

**ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ ВЫПУСКА УГЛЯ ПОДКРОВЕЛЬНОЙ ТОЛЩИ**

**А.Н. Стародубов, В.В. Зиновьев, В.И. Клишин, В.А. Крамаренко (Кемерово)**

Подземным способом добываются наиболее ценные и поставляемые на экспорт марки угля. При этом значительная часть запасов сосредоточена в мощных угольных пластах со сложными горно-геологическими условиями. Способ подземной разработки таких пластов длинными очистными забоями в настоящее время является самым производительным. Из множества технологий отработки мощных пластов [1-4] наиболее эффективной и безопасной является их выемка на всю мощность с выпуском угля из подкровельной или межслоевой толщи в подсечной слой. Институтом угля ФИЦ УУХ СО РАН для реализации такой технологии предложена новая конструкция механизированной крепи с регулируемым управляемым выпуском. В основу конструкции положено использование регулируемых по производительности питателей в секциях крепи, установленных в специальные окна в поддерживающей части, что обеспечивает управляемый выпуск по длине лавы (рисунок 1).

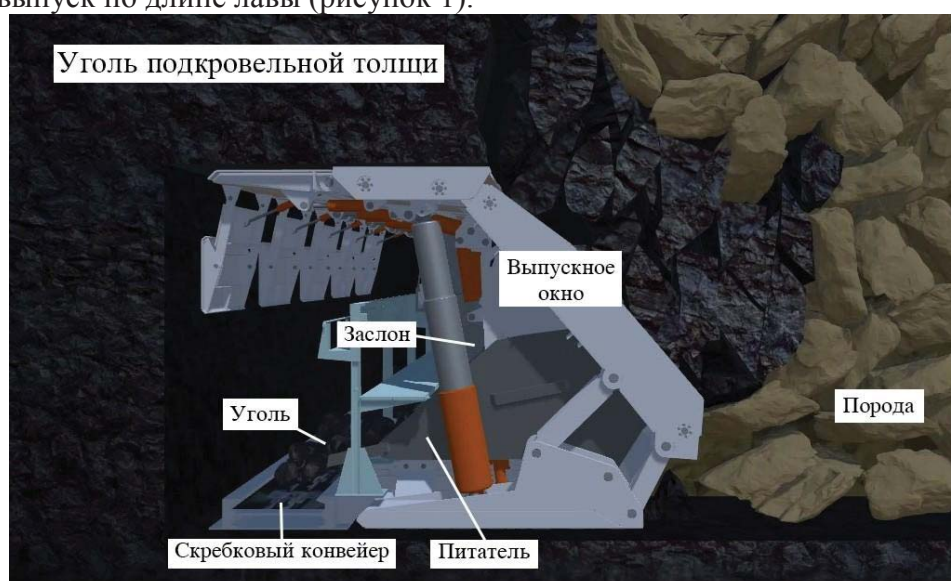


Рис.1 – Принцип выпуска угля подкровельной толщи

Одна из возникающих проблем – управление выпуском угля через питатели секции крепи, обеспечивающее максимальную загрузку лавного конвейера. Для этого необходимо определить рациональный режим выпуска. В работах [5-7] представлены результаты натурных экспериментов, проведенных на лабораторной установке, и определены возможные режимы(рисунок 2):

- индивидуальный: питатели включаются поочередно на каждой секции (рисунок 2 а);
- волновой: питатели включаются последовательно на каждой секции, но с некоторой временной задержкой (рисунок 2 б);
- групповой: питатели включаются поочередно в группах из нескольких секций (рисунок 2 в);
- площадной: питатели работают одновременно на всех секциях (рисунок 2 г).

При всех режимах питатель находится в открытом или частично открытом положении до появления границы порода/уголь в выпускном окне, после этого питатели отключаются и выпуск угля прекращается.

### Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

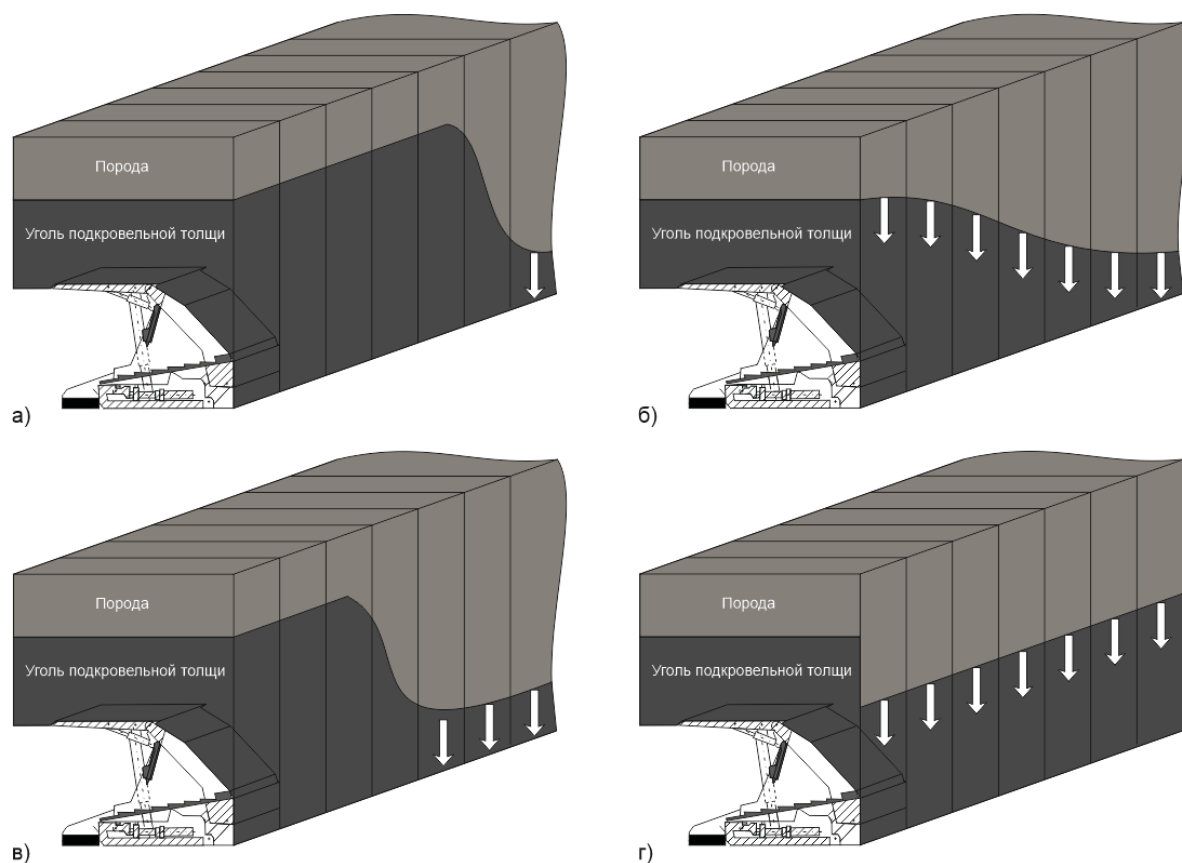


Рис. 2 – Схемы режимов выпуска угля подкровельной толщи

Возникает задача исследования различных режимов выпуска угля и определения рационального режима. Решение этой задачи осложняется высокой динамичностью, нестабильностью и стохастичностью процесса выпуска угля из-за непостоянного объема и скорости выпуска угля, движения лавного конвейера, работы питателей секций крепи, открывающихся и закрывающихся выпускных окон питателей, различных скоростей выпуска угля из каждого питателя, различной последовательности открывания и количества одновременно открываемых выпускных окон питателей. Все это приводит к необходимости разработки математического и программного обеспечения для решения поставленной задачи.

Известно, что одним из мощнейших математических аппаратов для описания дискретных процессов является теория массового обслуживания, на основе которой разработана концептуальная модель функционирования роботизированного комплекса с управляемым выпуском подкровельной толщи.

В виде системы массового обслуживания (СМО) представлены элементарные операции выпуска и транспортировки угля на участке конвейера длиной, равной ширине секции крепи. Заявки имитируют дискретные объемы угля. Приборы обслуживания (питатель и участок конвейера) задерживают заявки на время, определяемое скоростью выпуска на конкретной секции и характеристиками применяемого конвейера (скорость и производительность).

Модель элементарной операции отображается многофазной многоканальной системой массового обслуживания без отказов с простейшей дисциплиной обслуживания FIFO.

Общее время нахождения заявки при выполнении операции

$$t = \frac{m}{M} + \frac{l_{\text{уч}}}{v_{\text{конв}}} \quad 1)$$

где  $m$  – масса порции угля (кг),  $M$  – массовый расход угля при выпуске (кг/с),  $l_{\text{уч}}$  и  $v_{\text{конв}}$  – длина (м) моделируемого участка скребкового конвейера и его скорость (м/с).

Последовательное объединение всех семи моделей в единую сеть СМО позволяет разработать концептуальную модель рассматриваемого роботизированного комплекса (рисунок 3).

### Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

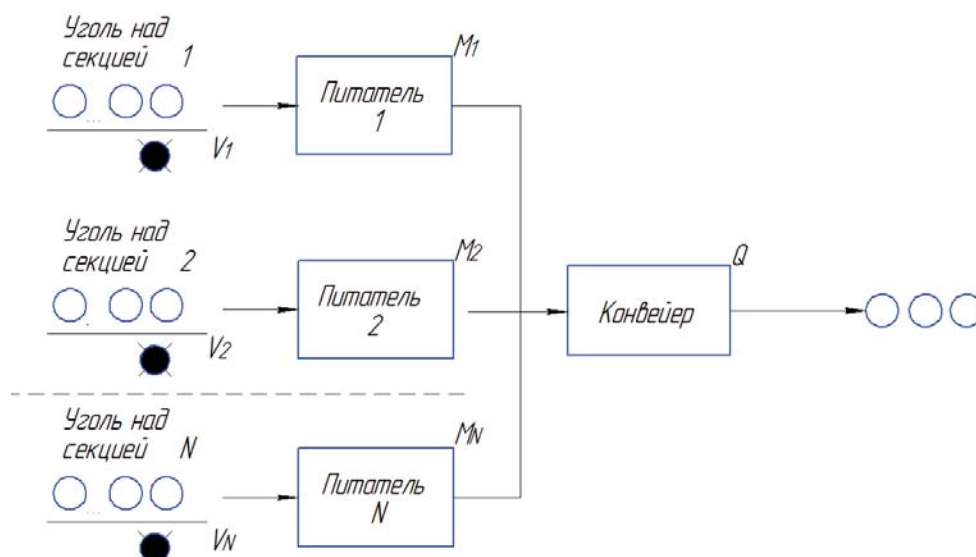


Рис. 3 – Роботизированный комплекс в виде сети однофазных одно- и многоканальных СМО без отказов с ограниченным входным потоком заявок

Динамичность и множество случайных аспектов технологии затрудняют использование аналитических моделей. Предлагается для исследования и выбора режима выпуска угля применить имитационный подход [8-16], при котором отсутствует явное аналитическое описание процессов и который успешно применяется при исследовании динамически изменяющихся систем, в том числе и при ведении горных работ.

Для имитационного моделирования в качестве средства программной реализации модели роботизированного механизированного комплекса применена среда имитационного моделирования GPSS World (ООО «Элина-Компьютер», Россия), основанная на теории очередей и позволяющая моделировать процессы, случайно изменяющиеся во времени и пространстве. Язык GPSS и его версии является одним из самых эффективных и распространенных программных средств моделирования сложных дискретных систем на ЭВМ, которые успешно используются для моделирования горных работ [17-18].

Основными объектами в GPSS-модели являются транзакты и блоки. Транзакты представляют собой аналоги заявок в СеСМО. Они, перемещаясь от блока к блоку, имитируют выпуск угля и его движение по конвейеру. Блоки задают логику функционирования модели системы и определяют пути движения транзактов по ней. Блоками представлены приборы обслуживания СеСМО, отображающие питатели и участки конвейера. Принцип программной реализации в среде GPSS World модели имеет вид, показанный на рисунке 4.

### Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

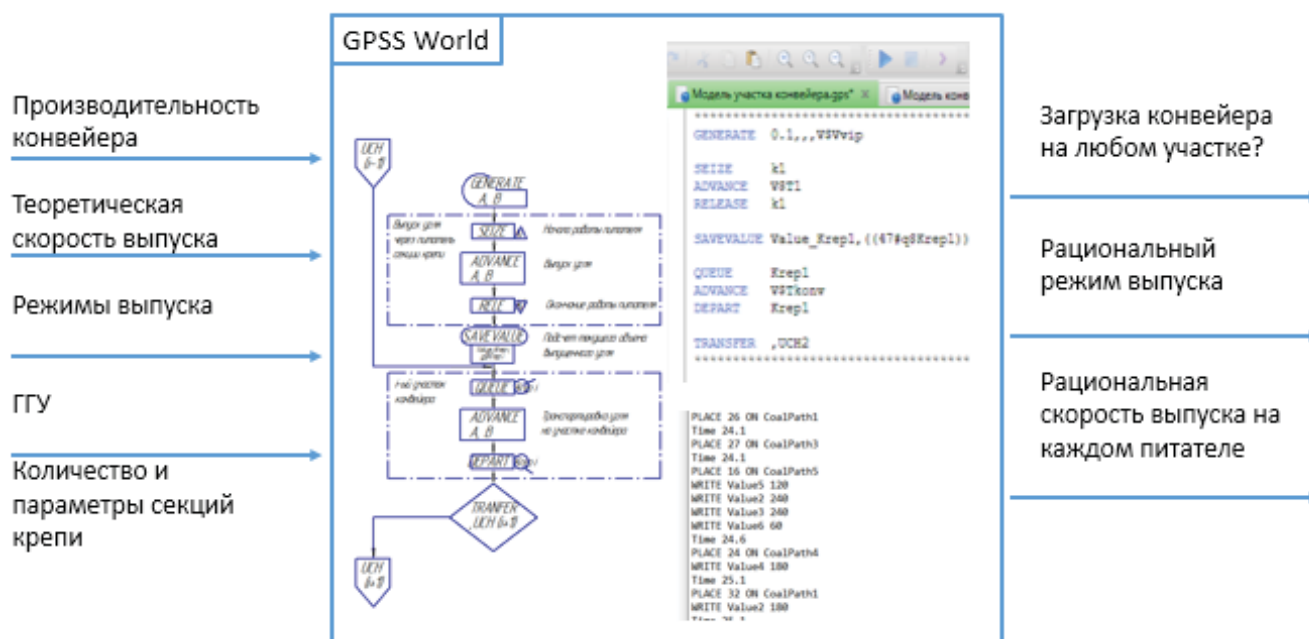


Рис. 4 – Блок-схема модели участка конвейера и её программная реализация

Разработана имитационная модель функционирования роботизированного комплекса для обработки мощных угольных пластов с управляемым выпуском подкровельной толщи, которая позволяет проводить исследования выпуска угля при любых режимах, различных скоростях выпуска из каждого питателя, различной последовательности открывания и количестве одновременно открываемых выпускных окон питателей. В имитационных экспериментах исследовались различные режимы выпуска угля подкровельной толщи. На рисунке 5 представлены зависимости объема угля на участке конвейера. Входные данные модели: ширина секции – 2м, ширина окна питателя – 1 м, массовый расход угля при выпуске - 47 кг/с, масса угля, выпускаемого одной секцией, - 2 193 кг [19], скорость скребкового конвейера - 0,65 м/с, моделируются участки по семь секций. При индивидуальном режиме питатели включаются поочередно на каждой секции сразу после достижения на предыдущем питателе границы порода/уголь. При волновом – питатели включаются последовательно на каждой секции с временной задержкой в 20 секунд. При групповом режиме питатели включаются поочередно в группах из 3 и 4 секций. При площадном – питатели работают одновременно и равной скоростью выпуска на всех секциях. Реальные условия подземных горных работ обусловят нестабильность и стохастичность процесса выпуска угля вследствие непостоянного объема и скорости выпуска угля. Использование разработанных имитационных моделей позволяет оценить рассмотренные выше режимы с учётом неравномерности скорости и объемов выпуска на каждой секции. При исследованиях учитывалось, что объем выпуска не дискретен, а имеет отклонение в 15%.

По результатам моделирования (рисунок 5) установлено, что при индивидуальном режиме выпуска весь объем угля был выпущен за 5 минут 17 секунд. При этом на участке конвейера было 140 кг с аperiodическими провалами и скоплениям различного объема угля на конвейере. При волновом режиме время выпуска составило 2 минуты 40 секунд. На конвейере наблюдалось более стабильное и полное наполнение углем в 423 кг с кратковременным снижением до 280 кг. Групповой и площадной режимы обеспечивают большую скорость выпуска за 1 минуту 35 секунд и 1 минуту соответственно. Однако при этом отсутствует равномерность загрузки и наблюдается значительное наполнение участка конвейера массой угля до 1 т на 2 метрах.

Экспериментами установлено, что волновой режим обеспечивает более стабильное, равномерное и полное заполнение конвейера по сравнению с другими режимами. Данный вывод подтвержден физическими экспериментами на лабораторной установке по исследованию этих же

### Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

режимов выпуска [5,6]. Таким образом, применение волнового режима выпуска является наиболее перспективным при разработке технологии эффективного освоения угольных месторождений роботизированным комплексом с управляемым выпуском подкровельной толщи.

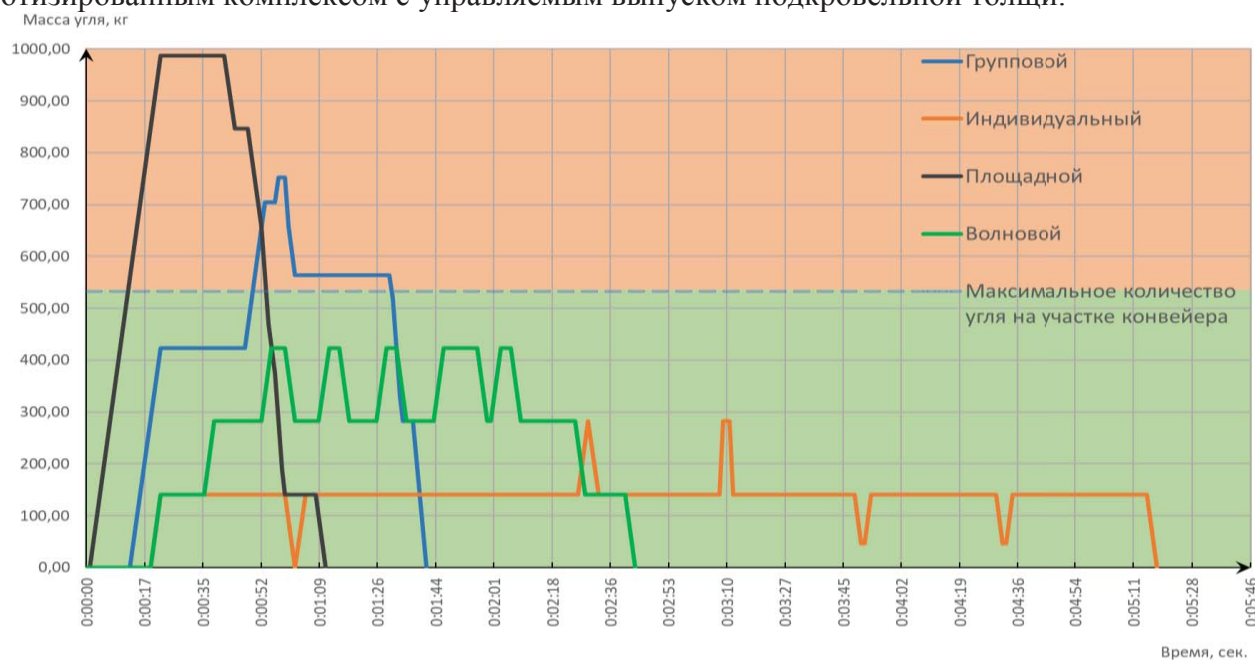


Рис. 5 - Масса угля на участке конвейера при различных режимах с учётом неравномерности выпуска

Для наглядного отображения динамики выпуска угля через секции и его транспортировки конвейером, а также оценки результатов моделирования создана анимация, работающая под управлением имитационной модели. При изменении параметров выпуска происходит пересчет данных и соответствующее изменение анимационного отображения.

В среде компьютерной анимации ProofAnimation отображены соответствующие технологии выпуска, статические и динамические элементы: уголь подкровельной толщи, секции крепи, конвейер (рисунок 6). Кроме этого для отображения текущих параметров создана таблица, в которую выводятся текущие данные для каждого участка: расход угля при выпуске и суммарная масса угля на конвейере с учётом предшествующих участков. Величина текущего массового расхода угля выводится на анимации в соответствии с заданными входными данными имитационной модели. При запуске анимации, в зависимости от выбранного режима выпуска уголь из подкровельной толщи поступает через питатель работающей (или работающих) секции крепи на конвейер. При этом в столбце «Текущее количество угля на участке конвейера» отображается, число, соответствующее общей массе угля на указанном участке (с учётом всех вышележащих) в данный момент времени. Информация об общей массе угля, поступающего из комплекса, выводится в одноименном сообщении внизу. При изменении параметров системы и/или режимов выпуска данные, выводимые на анимации, корректируются имитационной моделью.

### Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования



Рис. 6 – Элементы анимации роботизированного комплекса для обработки мощных угольных пластов с управляемым выпуском подкровельной толщи

С использованием модели определены рациональные режимы управления выпуском и крепями, скорость выпуска на каждой секции, последовательность запуска питателей для условий пласта 21 шахты «Ольжерасская-Новая» Ольжерасского месторождения Кузбасса, который может быть разработан по технологии с выпуском угля подкровельной толщи. Параметры питателя определены на основании численного моделирования режимов движения гранулированных материалов [19]: массовый расход угля - 60 кг/с при общей массе выпущенного угля - 2 160 кг.

В качестве скребкового конвейера выбран «Анжера-30» (производства ОАО «Анжеромаш») производительностью 1000 т/ч, скорость движения тягового органа 1,0 м/с.

Масса угля на 1 м длины конвейера ( $q_{\Gamma}$ ) рассчитана из часовой теоретической производительности конвейера при равномерной загрузке угля и постоянной скорости движения тяговой цепи конвейера, м/с. ( $V_{\Gamma}$ ) по методике Спиваковского А.О. и Дьячкова В.К [20]:

$$Q_{\Gamma} = \frac{3600 * q_{\Gamma} * V_{\Gamma}}{1000} = 3,6 * q_{\Gamma} * V_{\Gamma}, \text{ т/ч} \quad (2)$$

и не должна превышать 266 кг/м.

Для указанных входных данных определены скорость выпуска угля и схема запуска питателей, при которых наблюдается наиболее эффективная работа комплекса.

Экспериментами установлено, что при указанных параметрах для максимальной загрузки конвейера при волновом выпуске необходимо обеспечить следующий массовый расход угля (таблица 1): 1,2 и 3 секция – 60 кг/с, 4 секция – 40, 5 – 30, 6 – 24 и 7 – 20 кг/с. После того, как на первых трех секциях будет достигнута граница порода-уголь, выпуск на них нужно прекратить и запустить 8, 9 и 10, при этом обеспечить изменение скорости выпуска в соответствии с установленным распределением скоростей по секциям. Начиная с третьего этапа такое смещение нужно проводить на одну секцию.

### Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

Таблица 1. Скорость выпуска угля и схема запуска питателей для условий шахты «Ольжерасская-Новая»

		Массовый расход угля на секции, кг/с														
Секция	Этап	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	...
1		60	60	60	40	30	24	20								
2					60	60	60	40	30	24	20					
3						60	60	60	40	30	24	20				
4							60	60	60	40	30	24	20			
5								60	60	60	40	30	24	20		
6									60	60	60	40	30	24	20	
...																...

Разработанная имитационная модель позволяет определять режимы автоматического управления выпуском угля подкровельной толщи, скорость выпуска на каждой секции крепи, последовательность и рациональное количество работающих питателей для обеспечения равномерного выпуска и максимальной загрузки конвейера.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы»; проект «Разработка технологии эффективного освоения угольных месторождений комплексом с роботизированным управляемым выпуском подкровельной толщи» (Соглашение №14.604.21.0173, Уникальный идентификатор Соглашения RFMEFI60417X0173).

#### Литература

- Alireza Jabinpoura, Alireza Yarahmadi Bafghib, Javad Gholamnejad Application of Vibration in Longwall Top Coal Caving Method // International Academic Journal of Science and Engineering. 2016, Vol. 3., No. 2. P. 102 – 109.
- Underground mining of thick coal seams / R. Kumar, A.K. Singh, A.K. Mishra and R. Singh // International Journal of Mining Science and Technology. 2015. Vol. 25. Issue 6. P. 885 – 896.
- Hebblewhite B.K. Status and Prospects of Underground Thick Coal Seam Mining Methods. The 19th International Mining Congress and Fair of Turkey, IMCET2005, Izmir, Turkey, June 09–12, 2005.
- Hanging Wall Pressure Relief Mechanism of Horizontal Section Top-Coal Caving Face and Its Application / J. Guo, L. Ma, Ye Wang, F. Wang // A Case Study of the Urumqi Coalfield, China. Energies. 2017. 10 (9). P. 1371.
- Клишин В.И., Варфоломеев Е.Л., Борисов И.Л., Клишин С.В. Исследование выпуска угля на макетных образцах секции механизированной крепи при различных режимах управления // Научный журнал «Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук» гл. ред. ак. Курленя М.В. / ИГД им. Н.А. Чинакала СО РАН. - Новосибирск, - 2018. - Том 5 -№ 1. -С. 66-71.
- Клишин В.И., Опрук Г.Ю., Варфоломеев Е.Л., Борисов И.Л. Взаимодействие механизированных крепей с межслоевой толщей в системах с выпуском угля // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – №. – №.S48. – С. 87-94
- Клишин В.И. Роль и место Института угля Федерального центра угля и углехимии СО РАН в научном обеспечении Кузбасса / В.И. Клишин // Горная промышленность. – 2018. №4 (140). С. 80-87.

### **Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования**

---

8. Кельтон В. Имитационное моделирование. Классика CS. : книга / Кельтон, В., Лоу, А. – 3-е изд. – СПб. : Питер; Киев : Издательская группа BHV, 2004. – 847 с.
9. Конюх, В.Л. Дискретно-событийное моделирование подземных горных работ / В.Л. Конюх, В.В. Зиновьев. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. – 243 с.
10. Зиновьев В.В., Гречишкин П.В. Практическое применение программных средств имитационного моделирования // Сб. докладов III Всероссийск. научн.-практич. конф. Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2007). Санкт-Петербург, 2007. С. 78-82.
11. Гречишкин П.В. Имитационное моделирование технологических схем очистных работ// Сборник докладов первой Всероссийской научно-практической конференции «Опыт практического применения языков и программных систем имитационного моделирования в промышленности и прикладных разработках» (23-24 октября 2003, С.-Петербург). С.-Петербург, 2003. С. 38-43.
12. W. Aalst, C. Stahl, Modeling Business Processes: A Petri Net-Oriented Approach, MA, Cambridge: MIT Press, 2011.
13. Методология и технология имитационных исследований сложных систем: современное состояние и перспективы развития: Монография/ В.В. Девятков - М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2013. - 448 с.: 60x90 1/16. - (Научная книга).
14. Павлова Л.Д. Моделирование геомеханических процессов в разрушаемом углепородном массиве: монография / Л.Д. Павлова; Сиб. гос. ун-т. Новокузнецк: СибГИУ, 2005. - 239 с.
15. Фрянов В.Н. Теоретические подходы к проектированию роботизированных угольных шахт на основе современных технологий моделирования / В.Н. Фрянов, Л.Д. Павлова, М.В. Темлянец // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал. Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2017. - № 3. С. 15-21.
16. Оганесян А.С. Алгоритм модульного синтеза технологических схем угольных / А.С. Оганесян, В.В. Агафонов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: «Горная книга», 2013. - №12. С. 18-27.
17. Vasily V. Sinoviev, Aleksey N. Starodubov, Mihail U. Dorofeev, Victor V. Okolnishnikov. Simulation Application for Evaluating of Efficiency of Mining Systems Automatization // WSEAS Transactions on Systems, ISSN / E-ISSN: 1109-2777 / 2224-2678, Volume 14, 2015, Art. #24, pp. 261-267.
18. Стародубов А.Н., Система имитационного моделирования горнопроходческих работ / А.Н. Стародубов, В.В. Зиновьев, М.В. Береснев, А.Е. Майоров // Ежемесячный научно-технический и производственно-экономический журнал «Уголь», 2-2016. – С. 20-24.
19. Клишин В.И., Клишин С.В. Состояние и направление развития технологии разработки мощных угольных пластов механизированными крепями с выпуском Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2019. Вып. 1 С. 162-174.
20. Спиваковский А.О., Дьячков В.К. Транспортные машины : Учеб. пособие для машиностроительных вузов. – 3-е изд., перераб. – М.: Машиностроение. 1983. – 487 с., ил.