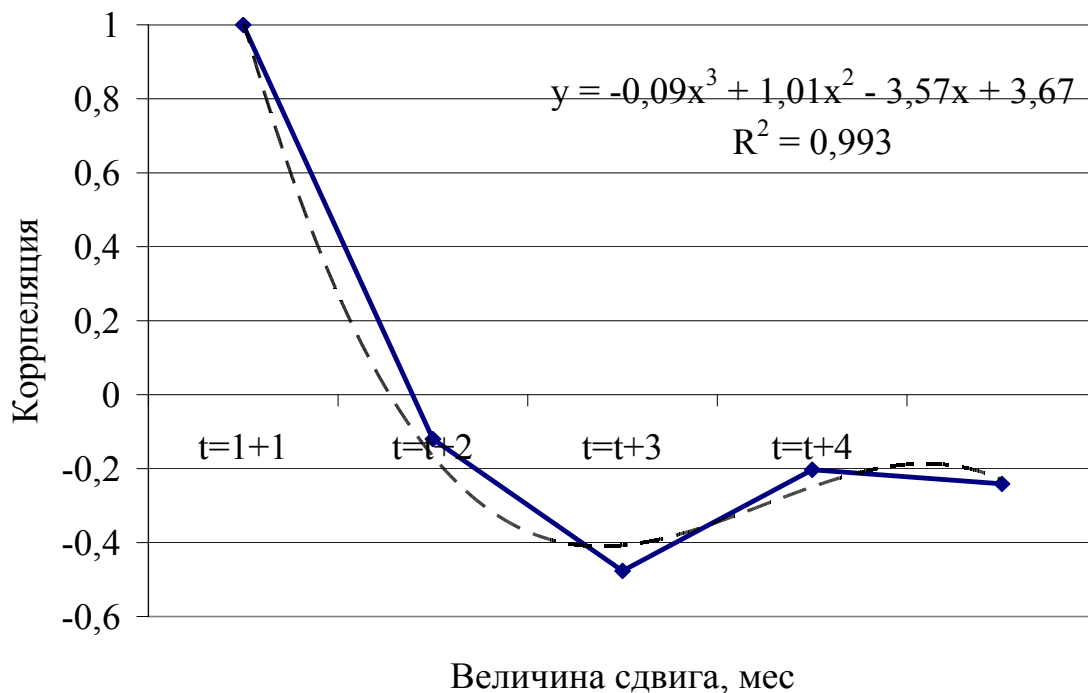


Рис. 10. Изменение автокорреляционной функции темпов проходки

То, что коэффициент автокорреляции меняет знак с плюса на минус свидетельствует о периодичности процесса. Можно сделать вывод о том, что подготовительным работам уделяют мало внимания в плане контроля и менеджмента, поэтому темпы проходки кроме тренда испытывают периодические колебания, так как часто контроль упускают, в результате чего

происходит падение темпов, а реакция на это падение запаздывает, что усиливает колебания темпов.

В качестве мер по улучшению менеджмента процессом проходки предлагается изменить организацию учета темпов понедельно (вместо помесечного как практикуется в настоящее время). Это позволит уменьшить колебания темпов относительно трендового уровня и в целом улучшить ритмичность производства, а также увеличить трендовый уровень темпов в целом. Это значит, что падение темпов не будет успевать реализоваться в больших масштабах благодаря оперативному вмешательству. В результате общая сумма потерь от падения уменьшится, за счет чего тренд в целом поднимется на 10-15%.

Дальнейшими исследования предусматривается выполнение стохастического моделирования для количественной оценки уровня рисков и обоснования конкретных мероприятий по увеличению темпов проходки.

Библиографический список

1. Пискунова Н.В. Системный подход к разрешению проблем шахт Украины // Уголь Украины, 2002, №5.-С.13-16.
2. Брюханов А.М. и др. Расследование и предотвращение аварий на угольных шахтах. Часть 2- Донецк: Донбасс, 2004.-650с.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. –М.: Наука, 1964.-576с.
4. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций.-М.: Наука, 1965.-432с.

© Ильяшов М. А., Чумаченко И. И., Яйцов А. А., Варващенко В. П., Захарова Л. Н., 2010.

Анотація

Виконано аналіз факторів ризику, що суттєво впливають на темпи проведення підготовчих виробок. Встановлено, що основними є геологічні фактори, надійність прохідницького обладнання, рівень оплати праці та низка інших. Доведено, що темпи проходки виробки вузьким вибоєм є нестационарною функцією від часу проходки, трендова компонента якої загасає за експонентою з показником $-0,0355$. Автокореляційна функція темпів проходки апроксимується кубічною залежністю і змінює знак в залежності від часового лагу.

Ключові слова: проходки, геологічні фактори, ризику.

Abstract

Risk of decline of underground roadway advance has been investigated. Rate of roadway advance is a stochastic unstable function, that has been impacted by geology, reliability of mining equipment, wage etc. Trend component of this function has been describe by exponential formula with parameter of -0.0355 . Correlation function can be approximate by cubic dependence and changes the sign due to elapsing time.

Keywords: underground roadways, rate of advance, geology, risk.