

УДК 004.942, 622.3

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КОНВЕЙЕРНОГО ШТРЕКА

В.В. Зиновьев, П.И. Николаев, И.С. Кузнецов (Кемерово)

Введение

В Российской Федерации добыча угля остаётся одной из главных базовых отраслей, которая продолжит играть существенную, значимую роль в инвестиционной, производственной и финансовой сферах страны. Основным угольным регионом России является Кемеровская область – Кузбасс. На его территории функционируют множество крупных российских компаний, занимающихся добычей угля. В 2023 году подземным способом добыто 97,7 млн т угля, проведено 365,7 км горных выработок, в том числе вскрывающих и подготавливающих 290,8 км. При этом уровень комбайновой проходки составляет 92,6% от общего объёма проведённых выработок. Тенденция, связанная с интенсификацией подземных горных работ, приводит к сокращению сроков отработки вскрытых запасов и необходимости перехода на более глубокие горизонты. Средняя скорость увеличения глубины составляет 16-17 м в год [1]. 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 одной из шахт Кузбасса проводят конвейерный штрек по угольному пласту с углом наклона 2-7 градусов. Протяжённость выработки – 700 м. Сечение выработки вчерне – 18,5 м², в свету – 17,3 м². Кровлю и борта выработки закрепляют сталеполимерными анкерами на шайбы с перетяжкой решетчатой затяжкой. Шаг крепи – 1,0 м. Согласно утверждённому паспорту проведения и крепления принята технологическая схема проведения выработки комбайном избирательного действия с транспортированием отбитой горной массы по проводимой выработке скребковым конвейером. Обработку забоя рабочим органом комбайна производят на глубину, равную шагу установки крепи (рис. 1).

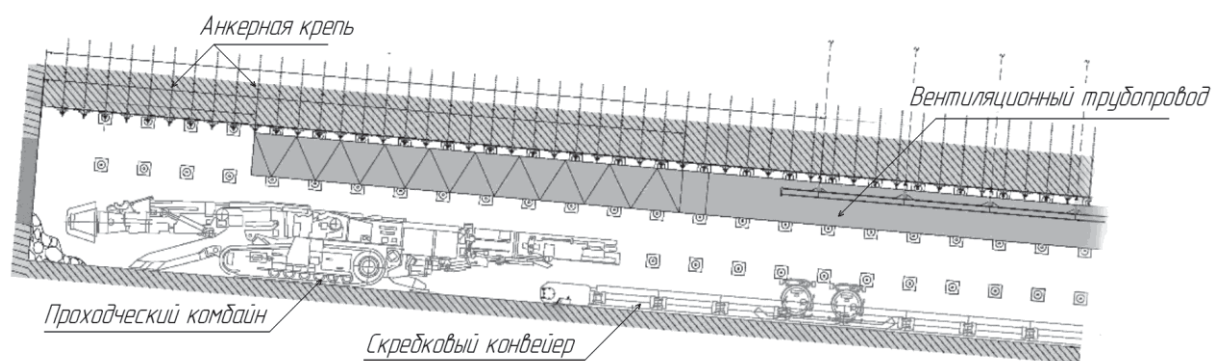


Рис. 1. Технологическая схема проведения конвейерного штрека

Технология проведения выработки проходческим комбайном включает 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 конвейерного штрека (рис. 2).

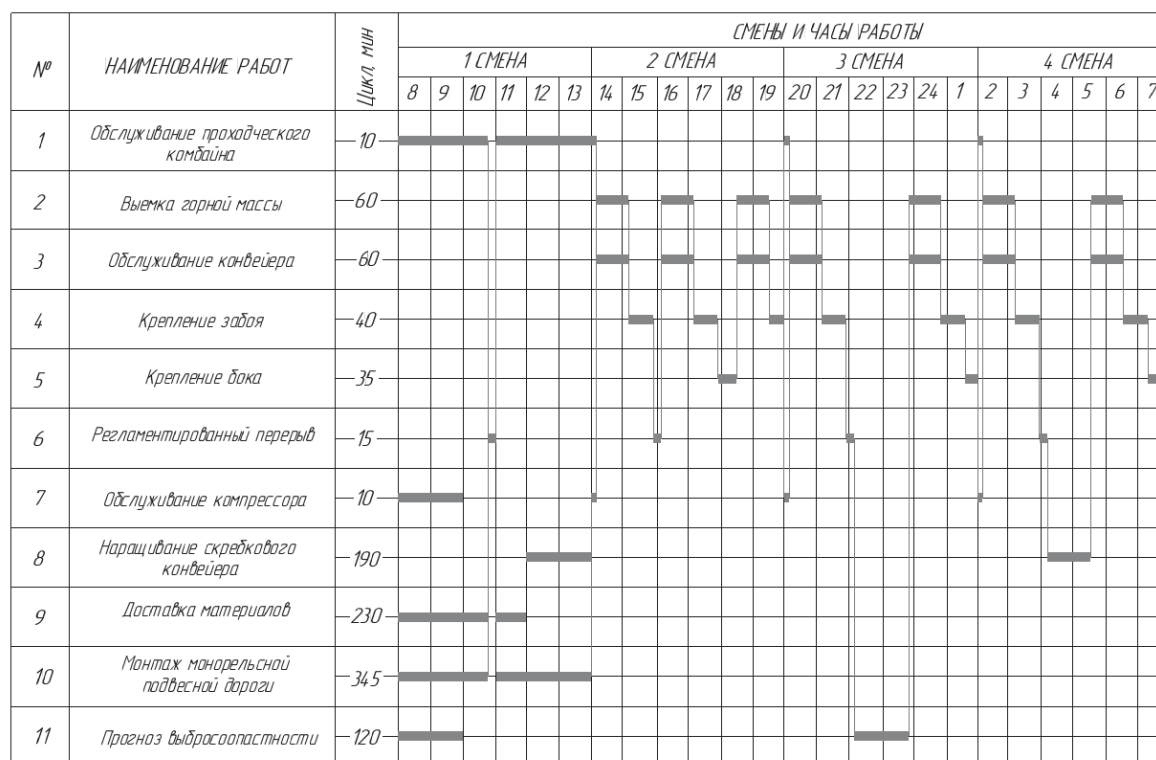


Рис. 2. График организации работ при проведении конвейерного штрека

Цикл работ по проведению выработки в каждой смене начинают с проверки крепи, подготовки к работе оборудования и механизмов, приведения рабочих мест в безопасное состояние. Продолжительность смены – 6 часов. Первая смена – ремонтно-подготовительная, остальные три смены – проходческие. В ремонтно-подготовительную смену производят осмотр и профилактический ремонт комбайна и забойного оборудования, наращивание вентиляционного става, противопожарного трубопровода, монтаж подвесной монорельсовой дороги, доставку материалов и т.д. В проходческие (рабочие) смены ведут работы по проходке выработки: выемку и транспортировку горной массы, крепление выработки, наращивание забойного конвейера и т.д.

Проведение конвейерного штрека на шахте сопряжено с высокими рисками выбросов угля и газа. Для предупреждения этих явлений предусмотрен ряд мероприятий по ведению работ в выбросоопасных зонах:

- барьерная дегазация;
- прогноз выбросоопасности;
- дегазация пласта бурением опережающих скважин;
- профилактическая дегазация пласта с использованием технологии сейсмоакустического воздействия.

Барьерную дегазацию осуществляют путём бурения двух дегазационных скважин под углом по направлению проведения выработки. Далее бурят скважины из боковых ниш выработки, нарезаемых комбайном в шахматном порядке. После окончания бурения скважины подключают к дегазационной системе для изолированного отведения метана.

Прогноз выбросоопасности осуществляют после проведения барьерной дегазации через каждые 4 м подвигания забоя по начальной скорости газовыделения из трех контрольных шпуров. Два контрольных шпура бурят под углом по направлению движения выработки, а третий шпур - по оси выработки (рис. 3). После окончания бурения определяют начальную скорость газовыделения. При значении скорости истекания газа менее 4 л/мин зону относят к категории «не опасно». Если скорость газовыделения превышает 4 л/мин, зону относят к категории «опасно», прогноз прекращают и принимают меры по её ликвидации.

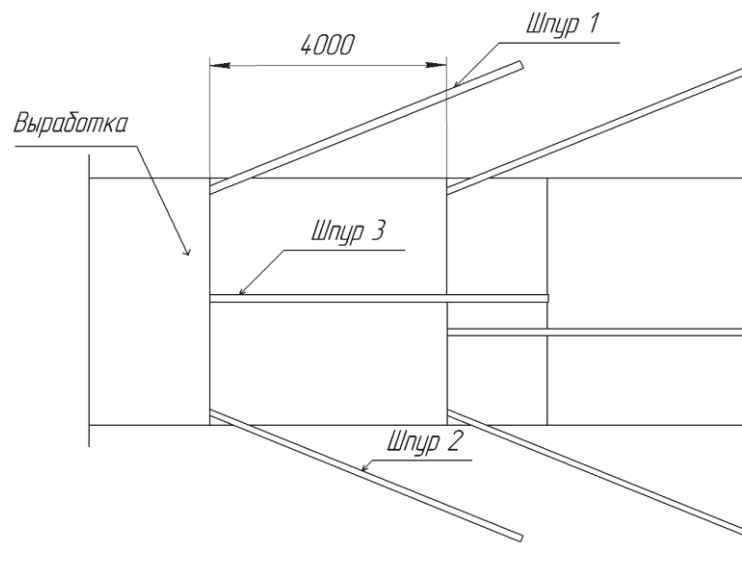


Рис. 3. Схема бурения шпуров для прогноза выбросоопасности

Дегазацию бурением опережающих скважин применяют в случае обнаружения выбросоопасного состояния пласта (категория «опасно»). При этом производят бурение 12 разгрузочных опережающих скважин (рис. 4).

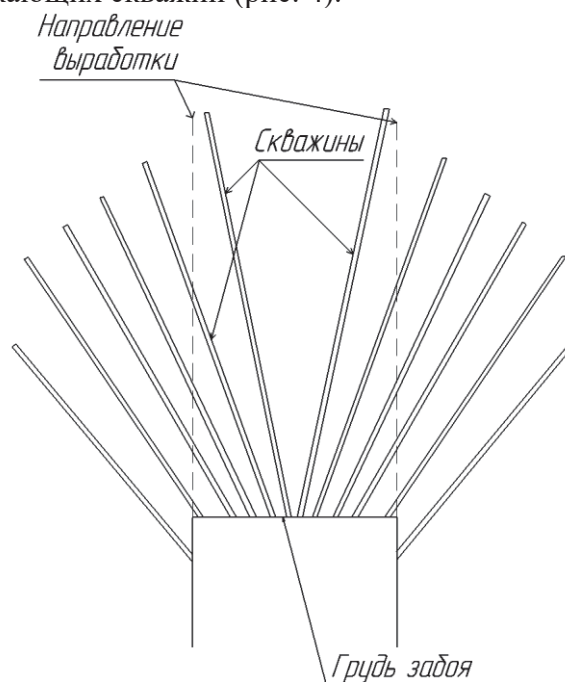


Рис. 4. Схема бурения дегазационных опережающих скважин

Прогноз выбросоопасности проводят в первую ремонтно-подготовительную смену, когда не ведётся выемка горной массы. При прогнозе, относящимся к категории «опасно» незамедлительно осуществляют ликвидацию опасной зоны путём бурения 12 скважин, что влияет на скорость проведения выработки, т.к. затрагивает вторую и третью рабочие проходческие смены (рис. 5).

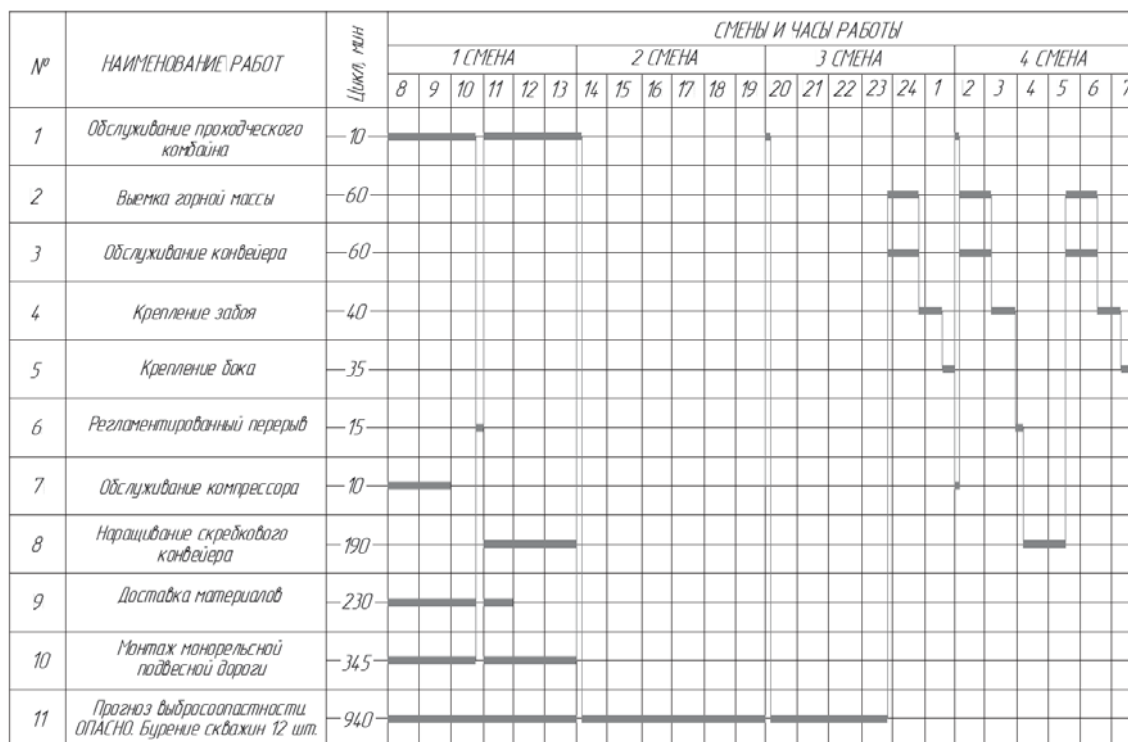


Рис. 5. График организации работ при категории прогноза «опасно»

На шахте также применяют профилактическую дегазацию пласта с использованием технологии сейсмоакустического воздействия [2, 3] в первую ремонтно-подготовительную смену, когда не ведутся проходческие работы. В такой технологии специальный сейсмоакустический излучатель вставляют в два уже пробурённых шпура для прогноза выбросоопасности (рис. 3), и за счёт генерации вибросейсмических колебаний вызывают разгрузку и частичное разрушение пород, сопровождающееся ростом трещиноватости и интенсификацией истечения газа из трещин в массиве.

Постановка задачи исследования

Предлагается дополнительно проводить мероприятия по дегазации пласта с использованием сейсмоакустического излучателя в третью рабочую проходческую смену. Предполагается, что реализация такого предложения, с одной стороны, будет способствовать дополнительной дегазации и увеличивать скорость проведения выработок за счёт сокращения мероприятий по ликвидации выбросоопасной зоны посредством бурения 12 опережающих скважин. С другой стороны, проведение мероприятий по дегазации в рабочую проходческую смену может повлечь падение скорости проведения выработки.

В связи с этим возникает задача исследования эффективности мероприятий дегазации пласта с использованием технологии сейсмоакустического воздействия дополнительно в третью рабочую проходческую смену.

Материалы и методы решения задачи

Решение обозначенной задачи на реальном объекте сопряжено с рисками, связанными с остановкой горных работ и уменьшением скорости проходки. Поэтому целесообразно применение математического моделирования.

Для построения модели необходимо отобразить динамические процессы разрушения и погрузки горной массы, возведения крепи, организацию работ при проходческом цикле и мероприятиях по дегазации. Моделирование осложняется вероятностной природой процессов газовыделения и эффективности мероприятий по профилактической дегазации, что затруднительно описать аналитическими методами. Исходя из этого для построения модели выбрано имитационное моделирование, которое широко и успешно применяют в горном деле [4] – [7].

В России одной из наиболее известных систем имитационного моделирования, которая нашла применение в горном деле, является GPSS Studio, разработанная российской компанией «Элина Компьютер» и включённая в Реестр Минкомсвязи отечественных программных продуктов [8]. В GPSS Studio реализован дискретно-событийный подход к моделированию, наиболее подходящий для отображения подземных и открытых горных работ [9] – [13]. Для создания моделей использован язык имитационного моделирования GPSS World Core, принцип работы которого основан на теории массового обслуживания и позволяет моделировать вероятностные процессы, а также отображать взаимодействия горных машин во времени и пространстве.

Результаты

В среде имитационного моделирования GPSS Studio разработана модель проходческих работ при проведении конвейерного штрека на шахте, 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. 6.

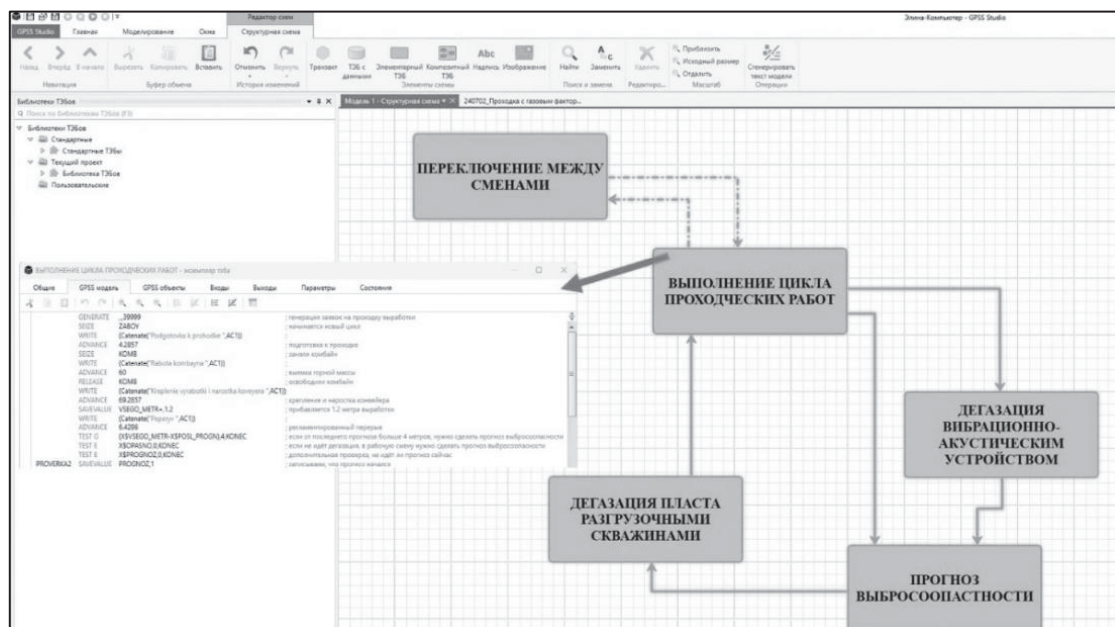


Рис. 6. Имитационная модель проведения конвейерного штрека в GPSS Studio

Сегмент «Переключение между сменами» выполняет следующие управляющие функции:

- меняет значения модельных переменных, которые используются в остальных четырёх 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 применения технологии дегазации пласта с использованием сейсмоакустического излучателя в модель введены два вероятностных параметра, влияющих на мероприятия по дегазации:

- P_O - вероятность получения категории «опасно» при прогнозе выбросоопасности без использования сейсмоакустического излучателя, которая изменяется от 10% (категория «опасно» маловероятна) до 100% (категория «не опасно» невозможна);
- $k_{ДЕГ}$ - коэффициент эффективности дегазации сейсмоакустического излучателя, который изменяется от 10% (излучатель незначительно влияет на газоносность пласта) до 100% (излучатель полностью устраняет газоносность пласта).

Проверка адекватности модели проводилась посредством сравнения графика организации работ, утверждённого паспорта на проведение и крепление конвейерного штрека с графиком организации работ, построенным по результатам имитационного моделирования. Максимальное расхождение продолжительностей выполнения операций составило 5,6%.

Эффективность мероприятий по дегазации пласта с использованием технологии сейсмоакустического воздействия проверялась путём проведения имитационных экспериментов с изменением введённых в модель параметров P_O и $k_{ДЕГ}$ от 10% до 100% с шагом в 10%.

Показателем эффективности выбрана скорость проведения выработки.

Проведён 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 табл. 1, а для варианта 2 – в табл. 2.

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

Вероятность выявления категории «опасно» при прогнозе выбросоопасности (P_o), %	Коэффициент эффективности дегазации сейсмоакустического излучателя ($k_{ДЕГ}$), %									
	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 1-ю и 3-ю смены

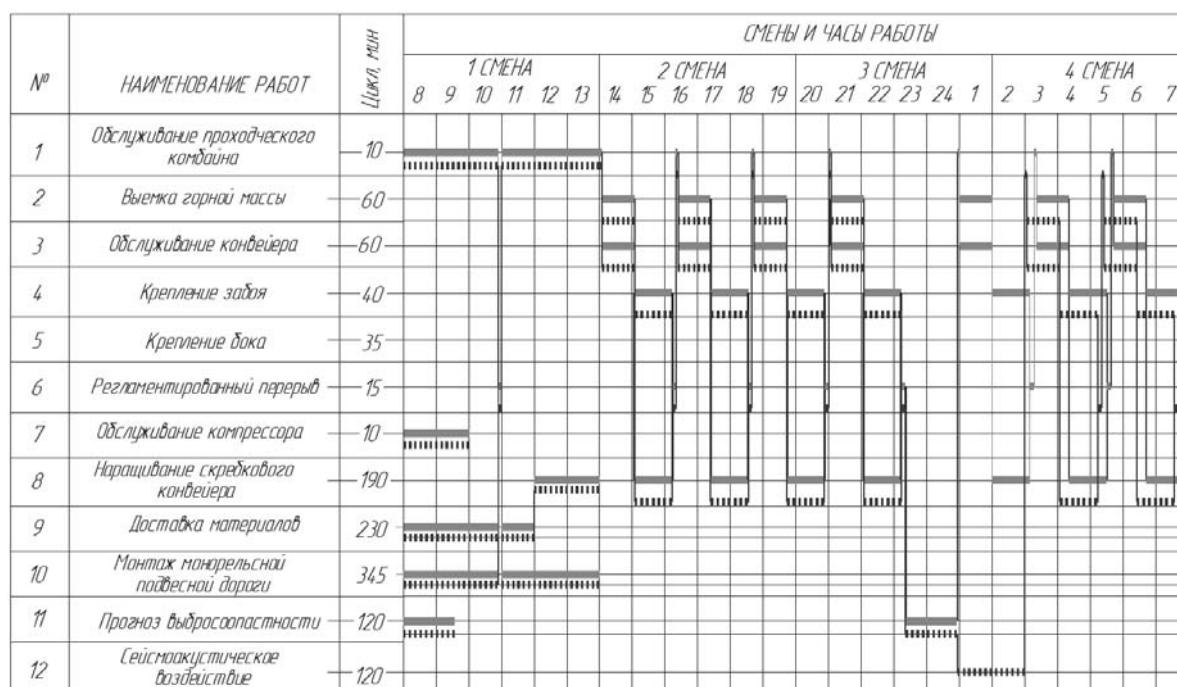
Вероятность выявления категории «опасно» при прогнозе выбросоопасности (P_o), %	Коэффициент эффективности дегазации сейсмоакустического излучателя ($k_{ДЕГ}$), %									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
10	7,29	7,44	7,53	7,65	7,71	7,88	7,96	8,04	8,16	8,28
20	6,59	6,78	6,98	7,09	7,23	7,47	7,69	7,81	8,06	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

Для примера на рис. 7 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. Моделировалось 16 смен. Значения параметров P_0 и $k_{ДЕГ}$ определялись на основе эмпирических данных, полученных в результате замеров скорости газовыделения из скважин прогноза выбросоопасности.

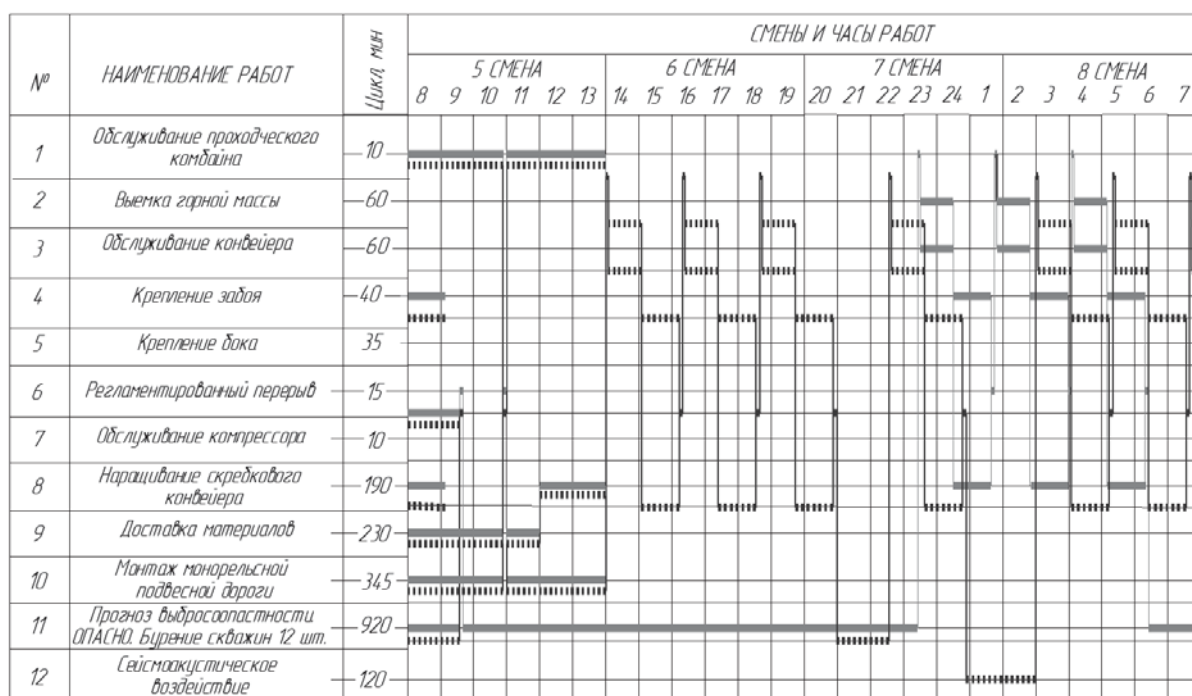
Эти данные вносились в журналы текущего прогноза выбросоопасности и эффективности сейсмоакустического воздействия на шахте, рис. 8.

По данным журналов установлено, что за четыре месяца ведения проходческих работ без использования сейсмоакустического воздействия относительная частота появления категории «опасно» составила 48%.

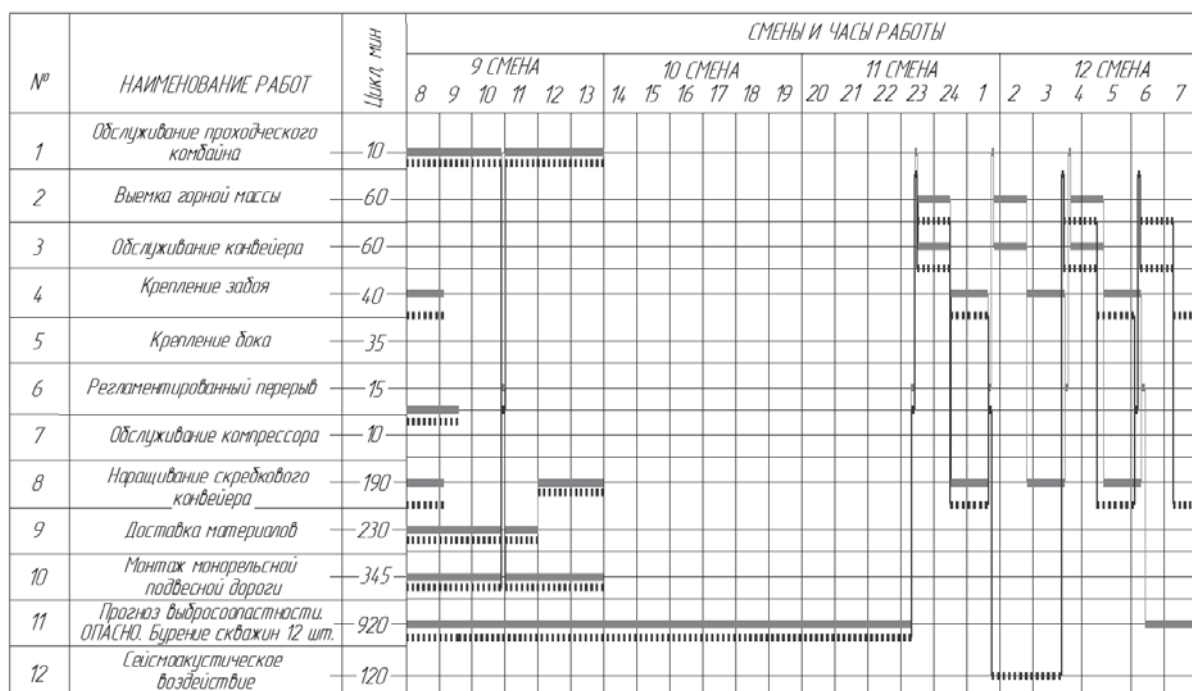
Аналогичным образом определялась относительная частота появления категории «опасно» с применением сейсмоакустического излучателя в последующие четыре месяца, которая составила 10%, т.е. уменьшилась на 80%. Исходя из этого вероятность выявления категории «опасно» P_0 задавалась в модели равной 48%, а коэффициент эффективности дегазации сейсмоакустического излучателя – 80%.



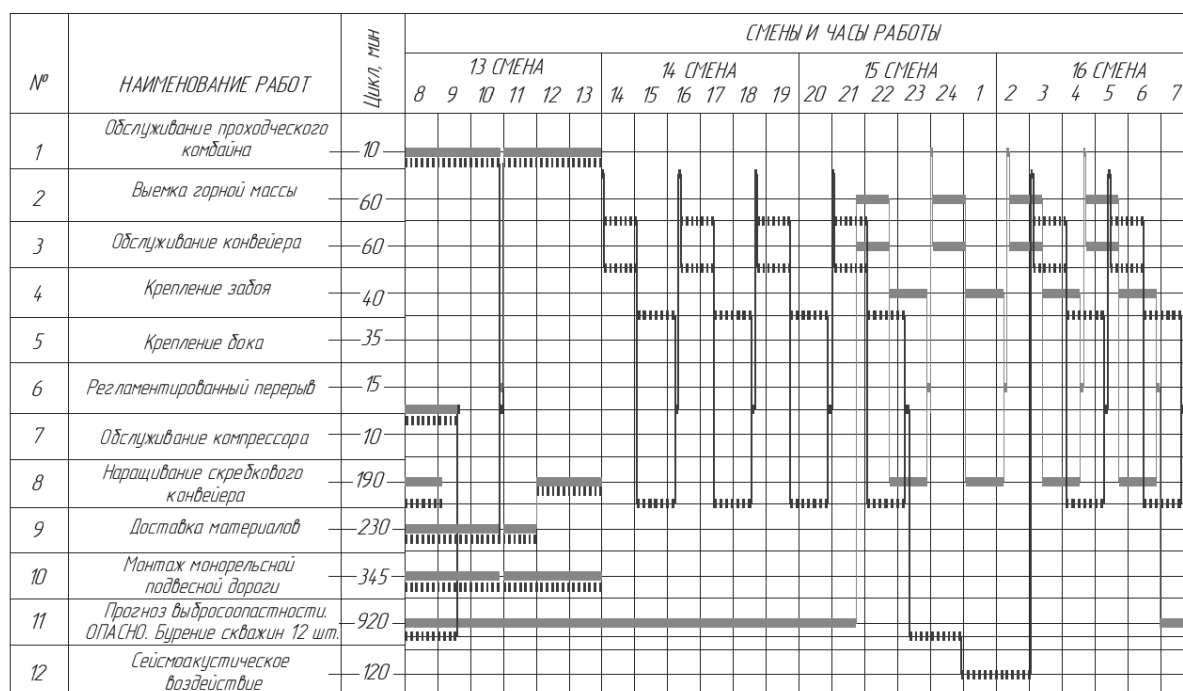
а)



б)



в)



г)

Рис. 7. Графики организации работ при проведении выработки без использования и с использованием сейсмоакустического воздействия в 1-ю и 3-ю смены (а – 1-4 смены; б – 5-8 смены; в – 9-12 смены; г – 13-16 смены)

Дата	Положение забоя	Номер скважины	Мощность пласта	Начальная скорость газовыделения g_2 л/мин, на глубине скважины, м.						Категория выбросоопасности участка угольного пласта
				1,5	2,5	3,5	4,5	5,5		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.08.24	МТЗ4Р	1		1,3	5,1	-	-	-		отсутствует
1 см	103	2	2,1	2,9	4,8	-	-	-		зачис
		3		2,0	3,1	3,0	2,1	2,3		
2.06.24	МТЗ4	1		0,5	0,9	1,7	2,4	3,0		
2 см	+103	2	2,1	0,5	1,2	1,2	1,7	2,0		4 м не опасно
		3		0,6	0,6	1,8	1,5	2,0		
4.06.24	МТЗ55	1	2,1	0	0	0	0	0		не опасно
4 см	+103	2		0,8	1,5	2,5	3,2	3,8		
4 см										

Рис. 8. Фрагмент журнала текущего прогноза выбросоопасности

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.

Результаты имитационного моделирования позволили сформулировать рекомендации, что применение мероприятий по профилактической дегазации пласта

с использованием технологии сейсмоакустического воздействия в первую и дополнительно в третью смены при вероятности выявления категории «опасно» 48% и эффективности сейсмоакустического излучателя 80%, является целесообразным и позволит снизить вероятность выявления категории «опасно» на 38% и повысить скорость проведения выработки на 37%.

Таким образом, применение имитационного моделирования подземных горных работ с использованием построенной в среде GPSS Studio модели технологии проведения горной выработки позволило на основе проведённых вычислительных экспериментов оценить насколько применение мероприятий по профилактической дегазации пласта с использованием сейсмоакустического излучателя снижает вероятность выявления категории «опасно» и повышает скорость проведения выработки.

Проведённые исследования в очередной раз подтвердили целесообразность применения имитационного моделирования в горном деле для принятия решений, предварительную оценку которых можно проводить на компьютерных моделях не затрагивая реальную шахту и тем самым предотвратить риски, связанные с замедлением и остановкой горных работ.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения РАН» проект FWEZ-2021-0002 «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» (рег. № AAAA-A21-121012290021-1).

Литература

1. **Зубов В.П.** Технология подземной разработки мощных пластов угля с низкими прочностными характеристиками / В.П. Зубов, Тхан Ван Зуи, А.С. Федоров // Уголь. 2023. № 5. С. 41-49. – DOI: 10.18796/0041-5790-2023-5-41-49.
2. **Гончаров Е.В.** Дегазация выбросоопасных пластов термосейсмоакустическим воздействием / Е.В. Гончаров, Е.Н. Работа, А.А. Вьюнников, Е.В. Лодус // Горный информационно-аналитический бюллетень / МГГУ, М., 2009. №11, «МЕТАН», С. 40-65.
3. Патент № 2328594 РФ, 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».
4. **Sturgul J.** Mine Design: Examples Using Simulation. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. 1999, 367 p.
5. **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, 6-8 или 9 Oct. 1998. P.659-666.
6. **O'Connell, T and Sturgul, J R.** Simulation and animation model for the Millerton coal mine (New Zealand), in Proceedings Mine Planning and Equipment Selection (MPES) 2010, (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne). P. 577-580.
7. **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. P. 222-231. DOI: 10.1080/12269328.2016.1176538.

8. Официальный сайт программы GPSS World: [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.elina-computer.ru> (дата обращения: 17.06.2025).
9. **Зиновьев В.В.** Имитационное моделирование роботизируемых технологий открытых и подземных горных работ / В.В. Зиновьев, И.С. Кузнецов, П.И. Николаев, А.Н. Стародубов // Горная промышленность. 2023. – (S2). – С. 65-76. – DOI:10.30686/1609-9192-2023-S2-65-76.
10. **Зиновьев В.В.** Имитационное моделирование функционирования экскаваторно-автомобильного комплекса с роботизированными автосамосвалами / В.В. Зиновьев, И.С. Кузнецов, П.И. Николаев // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2023): сборник трудов одиннадцатой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности / Под науч. ред. В.В. Девяткова. – Казань: Изд-во АН РТ, 2023. – С. 341-350.
11. **Клишин В.И.** Разработка имитационной модели технологии скоростной проходки горных выработок / В.И. Клишин, А.Н. Стародубов, В.В. Зиновьев, А.Д. Тургенев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – №3. – С. 59-66. – DOI: 10.15372/FTPPI20220306.
12. **Стародубов А.Н., Кадочигова А.Н., Каплун А.В.** Использование метода дискретных элементов для имитационного моделирования выемки угля очистным комбайном // Горная промышленность. 2023. №2. – С.150-154. – DOI:10.30686/1609-9192-2023-S2-150–154.
13. **Стародубов А.Н.** Исследование потока горной массы на питателе секции крепи при выпуске угля из подкровельной толщи мощных пологих пластов средствами имитационного моделирования / А. Н. Стародубов, В. И. Клишин, А. Н. Кадочигова, А. В. Каплун // Уголь. – 2024. – № 9 (1184). – С. 53-60. – DOI: 10.18796/0041-5790-2024-9-53-60.