

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 004.942, 622.3

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-6-157-170

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТ ПО СНИЖЕНИЮ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК

Зиновьев Василий Валентинович^{1,2}, Николаев Петр Игоревич^{1,2},
Утюпин Антон Владимирович³, Кузнецов Игорь Сергеевич^{1,2},
Гречишкин Павел Владимирович⁴

¹ ФИЦ УУХ СО РАН² Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева³ ООО «ММК-УГОЛЬ»⁴ Кемеровский филиал АО «ВНИМИ»

* для корреспонденции: is150794@mail.ru

Аннотация.

Рассматриваются варианты организации работ при проведении профилактических мероприятий по снижению газодинамической опасности угольного пласта с использованием сейсмоакустического излучателя в технологии проведения выработки комбайном избирательного действия. Предложенное сейсмоакустическое воздействие реализуется в скважинах, пробуренных в дегазируемом угленосном массиве путем генерации «подобранных» частот, что позволяет развить процесс трещинообразования, и, как следствие, изменить его напряженно-деформируемое состояние, интенсификацию истечения газа из трещин в массиве. В одном из вариантов предусмотрена профилактическая дегазация пласта с использованием технологии сейсмоакустического воздействия из двух контрольных шпуров, пробуренных в первую ремонтно-подготовительную смену, когда не ведутся проходческие работы. Во втором варианте предлагается проведение мероприятий по дегазации пласта дополнительно в третью рабочую проходческую смену, что, с одной стороны, может способствовать дополнительной дегазации и увеличивать скорость проведения выработок за счет сокращения мероприятий по ликвидации выбросоопасных зон, а с другой – уменьшить скорость проведения выработки. Решается задача исследования эффективности обозначенных вариантов организации работ по профилактической дегазации угольного пласта. Для решения задачи использован метод имитационного моделирования с использованием российского программного продукта GPSS Studio. Создана модель, отображающая процессы проходческого цикла по разрушению и погрузке горной массы, креплению выработки, наращиванию конвейера, доставке материалов и учитывающая вероятностную природу процессов газовыделения и эффективность мероприятий по профилактической дегазации угольного пласта. Выполнено имитационное моделирование организации работ при проведении горной выработки на угольной шахте в течение 16 смен. Показателем эффективности определена скорость проведения выработки. Приведены результаты имитационных экспериментов, по исследованию влияния применения дополнительных мероприятий по профилактической дегазации на скорость проводимой выработки. Определены границы области эффективного применения мероприятий по профилактической дегазации пласта с использованием



Информация о статье

Поступила:

22 сентября 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 ноября 2025 г.

Принята к публикации:

02 декабря 2025 г.

Опубликована:

22 декабря 2025 г.

Ключевые слова:

угольная шахта, проведение
горных выработок,
организация работ,
имитационное моделирование,
принятие решений

сейсмоакустического излучателя.

Для цитирования: Зиновьев В.В., Николаев П.И., Утюпин А.В., Кузнецов И.С., Гречишкин П.В. Имитационное моделирование организации работ по снижению газодинамической опасности угольного пласта при проведении подготовительных выработок // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 6 (172). С. 157-170. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-6-157-170, EDN: URDFFA

Введение: Увеличение глубины отработки угольных месторождений осложняет технологии проведения горных выработок из-за роста горного давления, проявлений динамических и газодинамических явлений, что требует применения мер по предупреждению аварийных ситуаций и приводит к падению скорости проходки. Поэтому предварительная оценка влияния мероприятий по снижению газодинамической опасности на скорость проведения горных выработок является актуальной задачей.

На шахте «Чертинская-Коксовая» ООО «ММК-УГОЛЬ» проводился конвейерный штрек №553бис по угольному пласту с углом наклона 2-7 градусов протяженностью 690 м с учетом угла наклона. Сечение выработки вчерне – 18,5 м², в свету – 17,3 м², ширина выработки – 5,3 м, высота – 3,5 м. Кровля и борта выработки

закреплялись сталеполимерными анкерами на шайбы с перетяжкой решетчатой затяжкой. Шаг крепи составлял – 1,0 м. Согласно утвержденному паспорту проведения и крепления принята технологическая схема проведения выработки комбайном КП-21Д с транспортированием отбитой горной массы по проводимой выработке скребковым конвейером СР-70-05. Обработка забоя рабочим органом комбайна производилась на глубину, равную шагу установки крепи (Рис. 1).

Технология проведения выработки проходческим комбайном включала работы по разрушению и погрузке горной массы, возведению крепи, наращиванию конвейера, организации проветривания и пылеподавления, доставке материалов и оборудования и вспомогательных операций, предусмотренных графиком организации работ при проведении

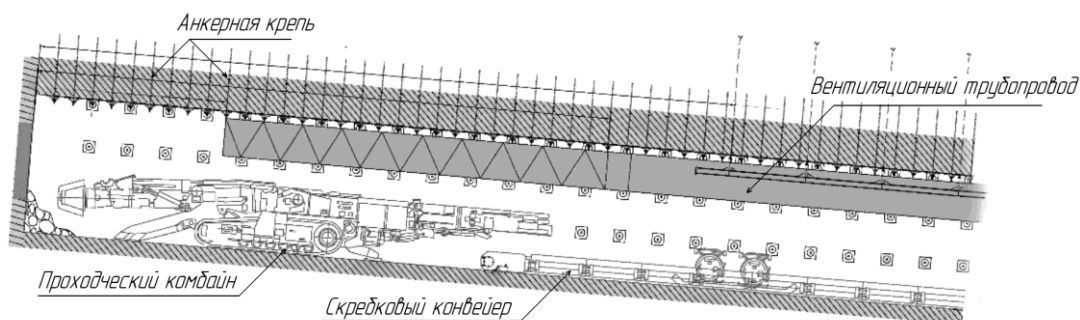


Рис. 1. Технологическая схема проведения конвейерного штрека

Fig. 1. Technological scheme of the conveyor drift

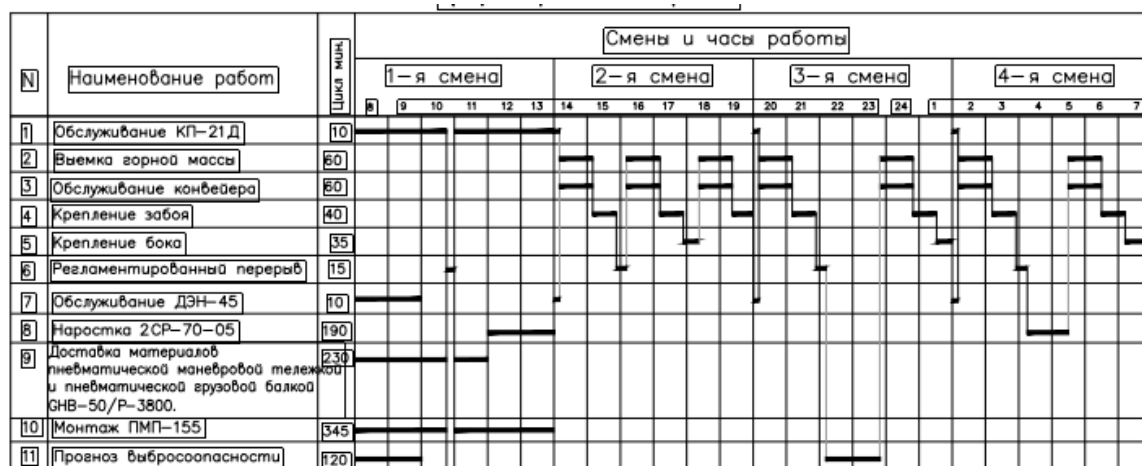


Рис. 2. График организации работ при проведении конвейерного штрека

Fig. 2. Schedule of work organization during the construction of a conveyor drift

конвейерного штрэка (Рис. 2).

Цикл работ по проведению выработки в каждой смене начинался с проверки крепления ранее установленной крепи, проверки и подготовки к работе оборудования и механизмов и приведения рабочих мест в безопасное состояние. Продолжительность смены составляла 6 часов. При этом первая смена – ремонтно-подготовительная, остальные три смены – проходческие. График работы – скользящий (непрерывная рабочая неделя). В ремонтно-подготовительную смену производился осмотр и профилактический ремонт комбайна и забойного оборудования, наращивание забойного конвейера, вентиляционного става, противопожарного трубопровода и т. д. Проводились работы по обеспечению безопасности: прогноз выбросоопасности, осланцевание выработки, смыв угольной пыли и прочее. В забой доставлялись крепежные материалы, проводилась проверка механизмов под нагрузкой. В рабочие (проходческие) смены велись работы по проходке выработки: выемка и транспортировка горной массы, крепление выработки, наращивание забойного конвейера (при необходимости). После выемки горной

массы на расстояние 1,2 м от последней рамы крепи, комбайн отгонялся от забоя на расстояние не менее 5 м. Производилась обorkа кровли и бортов выработки от нависших кусков породы и возведение временной крепи. После этого возводилась постоянная крепь при помощи анкероустановщика MQT-120 типа «Рамбор». При этом отставание постоянной крепи от груди забоя не превышало шага ее установки плюс 200 мм (у бортов выработки). Время обнажения кровли выработки не превышало 30 минут. Параллельно с приемом-сдачей смены и обслуживанием комбайна велись работы по монтажу подвесной монорельсовой дороги ПМП-155, наращиванию скребкового конвейера СР-70-05, доставке материалов.

Проведение конвейерного штрэка №553бис на шахте «Чертинская-Коксовая» сопряжено с высокими рисками выбросов угля и газа. Для предупреждения этих явлений предусмотрен ряд мероприятий по ведению работ в выбросоопасных зонах:

- барьерная дегазация путем бурения разведочно-дегазационных скважин;
- прогноз выбросоопасности после проведения четырех метров выработки;
- дегазация пласта бурением опережающих

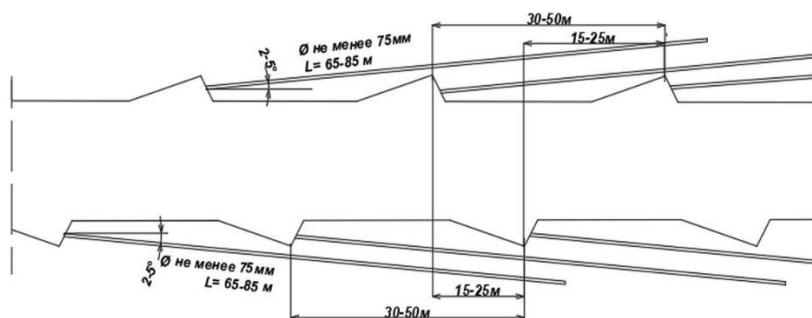


Рис. 3. Дегазация угольного пласта бурением барьерных разведочно-дегазационных скважин
Fig. 3. Degassing of a coal seam by drilling barrier exploration and degassing wells

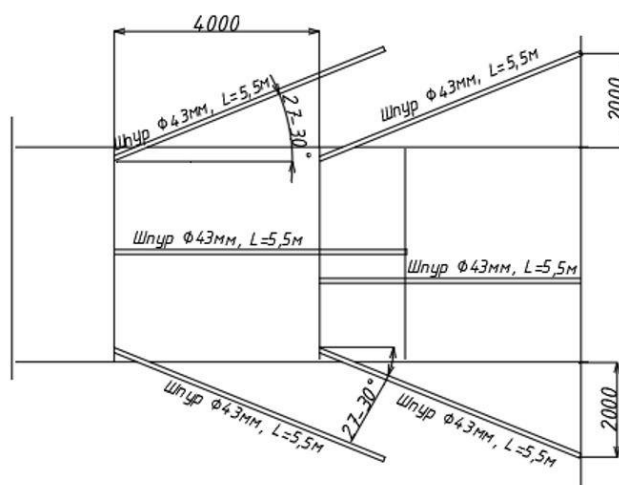


Рис. 4. Схема бурения контрольных шпуров прогноза выбросоопасных зон
Fig. 4. Scheme of drilling control holes for forecasting hazardous areas

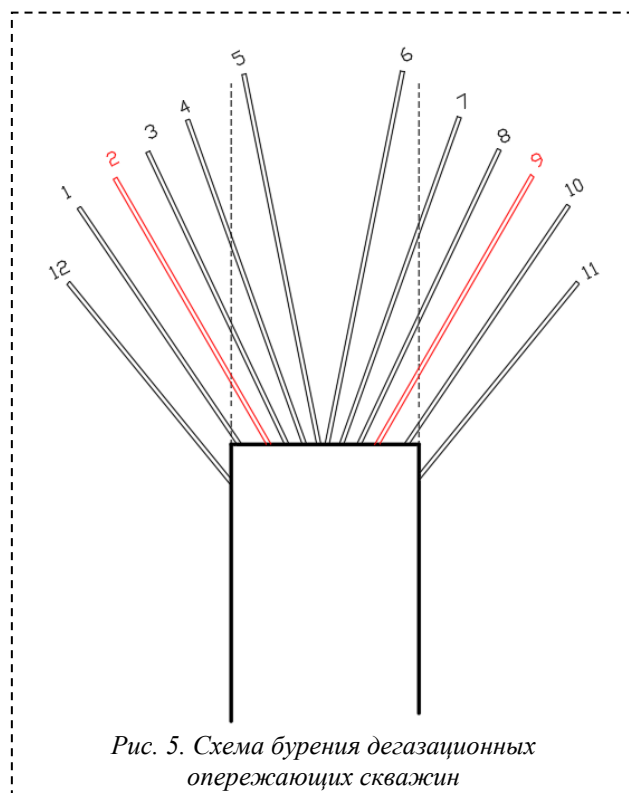


Рис. 5. Схема бурения дегазационных опережающих скважин

скважин в случае обнаружения его выбросоопасного состояния;

- профилактическая дегазация пласта с использованием сейсмоакустического излучателя.

Барьерную дегазацию применяли при превышении природной метаносности угольного пласта $9 \text{ м}^3/\text{т}$ сухой беззольной массы, когда вентиляция не обеспечивала содержание метана в исходящей струе горной выработки 1%. В этом случае при помощи буровых станков или при помощи самоходной буровой установки бурили опережающие забой барьерные дегазационные скважины, позволяющие снизить метаносность пласта и метанообильность выработки, а также заранее обнаружить газонаполненные трещины дизъюнктивных

нарушений и удалить из них метан в дегазационный газопровод. Сначала перед засечкой выработки бурили две барьерные дегазационные скважины под углом по направлению проведения запроектированной выработки. Далее бурили скважины из боковых ниш выработки, нарезаемых комбайном в шахматном порядке (Рис. 3). После окончания бурения скважины подключали к дегазационной системе для изолированного отведения метана [1].

Прогноз выбросоопасности осуществляли после проведения барьерной дегазации через каждые 4 м подвигания забоя по начальной скорости газовыделения из трех контрольных шпуров. Два контрольных шпура длиной 5,5 м, диаметром 43 мм бурили под углом 27-30 градусов по направлению движения выработки на расстоянии 0,5–0,7 м от ее бортов. Третий шпур бурили по оси выработки (Рис. 4).

После окончания бурения определяли начальную скорость газовыделения. В скважину устанавливали герметизирующий газозатор с каналом для отвода газа. Затем к каналу подключали техническое устройство для измерения скорости газа, истекающего из скважины. При значении скорости истечения газа менее 4 л/мин зону относили к категории «НЕ ОПАСНО», а при скорости газовыделения, превышающей 4 л/мин – к категории «ОПАСНО», в этом случае прогноз прекращали и принимали меры по ее ликвидации.

Дегазацию бурением опережающих скважин применяли в случае обнаружения выбросоопасного состояния пласта (категория «ОПАСНО»). Производили зачистку забоя, отгон комбайна, установку предохранительного щита в забое, перетяжку бортов выработки до забоя металлической решеткой, доставку бурового станка и бурение 12 разгрузочных опережающих скважин в соответствии с «Комплексом мер по прогнозу и предотвращению динамических явлений на шахте «Чертинская – Коксовая» (Рис.

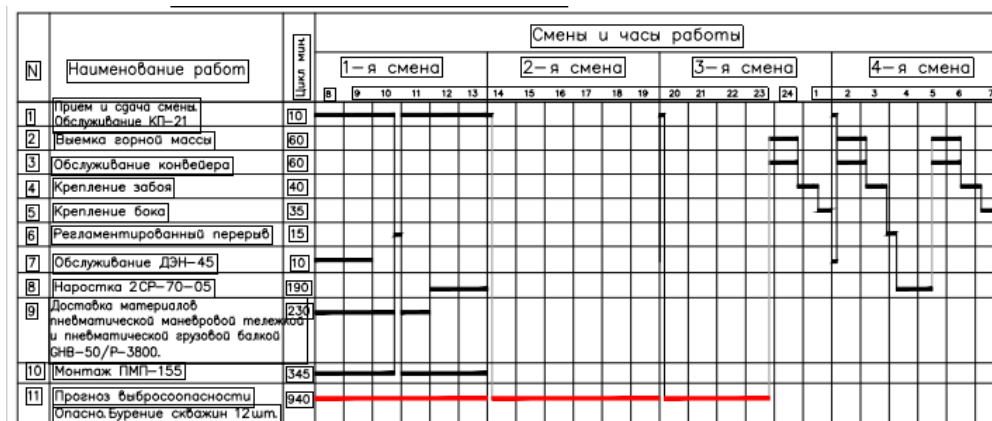


Рис. 6. График организации работ при категории прогноза «ОПАСНО»

Fig. 6. Schedule of work organization for the forecast category «dangerous»

5).

Сначала производили бурение скважин диаметром 76 мм с последующим разбуриванием до диаметра 130 мм. После окончания бурения всех скважин производили текущий прогноз выбросоопасности. В случае результата прогноза «НЕ ОПАСНО», работы по выемке горной массы продолжали, а в случае выявления прогноза «ОПАСНО» ниже отбуренного ряда бурили второй ряд из 10 разгрузочных скважин (скважины №11 и №12 не бурили).

Прогноз выбросоопасности проводили в первую ремонтно-подготовительную смену, когда не велась выемка горной массы. При прогнозе, относящимся к категории «опасно», незамедлительно осуществляли ликвидацию опасной зоны путем бурения 12 скважин, что влияло на скорость проведения выработки, т. к. затрагивало вторую и третью рабочие проходческие смены (Рис. 6).

Постановка задачи исследования. Кемеровским филиалом АО «ВНИМИ» разработана «Программа и методика проведения исследований по сейсмоакустическому воздействию на угольный пласт 5 из подготовительного забоя в условиях шахты «Чертинская-Коксовая» ООО «ММК-УГОЛЬ» с использованием сейсмоакустического излучателя (АКСИ) [2]. Такой излучатель используется как средство воздействия на массив горных пород с целью развития процесса трещинообразования, и, как следствие, изменения его напряженно-деформируемого состояния, интенсификации истечения газа из трещин в массиве. Предлагаемый способ

сейсмоакустического воздействия реализуется в скважинах, пробуренных в дегазируемом или разгружаемом угленосном массиве путем генерации «подобранных» частот при продолжительном (часы-сутки) воздействии. На Рис. 7 показана схема установки излучателя [3].

Технология сейсмоакустического воздействия включает в себя последовательное выполнение следующих процессов (Рис. 7):

- монтаж нагнетательного трубопровода 10 и сейсмоакустического излучателя 7 в шпур прогнозированию выбросоопасных зон 1 вне зависимости от выявленной категории опасности;
- присоединение рукава от воздушной сети 13 к нагнетающему трубопроводу 10;
- открытие задвижки 12 для подачи воздуха к сейсмоакустическому излучателю 7;
- досылку сейсмоакустического излучателя 7 в шпур 1 на глубину 5,5 м при помощи досылочной штанги 3;
- сейсмоакустическое воздействие в течение 90 минут;
- закрытие задвижки 12 на воздушном ставе и демонтаж оборудования по окончании сейсмоакустического воздействия.

В методике предусмотрена профилактическая дегазация пласта с использованием технологии сейсмоакустического воздействия из двух контрольных шпуров, пробуренных под углом 27-30 градусов по направлению движения выработки (Рис. 4) в первую ремонтно-подготовительную смену, когда не ведутся проходческие работы. Предлагается проведение дополнительных мероприятий по дегазации

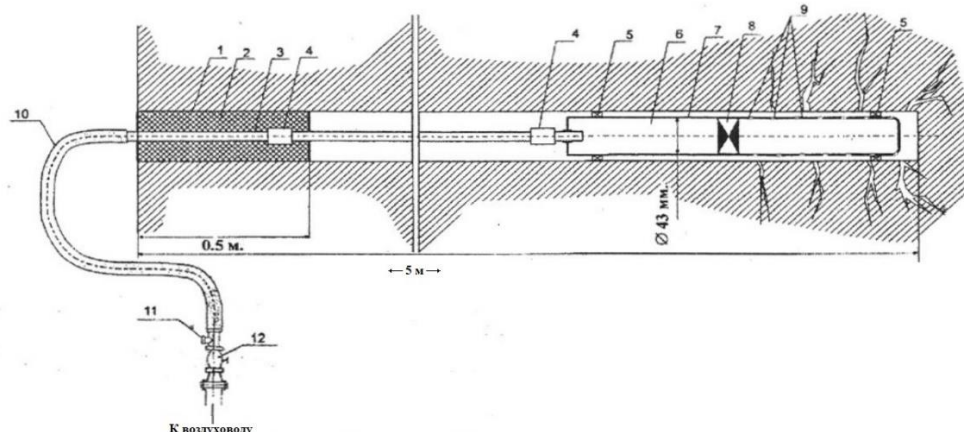


Рис. 7. Схема установки сейсмоакустического излучателя (АКСИ)

(1 – шпур; 2 – обсадная труба; 3 – досылочная штанга; 4 – соединительная муфта; 5 – уплотнительные манжеты; 6 – рабочая камера; 7 – сейсмоакустический излучатель (АКСИ); 8 – клапан; 9 – воздухораспределительная трубка; 10 – нагнетательный трубопровод; 11 – штуцер для замера газа; 12 – задвижка; 13 – воздушная сеть)

Fig. 7. Installation diagram of the seismoacoustic emitter (AKSI)

(1 – borehole; 2 – casing pipe; 3 – feed rod; 4 – coupling sleeve; 5 – sealing cuffs; 6 – working chamber; 7 – seismoacoustic emitter (AKSI); 8 – valve; 9 – air distribution pipe; 10 – discharge pipeline; 11 – gas metering nipple; 12 – gate valve; 13 – air network)

пласта с использованием АКЦИ в третью рабочую проходческую смену. Реализация такого предложения, с одной стороны, будет способствовать дополнительной дегазации и увеличивать скорость проведения выработок за счет сокращения мероприятий по ликвидации выбросоопасной зоны посредством бурения 12-ти опережающих скважин; с другой стороны, проведение мероприятий по дегазации в рабочую проходческую смену может повлечь падение скорости проведения выработки.

В связи с этим возникла задача исследования эффективности организации работ с использованием технологии сейсмоакустического воздействия дополнительно в третью рабочую проходческую смену для снижения газодинамической опасности угольного пласта.

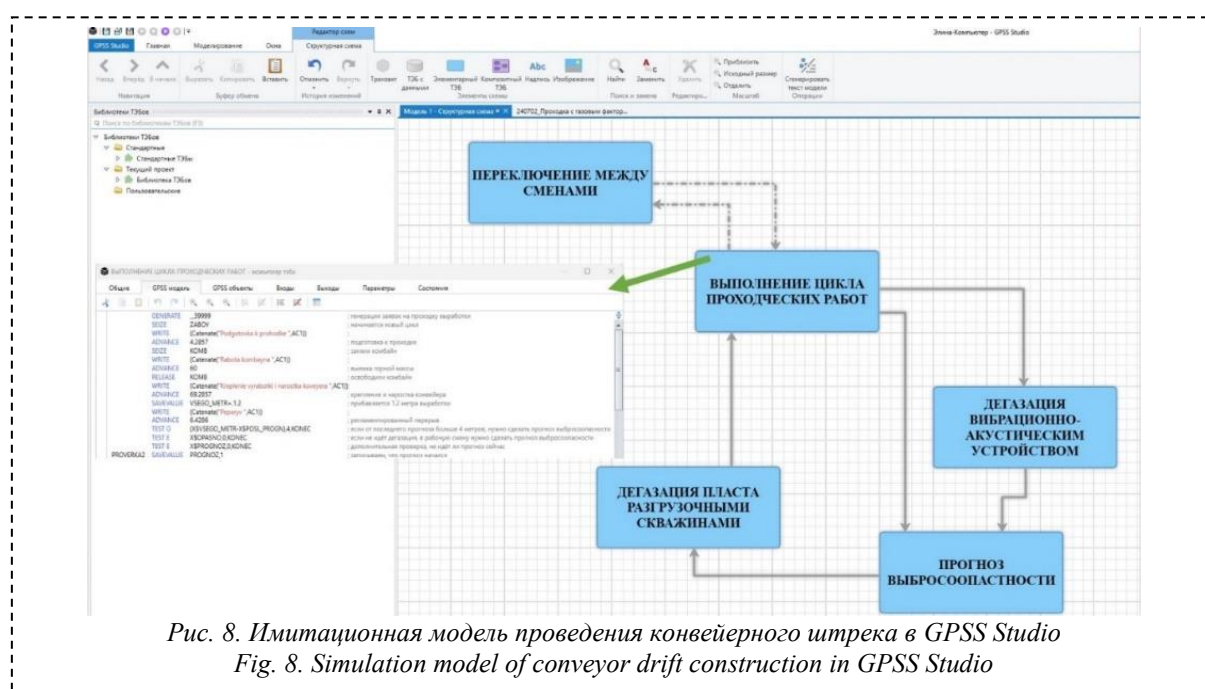
Метод решения задачи. Решение обозначенной задачи в реальной шахте сопряжено с рисками, связанными с остановкой горных работ и уменьшением скорости проходки. Поэтому был выбран метод математического моделирования. Для построения модели необходимо отобразить организацию работ при проходческом цикле и мероприятиях по профилактической дегазации с учетом вероятностной природы этих процессов, что значительно ограничивает применение аналитических методов. Поэтому для построения модели выбрано имитационное моделирование. Одной из российских наиболее известных и мощных систем имитационного моделирования, которая нашла применение в горном деле, является GPSS Studio, разработанная российской компанией «Элина Компьютер» и включенная в Реестр Минкомсвязи отечественных программных продуктов [4]. В ALINA GPSS

(GPSS Studio) реализован дискретно-событийный подход к моделированию, наиболее подходящий для отображения горных работ [5-15].

Результаты и обсуждение. В ФИЦ УУХ СО РАН ведутся работы по имитационному моделированию взаимодействия традиционных и роботизированных горных машин и оборудования для повышения эффективности выбора параметров горнодобывающих комплексов и технологий добычи угольных месторождений. Разработан ряд типовых элементарных блоков (ТЭБ) в терминах GPSS Studio, содержащих набор GPSS-блоков и команд. С использованием этих ТЭБ созданы имитационные модели, позволяющие отображать основные технологические процессы: разрушение массива горных пород, погрузку, транспортирование и разгрузку горной массы, крепление выработанного пространства с возможностью учета случайного времени выполнения технологических операций и динамики взаимодействия горных машин.

На основе обозначенных результатов в среде имитационного моделирования GPSS Studio разработана модель проходческих работ при проведении конвейерного штрека №553бис на шахте «Чертинская-Коксовая», отображающая ремонтно-вспомогательные мероприятия, проводимые в первую смену, проведение выработки со второй по четвертую смены, а также прогноз выбросоопасности и ликвидацию выбросоопасной зоны бурением опережающих скважин. Модель состоит из пяти сегментов, взаимодействующих по схеме, представленной на Рис. 8.

Сегмент «Переключение между сменами» выполняет следующие управляющие функции:



- меняет значения модельных переменных, которые используются в остальных четырех сегментах модели для имитации технологических процессов;

- запускает сегмент «Прогноз выбросоопасности», в котором отображаются мероприятия определения скорости газовыделения по мере прохождения 4 м выработки согласно паспорту проведения и крепления конвейерного штрека;

- блокирует работу сегмента «Выполнение цикла проходческих работ», останавливая имитацию процессов проходческого цикла, если выполняются мероприятия по дегазации опережающими скважинами (сегмент «Дегазация пласта опережающими скважинами») или мероприятия по профилактической дегазации в рабочую смену (сегмент «Дегазация сейсмоакустическим воздействием»).

Сегмент «Выполнение цикла проходческих работ» отображает процессы проходческого цикла по разрушению и погрузке горной массы, креплению выработки, наращиванию конвейера, доставке материалов и др.

Для исследования эффективности организации работ с использованием технологии сейсмоакустического воздействия в модель введены два вероятностных параметра, влияющих на мероприятия по дегазации:

- P_o – вероятность получения категории «ОПАСНО» при прогнозе выбросоопасности без использования сейсмоакустического излучателя;

- $k_{ДЕГ}$ – коэффициент эффективности дегазации сейсмоакустического излучателя.

Проверка адекватности модели проводилась посредством сравнения графика организации работ утвержденного паспорта на проведение и крепление конвейерного штрека №553бис с графиком организации работ, построенным по результатам моделирования. Максимальное расхождение продолжительностей выполнения операций проходческого цикла составило 5,6% (Рис. 9).

Эффективность мероприятий по дегазации пласта с использованием технологии сейсмоакустического воздействия проверялась путем проведения имитационных экспериментов с изменением введенных в модель параметров P_o от 10% (категория «ОПАСНО» маловероятна) до 100% (категория «НЕ ОПАСНО» невозможна) и $k_{ДЕГ}$ – от 10% (излучатель незначительно влияет на газоносность пласта) до 100% (излучатель полностью устраняет газоносность пласта). Показателем эффективности выбрана скорость проведения выработки.

Проведен анализ двух организационных вариантов ведения проходческих работ:

- вариант 1 – работа сейсмоакустического излучателя производится один раз в сутки в ремонтно-подготовительную смену (базовый вариант);

- вариант 2 – работа сейсмоакустического излучателя производится два раза в сутки, в ремонтно-подготовительную и в 3-ю проходческую смены.

Полученные значения скорости проведения выработки представлены для варианта 1 в Таблице 1, для варианта 2 – в Таблице 2.

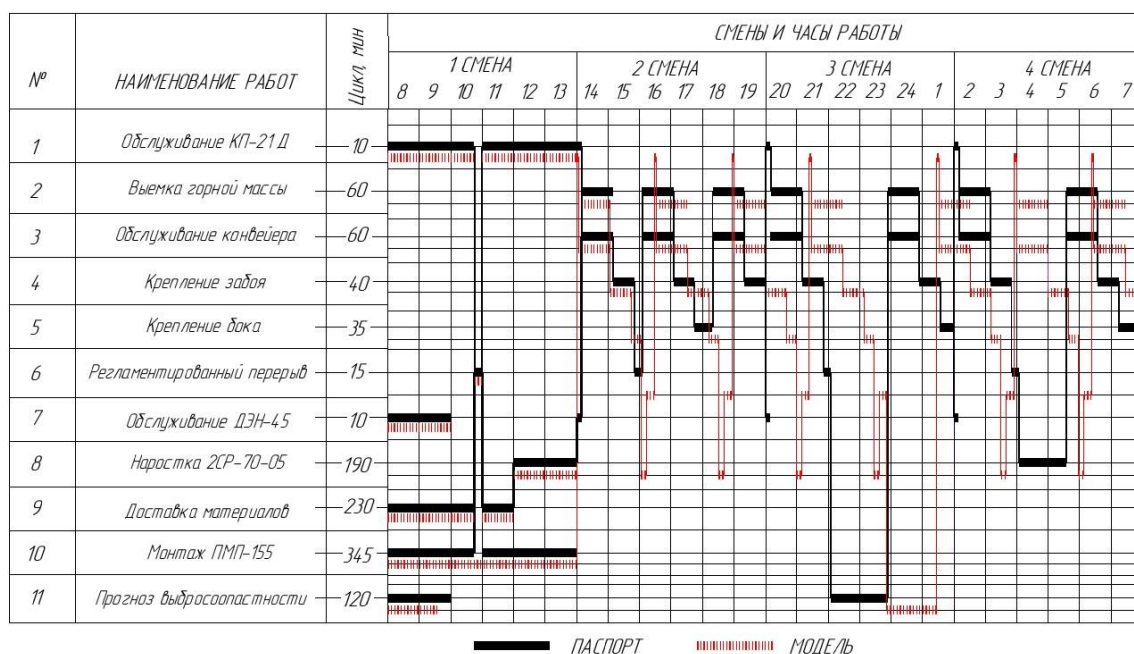


Рис. 9. Проверка адекватности имитационной модели

Fig. 9. Checking the adequacy of the simulation model

Таблица 1. Скорость проведения выработки при использовании сейсмоакустического воздействия в первую смену

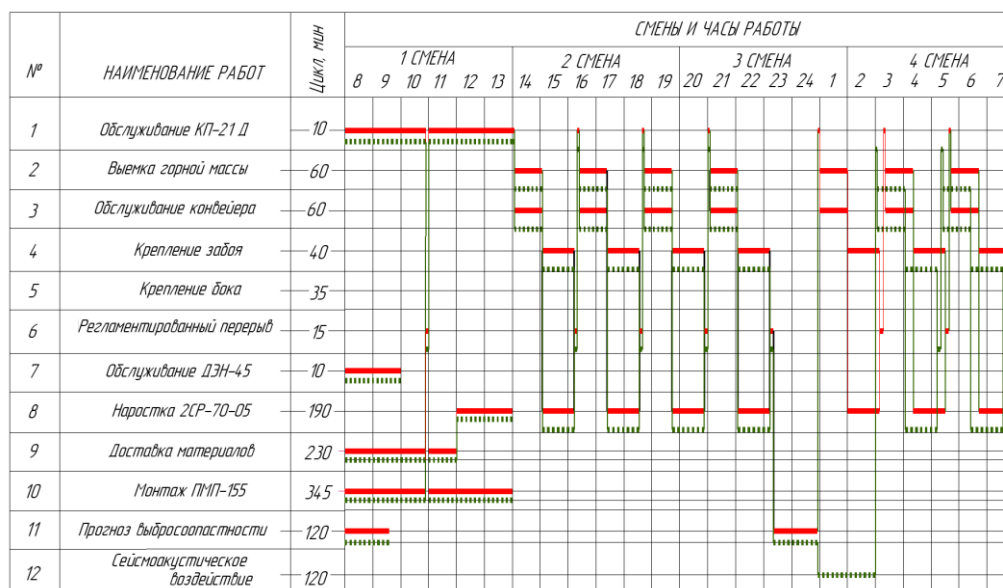
Table 1. Speed of development using seismoacoustic impact in the first shift

| Вероятность выявления категории «ОПАСНО» при прогнозе выбросоопасности, % | Коэффициент эффективности дегазации сейсмоакустического излучателя, % | | | | | | | | | |
|---|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| 10 | 7,85 | 7,93 | 7,98 | 8,04 | 8,12 | 8,21 | 8,29 | 8,36 | 8,46 | 8,53 |
| 20 | 7,08 | 7,18 | 7,26 | 7,39 | 7,52 | 7,63 | 7,74 | 7,86 | 8,05 | 8,18 |
| 30 | 6,42 | 6,54 | 6,67 | 6,80 | 6,88 | 7,07 | 7,19 | 7,38 | 7,55 | 7,72 |
| 40 | 5,88 | 6,02 | 6,12 | 6,23 | 6,36 | 6,50 | 6,65 | 6,81 | 7,01 | 7,29 |
| 50 | 5,44 | 5,56 | 5,69 | 5,80 | 5,92 | 6,05 | 6,17 | 6,31 | 6,49 | 6,74 |
| 60 | 5,02 | 5,13 | 5,23 | 5,36 | 5,46 | 5,57 | 5,70 | 5,82 | 5,96 | 6,11 |
| 70 | 4,67 | 4,74 | 4,88 | 5,00 | 5,03 | 5,12 | 5,20 | 5,24 | 5,33 | 5,53 |
| 80 | 4,33 | 4,37 | 4,45 | 4,52 | 4,57 | 4,60 | 4,63 | 4,63 | 4,79 | 4,86 |
| 90 | 4,01 | 4,03 | 4,07 | 4,12 | 4,09 | 4,17 | 4,17 | 4,14 | 4,12 | 4,08 |
| 100 | 3,55 | 3,55 | 3,55 | 3,55 | 3,55 | 3,55 | 3,55 | 3,55 | 3,55 | 3,55 |

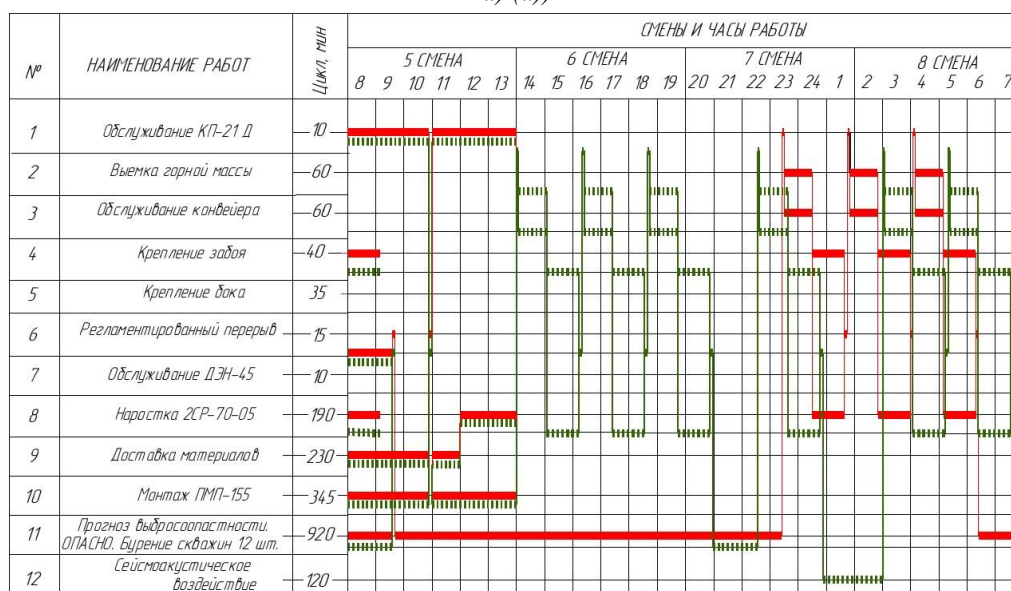
Таблица 2. Скорость проведения выработки при использовании сейсмоакустического воздействия в первую и третью смены

Table 2. Speed of development using seismoacoustic impact in the first and third shifts

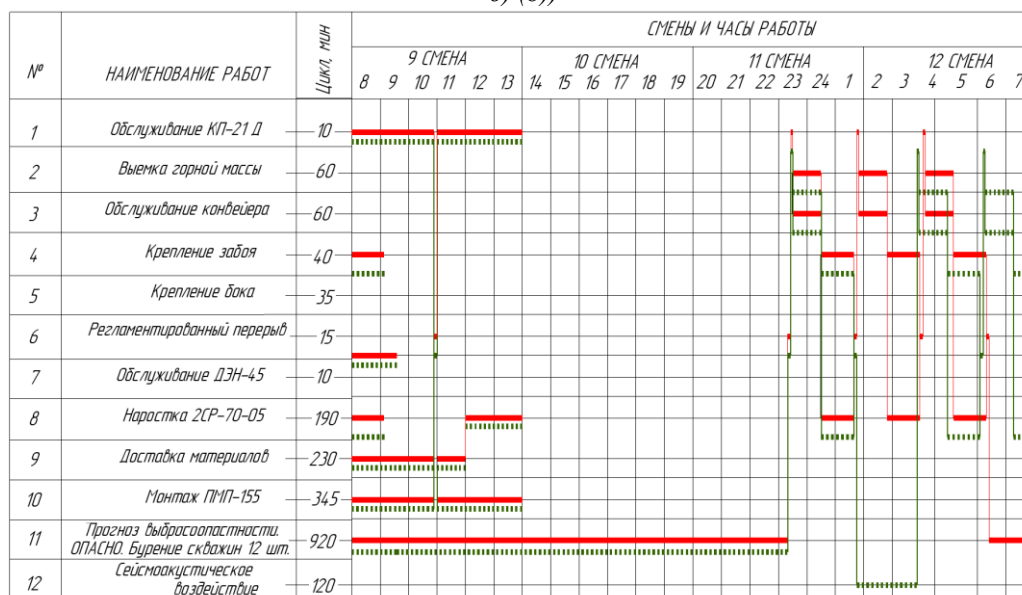
| Вероятность выявления категории «ОПАСНО» при прогнозе выбросоопасности, % | Коэффициент эффективности дегазации сейсмоакустического излучателя, % | | | | | | | | | |
|---|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| 10 | 7,29 | 7,44 | 7,53 | 7,65 | 7,71 | 7,88 | 7,96 | 8,04 | 8,16 | 8,28 |
| 20 | 6,59 | 6,78 | 6,98 | 7,09 | 7,23 | 7,47 | 7,69 | 7,81 | 8,06 | 8,28 |
| 30 | 5,99 | 6,22 | 6,41 | 6,62 | 6,89 | 7,12 | 7,32 | 7,66 | 7,97 | 8,28 |
| 40 | 5,50 | 5,72 | 5,99 | 6,29 | 6,53 | 6,77 | 7,12 | 7,51 | 7,88 | 8,28 |
| 50 | 5,09 | 5,35 | 5,61 | 5,95 | 6,24 | 6,51 | 6,87 | 7,35 | 7,77 | 8,28 |
| 60 | 4,71 | 4,91 | 5,28 | 5,63 | 5,96 | 6,26 | 6,62 | 7,27 | 7,70 | 8,28 |
| 70 | 4,42 | 4,67 | 4,98 | 5,30 | 5,72 | 6,00 | 6,39 | 7,08 | 7,57 | 8,28 |
| 80 | 4,18 | 4,42 | 4,72 | 5,05 | 5,43 | 5,76 | 6,21 | 6,90 | 7,49 | 8,28 |
| 90 | 3,97 | 4,18 | 4,50 | 4,81 | 5,19 | 5,57 | 6,05 | 6,68 | 7,35 | 8,28 |
| 100 | 3,77 | 3,97 | 4,27 | 4,61 | 4,95 | 5,34 | 5,89 | 6,23 | 7,23 | 8,28 |



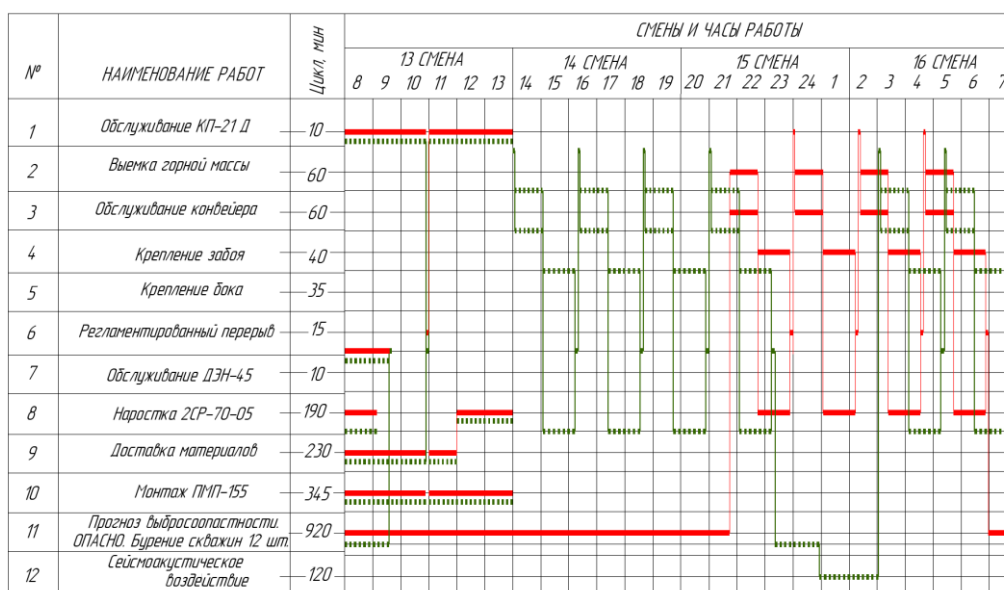
а) (а))



б) (b))



в) (c))



з) (d))

Рис. 10. Графики организации работ при проведении выработки без использования и с использованием сейсмоакустического воздействия в 1 и 3 смены (а – 1-4 смены; б – 5-8 смены; в – 9-12 смены; г – 13-16 смены)

Fig. 10. Schedules of work organization during development of a working without and with the use of seismoacoustic impact in the 1st and 3rd shifts (a – 1-4 shifts; b – 5-8 shifts; c – 9-12 shifts; d – 13-16 shifts)

На Рис. 10 представлены графики организации работ, построенные по данным модельных экспериментов. Приведены варианты проведения выработки без использования (сплошная линия) и с использованием (штриховая линия) сейсмоакустического воздействия в первую и третью смены при общем моделировании 16 смен. Значения параметров P_0 и $k_{ДЕГ}$ определялись на основе эмпирических данных, полученных в результате замеров скорости газовыделения из скважин прогноза выбросоопасности. Эти данные вносились в журнал текущего прогноза и контроля выбросоопасности и эффективности сейсмоакустического воздействия на шахте «Чертинская-Коксовая». Анализ этих данных показал, что за четыре месяца ведения проходческих работ без использования сейсмоакустического воздействия относительная частота появления категории «ОПАСНО» составила 48%, а с применением сейсмоакустического излучателя – 10% (уменьшилась на 80%). С учетом этого при проведении имитационных экспериментов вероятность выявления категории «ОПАСНО» P_0 задавалась в модели равной 48%, а коэффициент эффективности дегазации сейсмоакустического излучателя – 80%.

Установлено, что в варианте без применения дополнительного сейсмоакустического воздействия в третью проходческую смену (базовый вариант) будет пройдено 20,40 м выработки за 17 проходческих циклов. При этом мероприятия по дегазации пласта с бурением

опережающих скважин будут проведены три раза, а скорость проведения выработки составит 5,04 м/сут.

В варианте с применением сейсмоакустического воздействия в первую и дополнительно в третью смены будет пройдено 27,60 м выработки за 23 проходческих цикла. При этом мероприятия по дегазации пласта с бурением опережающих скважин будут проведены один раз, а скорость проведения выработки составит 6,90 м/сут.

С целью сравнения двух организационных вариантов ведения проходческих работ определена разность значений скорости проведения выработки в первом и втором вариантах, представленных в Таблицах 1 и 2 (Таблица 3).

Отрицательные значения разности значений показывают, что вариант 1 обеспечивает более высокую скорость проведения выработки, чем вариант 2, так как мероприятия по дегазации пласта с использованием сейсмоакустического излучателя сдерживают проходческие работы значительно, чем мероприятия по ликвидации выбросоопасной зоны посредством бурения 12-ти опережающих скважин. В ячейках Таблицы 3 с положительным значением разности значений скоростей вариант 2 является более эффективным, так как мероприятия по ликвидации выбросоопасной зоны посредством бурения опережающих скважин снижают скорость проведения выработки значительно, чем профилактическая дегазация с

Таблица 3. Разность скоростей проведения выработки при использовании сейсмоакустического воздействия только в 1-ю смену и в 1 и 3 смены
 Table 3. Difference in the speed of development when using seismoacoustic impact only in the 1st shift and in the 1st and 3rd shifts

| Вероятность выявления категории «ОПАСНО» при прогнозе выбросоопасности, % | Коэффициент эффективности дегазации сейсмоакустического излучателя, % | | | | | | | | | |
|---|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| 10 | -0,56 | -0,49 | -0,45 | -0,40 | -0,41 | -0,32 | -0,32 | -0,31 | -0,30 | -0,24 |
| 20 | -0,49 | -0,40 | -0,28 | -0,29 | -0,29 | -0,16 | -0,05 | -0,06 | 0,01 | 0,10 |
| 30 | -0,43 | -0,31 | -0,26 | -0,17 | 0,01 | 0,06 | 0,13 | 0,28 | 0,42 | 0,56 |
| 40 | -0,37 | -0,30 | -0,14 | 0,06 | 0,17 | 0,27 | 0,48 | 0,70 | 0,86 | 1,00 |
| 50 | -0,35 | -0,21 | -0,09 | 0,15 | 0,32 | 0,45 | 0,70 | 1,04 | 1,27 | 1,54 |
| 60 | -0,31 | -0,22 | 0,05 | 0,27 | 0,50 | 0,69 | 0,92 | 1,45 | 1,74 | 2,17 |
| 70 | -0,24 | -0,06 | 0,10 | 0,30 | 0,69 | 0,89 | 1,19 | 1,84 | 2,25 | 2,75 |
| 80 | -0,15 | 0,05 | 0,27 | 0,52 | 0,86 | 1,16 | 1,58 | 2,27 | 2,70 | 3,43 |
| 90 | -0,04 | 0,15 | 0,43 | 0,69 | 1,11 | 1,39 | 1,89 | 2,54 | 3,23 | 4,21 |
| 100 | 0,22 | 0,42 | 0,72 | 1,06 | 1,40 | 1,80 | 2,34 | 2,68 | 3,68 | 4,73 |

использованием сейсмоакустического излучателя.

Выводы. Результаты имитационного моделирования позволили сформулировать следующие рекомендации:

1. Применять мероприятия по профилактической дегазации пласта с использованием сейсмоакустического излучателя в первую и дополнительно в третью смены при вероятности выявления категории «ОПАСНО» 48% и эффективности сейсмоакустического излучателя – 80%, что позволит снизить вероятность выявления категории «ОПАСНО» на 38% и повысить скорость проведения выработки на 37%.

2. Вводить мероприятия по профилактической дегазации пласта с использованием сейсмоакустического излучателя дополнительно в третью проходческую смену в соответствии с границами области эффективного применения, представленными в Таблице 3 (жирный шрифт).

Таким образом, имитационное моделирование позволило на компьютерной модели провести предварительную оценку эффективности организации работ по снижению газодинамической опасности угольного пласта при проведении подготовительных выработок, не затрагивая реальную шахту, и тем самым

предотвратить возможные риски, связанные с замедлением и остановкой горных работ.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2024-0024 «Разработка эффективных технологий добычи угля роботизированными горнодобывающими комплексами без постоянного присутствия людей в зонах ведения горных работ, систем управления и методов оценки технического состояния и диагностики их ресурса и обоснование обеспечения воспроизводства минерально-сырьевой базы. 2024-2025 гг.» (рег. № 124041100072-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплекс мер по прогнозу и предотвращению динамических явлений на шахте «Чертинская-Коксовая».
2. Патент РФ № 2328594, Приоритет 03.08.2006г., опублик.10.07.2008, Бюл №19, Авторы: Шабаров А. Н., Гончаров Е. В., Керманский А. Т. и др. «Способ газоимпульсной обработки газонефтедобывающих скважин и устройство для его осуществления».
3. Гончаров Е. В. [и др.] Дегазация выбросоопасных пластов термосейсмоакустическим

воздействием // Горный информационно-аналитический бюллетень. М. : МГТУ, 2009. Отдельный выпуск №11. «МЕТАН». С. 40-65.

4. Официальный сайт программы GPSS World: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.elina-computer.ru> (дата обращения: 17.06.2025).

5. Зиновьев В. В. [и др.] Имитационное моделирование роботизируемых технологий открытых и подземных горных работ // Горная промышленность. 2023. (S2). С. 65-76. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-S2-65-76.

6. Клишин В. И. [и др.] Разработка имитационной модели технологии скоростной проходки горных выработок // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2022. № 3. С. 59-66. DOI: 10.15372/FTPRI20220306.

7. Wang H., Tonorio V., Li G. Q., Hou J., Hu N. L. Optimization of trackless equipment scheduling in underground mines using genetic algorithms // Mining metallurgy & exploration. 2020. № 5. Pp. 1531-1544. DOI: 10.1007/s42461-020-00285-8.

8. Рудометов С. В. [и др.] Моделирование работы очистного забоя угольной шахты / С. В. Рудометов, В. В. Окольников, А. А. Ордин // Сборник материалов конференции «Марчуковские научные чтения 2019». Новосибирск, 2019. С. 144.

9. Конюх В. Л., Тайлаков О. В. Предпроектный анализ шахтных робототехнических систем. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1991. 182 с.

10. Модели в GPSS Studio разрабатываются с использованием языка имитационного моделирования GPSS World Core. Sturgul J. Mine Design: Examples Using Simulation. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. 1999. 367 p.

11. Konyukh V., Sinoviev V., Sturgul D. Selection of driving technologies for robotization. // Proc. of the Seventh International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection. Canada : Calgary, 1998. Pp. 659-666.

12. Sebeom P., Yosoon Ch., Han-Su P. Optimization of truck-loader haulage systems in an underground mine using simulation methods // Geosystem engineering. 2016. Vol. 19. I. 5. Pp. 222-231. DOI: 10.1080/12269328.2016.1176538.

13. Стургул Д., Конюх В. Л. Компьютерная имитация горных работ // Горный вестник. 1998. № 1. С. 77-81.

14. Tarshizi E., Sturgul J., Ibarra V., Taylor D. Simulation and animation model to boost mining efficiency and enviro-friendly in multi-pit operations // International journal of mining science and technology. 2015. Val. 25. I. 4. Pp. 671-674.

15. Зиновьев В. В. [и др.] Применение имитационного моделирования для оценки вариантов отработки выемочного блока короткими забоями // ГИАБ. 2018. № S48. С. 181-183.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Зиновьев Василий Валентинович, заведующий лабораторией моделирования горнотехнических систем ФИЦ УУХ СО РАН (650000, Россия, г. Кемерово, пр. Советский, 18), доцент кафедры информационных и автоматизированных производственных систем, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя 28), кандидат технических наук, e-mail: zv150671@gmail.com

Николаев Петр Игоревич, старший научный сотрудник лаборатории моделирования горнотехнических систем ФИЦ УУХ СО РАН (650000, Россия, г. Кемерово, пр. Советский, 18), доцент кафедры информационных и автоматизированных производственных систем, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя 28), кандидат технических наук, e-mail: mrnikolaev@mail.ru

Утюпин Антон Владимирович, главный инженер – начальник технического управления ООО «ММК-УГОЛЬ» (652607, Россия, г. Белово, ул. 1 Телеут, д. 27/2, пом. 1), e-mail: office@mmk-coal.ru

Кузнецов Игорь Сергеевич, старший научный сотрудник лаборатории моделирования горнотехнических систем ФИЦ УУХ СО РАН (650000, Россия, г. Кемерово, пр. Советский, 18), доцент кафедры информационных и автоматизированных производственных систем, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя 28), кандидат технических наук, e-mail: is150794@mail.ru

Гречишкин Павел Владимирович, директор, Кемеровский филиал АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – Межотраслевой научный центр «ВНИМИ»» (650002, Россия, г. Кемерово, Проспект им. академика Леонида Барбараша, д. 1, оф. 502), кандидат технических наук, e-mail: pv_grechishkin@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Зиновьев Василий Валентинович – постановка задачи исследования, разработка методологии эксперимента, систематизация материала.

Николаев Петр Игоревич – разработка имитационной модели, проведение экспериментов.

Утюпин Антон Владимирович – сбор и анализ данных, контроль расчетов, обоснование результатов.

Кузнецов Игорь Сергеевич – выполнение расчетов, написание текста, оформление.

Гречишкин Павел Владимирович – генерация идеи исследования.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

SIMULATION MODELING OF THE ORGANIZATION OF WORK TO REDUCE GAS DYNAMIC HAZARD IN COAL SEAMS DURING THE CONDUCT OF PREPARATORY WORKS

Vasily V. Sinoviev^{1,2}, Petr I. Nikolaev^{1,2}, Anton V. Utyupin³
Igor S. Kuznetsov^{1,2}, Pavel V. Grechishkin⁴

¹ FRC CCC SB RAS

² T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

³ LLC «MMK-COAL»

⁴ Kemerovo Branch, VNIMI JSC

* for correspondence: is150794@mail.ru



Article info

Received:

22 September 2025

Accepted for publication:

15 November 2025

Accepted:

02 December 2025

Published:

22 December 2025

Keywords: coal mine, mine workings, work organization, simulation modeling, decision making.

Abstract.

The article considers options for organizing work during preventive measures to reduce the gas-dynamic hazard of a coal seam using a seismoacoustic emitter in the technology of conducting mining by a selective action combine. The proposed seismoacoustic impact is implemented in wells drilled in a degassed coal massif by generating "selected" frequencies, which allows developing the process of crack formation and, as a consequence, changing its stress-strain state, intensifying gas outflow from cracks in the massif. One of the options provides for preventive degassing of the seam using the technology of seismoacoustic impact from two control boreholes drilled during the first repair and preparatory shift, when no mining operations are carried out. The second option proposes to carry out seam degassing activities additionally during the third working drift shift, which, on the one hand, can contribute to additional degassing and increase the speed of workings by reducing the measures to eliminate emission hazardous zones, and on the other hand, reduce the speed of workings. The problem of studying the efficiency of the designated options for organizing works on preventive degassing of a coal seam is solved. To solve the problem, the simulation modeling method was used with the Russian software product GPSS Studio. A model was created that displays the processes of the heading cycle for the destruction and loading of rock mass, working support, conveyor extension, delivery of materials and takes into account the probabilistic nature of gas emission processes and the efficiency of measures for preventive degassing of the coal seam. Simulation modeling of the organization of works during the execution of a mine working in a coal mine was performed for 16 shifts. The efficiency indicator was determined to be the speed of workings. The results of simulation experiments on the study of the influence of additional measures on preventive degassing on the speed of the conducted development are presented. The boundaries of the area of effective application of measures on preventive degassing of the seam using a seismoacoustic emitter are determined.

For citation: Sinoviev V.V., Nikolaev P.I., Utyupin A.V. Kuznetsov I.S., Grechishkin P.V. Simulation modeling of the organization of work to reduce gas dynamic hazard in coal seams during the conduct of preparatory works. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 6(172):157-170. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-6-157-170, EDN: URDFFA

REFERENCES

1. "A set of measures to predict and prevent dynamic phenomena at the Chertinskaya-Koksovaya mine."
2. Patent of the Russian Federation No. 2328594, Priority 03.08.2006, published 10.07.2008, Bulletin No. 19, Authors: Shabarov A.N., Goncharov E.V., Kermansky A.T. et al. "Method of gas-pulse treatment of gas and oil producing wells and device for its implementation."
3. Goncharov E.V. [et al.] Degassing of outburst-hazardous formations by thermoseismoacoustic impact. *Mining information and analytical bulletin*. Moscow State Mining University. Moscow, 2009. Separate issue № 11 "METAN". pp. 40-65.
4. Official website of the GPSS World program: [Electronic resource]. – URL: <http://www.elina-computer.ru> (date of access: 17.06.2025).
5. Sinoviev V.V. [et al.] Simulation modeling of robotic technologies for open-pit and underground mining. *Mining industry*. 2023; S2:65-76. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-S2-65-76.
6. Klishin V.I. Development of a simulation model of high-speed mining technology. *Physical and technical problems of mineral development*. 2022; 3:59-66. DOI: 10.15372/FTPRI20220306.
7. Wang H., Tonorio V., Li GQ., Hou J., Hu N.L. Optimization of trackless equipment scheduling in underground mines using genetic algorithms. *Mining metallurgy & exploration*. 2020; 5:1531-1544. DOI:10.1007/s42461-020-00285-8.
8. Rudometov S.V. [et al.] Modeling the operation of a coal mine production face. *Collection of materials of the conference "Marchukovsky Scientific Readings 2019"*. Novosibirsk, 2019. P. 144.
9. Konyukh V.L., Tailakov O.V. Pre-project analysis of mine robotic systems. Novosibirsk: Science. Siberian Branch; 1991. 182 p.
10. Models in GPSS Studio are developed using the GPSS World Core simulation language. The operating principle of the language is based on the theory of queuing and allows you to simulate probabilistic processes, as well as display the interactions of mining machines in time and space. Sturgul J. *Mine Design: Examples Using Simulation*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. 1999, 367 p.
11. Konyukh V., Sinoviev V., Sturgul D. Selection of driving technologies for robotization. Proc. of the Seventh International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection. Canada: Calgary; 1998. Pp. 659-666.
12. Sebeom P., Yosoon Ch., Han-Su P. Optimization of truck-loader haulage systems in an underground mine using simulation methods. *Geosystem engineering*. 2016; 19(5):222-231. DOI: 10.1080/12269328.2016.1176538.
13. Sturgul D., Konyukh V.L. Computer simulation of mining operations // *Mining Bulletin*. 1998; 1:77-81.
14. Tarshizi E., Sturgul J., Ibarra V., Taylor D. Simulation and animation model to boost mining efficiency and en-viro-friendly in multi-pit operations. *International journal of mining science and technology*. 2015; 25(4):671-674.
15. Sinoviev V.V. [et al.] Application of simulation modeling to assess options for developing a mining block with short faces. *GIAB*. 2018; S48:181-183.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).
The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Vasily V. Sinoviev, Head of the Laboratory of Modeling of Mining Engineering Systems, FRC UUKh SB RAS (650000, Russia, Kemerovo, Sovetsky Ave., 18), Associate Professor of the Department of Information and Automated Production Systems, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya St., 28), Candidate of Technical Sciences, e-mail: zv150671@gmail.com

Petr I. Nikolaev, Senior Researcher, Laboratory of Modeling of Mining Engineering Systems, FRC UUKh SB RAS (650000, Russia, Kemerovo, Sovetsky Ave., 18), Associate Professor of the Department of Information and Automated Production Systems, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya St. 28), Candidate of Technical Sciences, e-mail: mrnikolaev@mail.ru

Anton V. Utyupin, Chief Engineer – Head of Technical Department of MMK-UGOL LLC (652607, Russia, Belovo, 1 Teleut St., 27/2, pom. 1), e-mail: office@mmk-coal.ru

Igor S. Kuznetsov, Senior Researcher, Laboratory of Modeling of Mining Engineering Systems, FRC UUKh SB RAS (650000, Russia, Kemerovo, Sovetsky Ave. 18), Associate Professor, Department of Information and Automated Production Systems, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya St. 28), Candidate of Technical Sciences, e-mail: is150794@mail.ru

Pavel V. Grechishkin, Director, Kemerovo branch of JSC "Research Institute of Mining Geomechanics and Mine Surveying – Intersectoral Scientific Center "VNIMI" (650002, Russia, Kemerovo, Academician Leonid Barbarash Avenue, 1, office 502), Candidate of Technical Sciences, e-mail: pv_grechishkin@mail.ru

Contribution of the authors:

Vasily V. Sinoviev – formulation of the research task, development of the experimental methodology, systematization of the material.

Petr I. Nikolaev – development of a simulation model, conducting experiments.

Anton V. Utyupin – data collection and analysis, control of calculations, substantiation of results.

Igor S. Kuznetsov – performing calculations, writing text, design.

Pavel V. Grechishkin – generation of a research idea.

All authors have read and approved the final manuscript.

