

DOI: 10.26730/1999-4125-2017-6-69-75

УДК 519.876.5

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ УГЛЕЭНЕРГОХИМИЧЕСКОГО КЛАСТЕРА

SIMULATION MODEL OF COAL-ENERGY-CHEMICAL CLUSTER

Стародубов Алексей Николаевич^{1,2},

к.т.н., с.н.с., e-mail: a.n.starodubov@gmail.com

Starodubov Aleksey N.^{1,2}, Ph.D., C. Sc., Senior research fellow

Зиновьев Василий Валентинович^{1,2},

к.т.н., с.н.с., доцент, e-mail: zvv@coal.sbras.ru

Zinoviev Vasiliy V.^{1,2}, Ph.D., C. Sc., Senior research fellow, Associate professor

Патраков Юрий Фёдорович¹,

доктор хим. наук, гл. научн. сотр., e-mail: yupat@icc.kemsc.ru

Patrakov Yuri F.¹, doctor of chemical sciences, senior research fellow

¹ Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, 650000, Россия, г. Кемерово, пр. Советский, 18.

¹ Institute of Coal of The Federal Research Centre of Coal and Chemistry Siberian Branch of the Russian Academy of Science; Russia, 650065, Kemeovo, Leningradskij, 10

² Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

² T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

Аннотация. В рамках проекта по обоснованию концепции комплексного освоения месторождений высокозольных твердых горючих ископаемых на принципах кластерного подхода разработаны имитационные модели технологий разработки полезных ископаемых открытым и подземным способом, технологии переработки угля с получением полуокси и сопутствующих продуктов, технологий дальнейшей переработки продуктов, а также транспортных и логистических элементов кластера. Модели позволяют выявлять и устранять «узкие места» в технологическом процессе, находить пути повышения степени использования оборудования путем согласования технологических операций во времени и пространстве, что позволяет определять требуемые для выполнения производственных задач характеристики элементов кластера. Проведены исследования и представлены результаты имитационных экспериментов по обоснованию эффективной и экономически целесообразной структуры и параметров как угле-энергохимического кластера в целом, так и его подсистем.

Abstract: Simulation models of open-cut and underground mine mineral resources mining technologies, semi-coke and co-products producing technology, the next stage products recycling and transport and logistics cluster parts have been developed in project of conception of overall high-ash mineral resources mining by cluster approach principles. The models allow us to detect and remove bottlenecks in the technological process, to find ways of increasing the level of equipment use by matching technological processes in time and space. This gives opportunity to define cluster elements specifications, which are necessary for execution of production tasks. Experiments have been carried on models. The results give opportunity to define effective and economically feasible structure and parameters of coal-energy-chemical cluster and its parts.

Ключевые слова: угле-энергохимический кластер, имитационное моделирование, разработка моделей.

Keywords: coal-energy-chemical cluster, simulation, development of models.

В работе [1] в рамках проекта по обоснованию концепции комплексного освоения месторождений высокозольных твердых горючих ископаемых на принципах кластерного подхода разработана концептуальная модель углеэнергохимического кластера.

Кластер представляет собой объединенный на одной территории, приближенной к месту добычи полезных ископаемых, комплекс взаимосвязанных по исходному сырью и технологически дополняющих друг друга производств, позволяющих максимально использовать энергетический и химиче-

ский потенциал добываемого твердого топлива, обеспечить энергонезависимость производственного комплекса и полную утилизацию техногенных отходов, минимизировать транспортные издержки, обеспечить сохранность водных и земельных ресурсов территории. Такой комплекс представляет собой сложную закрытую систему, состоящую из нескольких сотен взаимоувязанных технологических элементов: технологическое оборудование открытой и подземной добычи полезных ископаемых (экскаваторы, перегружатели, комбайны, транспортное оборудование), оборудование завода полукоксования (газификаторы, конвейеры, погрузочно-разгрузочное оборудование), оборудование углесжигающего предприятия (котлы, конвейеры), высокоградиентные магнитные сепараторы. Все элементы кластера объединены друг с другом транспортной составляющей, включающей в себя железнодорожный и автотранспорт различного назначения. Для исследования сложных систем, в том числе и в горном деле, целесообразно применение экономико-математического моделирования [2-11].

При создании концептуальной модели такой системы применен математический аппарат теории массового обслуживания: углеэнергохимический кластер представлен в виде сети систем массового обслуживания (СМО), в структуру которой входят одно- и многофазные одноканальные и/или многоканальные СМО без отказов с простейшей дисциплиной обслуживания FIFO и ограниченным входным потоком требований.

В данной работе проводится программная реализация разработанной концептуальной модели, позволяющая создать имитационную модель углеэнергохимического кластера с целью выявления и устранения «узких мест» в технологическом процессе, нахождения путей повышения степени использования оборудования путем согласования технологических операций во времени и пространстве, что в конечном итоге позволит определить требуемые для выполнения производственных задач характеристики элементов кластера.

Как показано, углеэнергохимический кластер представляет собой сложную стохастическую систему, большинство операций в которой являются дискретными с конечным числом значений переменных. Это операции: начало и окончание буро-взрывных или вскрышных работ, работа комбайна или экскаватора, начало и окончание дробления угля, погрузка и разгрузка сырья, движение транспорта между пунктами погрузки и разгрузки, начало и окончание работы газификаторов и другие. Стохастичность обусловлена неравномерностью поставок угля (из-за скопления вагонов на промежуточных станциях, ухудшения качества сырья из-за многочисленных перевалок, множества видов перерабатываемого сырья), наличием

вспомогательных операций (загрузка, выгрузка, очистка газификаторов, пуск, останов и др.) и возникающими авариями, сбоями и простоями оборудования.

В качестве средства программной реализации разработанных моделей горнотехнических систем наиболее подходит современная версия языка имитационного моделирования GPSS World. Язык GPSS является одним из самых эффективных и распространенных программных средств моделирования сложных дискретных систем и успешно используется для моделирования процессов различных отраслей промышленности, в т.ч. и горных работ, формализуемых в виде систем массового обслуживания [12-15].

В соответствии с указанной концептуальной моделью кластера при разработке его имитационной модели созданы модели его подсистем: технологии разработки полезных ископаемых открытым и подземным способом, технологии переработки угля с получением полукокса и сопутствующих продуктов, технологий дальнейшей переработки продуктов, модели транспортных и логистических элементов кластера. В свою очередь технологические операции в подсистемах декомпозированы в отдельные модули.

Так модель роботизированной технологии проведения выработки буро-взрывным способом включает в себя модули, имитирующие технологические операции бурения, заряжания, погрузки, крепления и другие (рис. 1).

Модель завода полукоксования, рассчитанного на получение 860 тыс. т. полукокса при применении технологии газификации и состоящего из более 180 элементов (газификаторы, дробильные установки, система конвейеров, перегружателей, складов и др.), включает в себя 10 взаимоувязанных модулей. Транзактами отображены дискретные объемы угля и заявки на загрузку газификаторов, блоками – технологическое оборудование (машины углезагрузочные – МУЗ, газификаторы, дробилки), обрабатывающими эти заявки. Для отображения работы ЭТК были созданы иерархические модули «Газификации», «МУЗ», «Угольная башня» и другие. Модуль «МУЗ» имитируют работу углезагрузочных машин по транспортировке угля и загрузке газификаторов. Модули «Газификации» включают в себя «МУЗ» и модули, имитирующие работу 82 газификаторов.

Аналогично разработаны модели всех элементов углеэнергохимического кластера. Таким образом имитационная модель углеэнергохимического кластера представляет собой разветвленную иерархическую модель, включающую в себя модели технологий разработки полезных ископаемых открытым и подземным способом, технологии переработки угля с получением полукокса и сопутствующих продуктов, технологий дальнейшей переработки продуктов, модели

```
*****
* Модуль "Бурение"
*****
ADVANCE (Dlina/vbu); Подгон бурильных установок
SEIZE BUR; Включение бурильных установок
ADVANCE ((nshp/nbu)#{lshp/Peksb+tper)); Разметка и бурение
RELEASE BUR; Выключение бурильных установок
ADVANCE (Dlina/vbu); Отгон бурильных установок

*****
* Модуль "Заряжание"
*****
LOGIC R OSA; Зарядчик подогнан
ADVANCE (Dlina/vsu); Подгон зарядчика
LOGIC R VSA; Шпуры не заряжены
SEIZE KU; Включение зарядчика
ADVANCE (nshp#tssh); Заряжание шпуротов
RELEASE KU; Выключение зарядчика
LOGIC S VSA; Шпуры заряжены
ADVANCE (Dlina/vsu); Отгон комплекса
LOGIC S OSA ; Комплекс отогнан
*****
* Модуль "Погрузка вар.1"
*****
ADVANCE (Dlina/vpm) ; Подгон комплекса
SEIZE PM; Включение погрузочной машины
ADVANCE ((Spr#lshp#kis#kr)/(Peks#npm)); Погрузка
RELEASE PM; Выключение погрузочной машины
ADVANCE (Dlina/vpm) ; Отгон комплекса
*****
* Модуль "Крепление вар.2"
*****
SEIZE AU; Включение анкероустановщика
ADVANCE (las/Peks+nank#tank); Крепление
RELEASE AU; Выключение анкероустановщика
ADVANCE tz; Установка затяжки

*****
* Модуль "Окончание цикла и окончание работы"
*****
wrem VARIABLE C1
LOGIC S OKO ; Проходческий цикл закончен
LOOP kol,CICLE; Если все циклы сделаны, то закончить проходческие работы
TERMINATE 1
```

Рис. 1. Фрагмент модели роботизированной технологии проведения выработки буровзрывным способом

транспортных и логистических элементов кластера. Взаимодействие оборудования во времени и пространстве отображается перемещением транзактов (дискретных объемов угля), через блоки (оборудование кластера) со случайными временными задержками, соответствующими времени выполнения технологических операций.

Проверка адекватности имитационной модели угле-энергохимического кластера ввиду отсутствия полных аналогов проводилась с использованием ряда широко используемых методов [16]:

- построение логической блок-схемы и интер-

активный контроль за ходом моделирования при помощи режима отладки;

- аналитический подсчет характеристик и сравнение их с модельными результатами.

Например, модель доставки угля и загрузки газификатора углезагрузочной машиной на заводе полукоксования (модули «МУЗ» и «Газификатор») согласно второму методу сведена к СМО вида $2^*M/M/1$. В таблице представлено сравнение результатов имитационных экспериментов и аналитических расчетов.

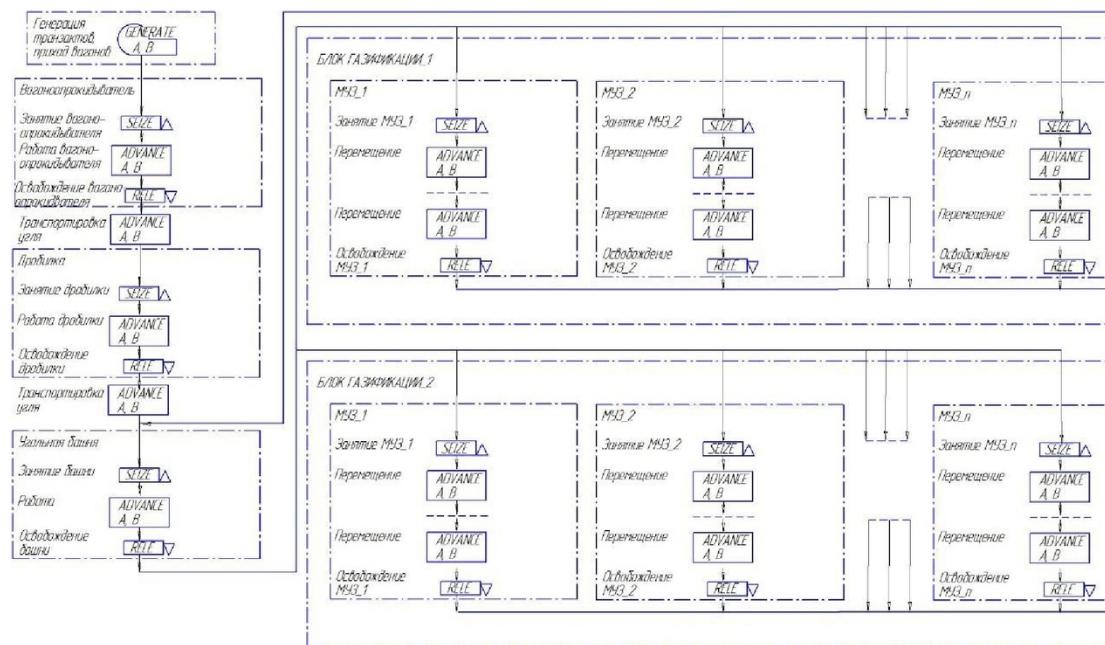


Рис. 2. Блок-схема модели завода полукоксования

Таблица. Сравнение результатов имитационных экспериментов и аналитических расчетов для модели (СМО - 2*M/M/1)

Наименование характеристики	Первая СМО		Вторая СМО	
	Аналитические расчеты	Результаты имитационных экспериментов	Аналитические расчеты	Результаты имитационных экспериментов
Коэффициент загрузки	0,833	0,832	0,820	0,818
Вероятность, что система свободна	0,167	0,168	0,180	0,172
Ср. число требований в системе, шт.	5,000	4,996	4,556	4,551
Ср. число требований в очереди, шт.	4,167	4,110	3,736	3,730
Ср. время пребывания требования в системе, ч.	30,000	29,90	22,77	22,801
		Отклонение, %		Отклонение, %
		0,16	0,24	
		0,79	1,10	
		0,08	0,10	
		1,38	0,15	
		0,33	0,10	

Максимальное отклонение результатов имитационных экспериментов от аналитических расчетов составило не более 1,5 %. Аналогичным образом проверены имитационные модели остальных подсистем угле-энергохимического кластера, отклонение составило не более 7 %.

На имитационных моделях комплекса проведен ряд экспериментов по определению основных показателей технологий: скорость проведения выработки, трудоемкость работ, степень загруженности оборудования, производительность подсистем и кластера в целом.

Так проведены исследования по определению установленвшегося режима работы завода полукок-

сования, последовательности загрузки МУЗ и газификаторов. На рис. 4 показана динамика заполнения угольной башни при разных условиях запуска. При запуске завода полукоксования с пустыми газификаторами и МУЗ (нулевой запуск) время выхода на установившийся режим составило 4000 часов, что связано с первоначальной перегрузкой транспортно-складской системы и неравномерностью распределения заявок от газификаторов по времени (рис. 3 а). Если запускать в работу завода уже с заполненными МУЗ и газификаторами, система перейдет в установившийся режим за 10 дней (рис. 4 б).

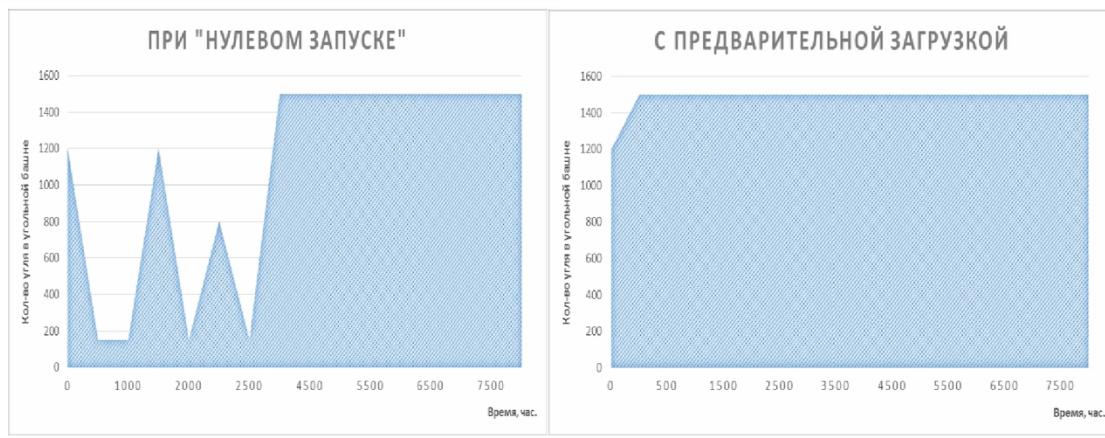


Рис. 3. Динамика изменения объема угля в угольной башне

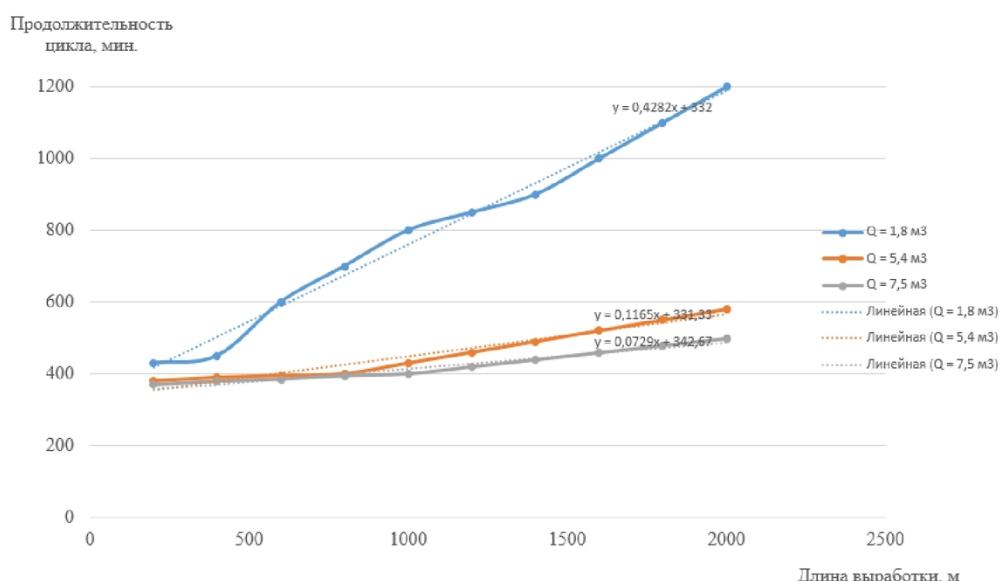


Рис. 4. Рависимости продолжительности цикла от длины выработки

Проведены имитационные эксперименты по обоснованию эффективной структуры и параметров горнотехнических систем. Производители погрузочно-транспортных машин предлагают несколько типоразмеров своей продукции с различными объемами ковша (от 1 до 7,5 м³). Для выбора машины определена зависимость продолжительности проходческого цикла от вместимости погрузочно-транспортной машины. На рис. 4 представлен график зависимости продолжительности цикла от длины выработки при различной вместимости ковша погрузочно-транспортной машины.

В технологии проведения выработки индивидуальными машинами средняя продолжительность цикла линейно возрастает с увеличением длины выработки с 200 до 1800 м. Уменьшение вместимости ковша погрузочно-транспортной машины с 7,5 до 1,8 м³ увеличивает продолжительность проходческого цикла на 24-56% в зависимости от длины проводимой выработки.

Полученные имитационные модели техноло-

гий разработки полезных ископаемых открытым и подземным способом, технологии переработки угля с получением полукокса и сопутствующих продуктов, технологий дальнейшей переработки продуктов, а также транспортных и логистических элементов кластера позволяют выявлять и устранять «узкие места» в технологическом процессе, находить пути повышения степени использования оборудования путем согласования технологических операций во времени и пространстве, что позволяет определять требуемые для выполнения производственных задач характеристики элементов кластера. Проведены исследования и представлены результаты имитационных экспериментов по обоснованию эффективной и экономически целесообразной структуры и параметров как углеэнергохимического кластера в целом, так и его подсистем.

Работа выполнена при частичном финансировании РФФИ проект № 16-45-420524 «Научное обоснование концепции комплексного освоения месторождений высокозольных твердых горючих

ископаемых на принципах кластерного подхода углей и горючих сланцев Кузбасса»)
(на примере месторождений сапропелитовых

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стародубов А.Н. Концептуальная модель угле-энергохимического кластера / А.Н. Стародубов, В.В. Зиновьев, Ю.В. Патраков // Вестник КузГТУ. - 2016. - №5. - С. 108-113.
2. Лоу А.М., Кельтон А.Д. Имитационное моделирование. СПб., 2004.
3. Клишин В.И. Перспективные направления развития подземных горных работ / В.И. Клишин // Перспективы инновационного развития угольных регионов россии. Сборник трудов V Международной научно-практической конференции. Ответственные редакторы Пудов Е. Ю., Клаус О. А. – Прокопьевск. - 2016. – С. 6-13.
4. Федорин В.А. Метод оптимизации доступа к участку угольного месторождения / Федорин В.А., Татаринова О.А. // Наукомкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2016. № 3. С. 182-185.
5. Татаринова О.А. Транспортная логистика наземных грузоперевозок при освоении угольных месторождений / О.А. Татаринова // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2014. № 6 (106). С. 141-144.
6. Стародубов, А.Н. Обобщенная структура модели энерготехнологического комплекса в виде систем массового обслуживания: Отдельный выпуск горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала) Mining Informational And Analytical Bulletin (Scientific And Technical Journal). – М.: Изд-во «Горная книга». – 2013. – №OB6. – 532 с. – С. 145-151.
7. Баганина А.Е. Математическое моделирование взаимодействия газового взрыва с бетонной стенкой / А.Е. Баганина, И.М. Васенин // Известия высших учебных заведений. Физика. 2007. Т. 50. № 9-2. С. 229-232.
8. Павлова Л.Д. Моделирование геомеханических процессов в разрушающем углепородном массиве: монография / Л.Д. Павлова; Сиб. гос. ун-т. Новокузнецк: СибГИУ, 2005. - 239 с.
9. Фрянов В.Н. Теоретические подходы к проектированию роботизированных угольных шахт на основе современных технологий моделирования / В.Н. Фрянов, Л.Д. Павлова, М.В. Темлянцев // Наукомкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал. Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2017. - № 3. С. 15-21.
10. 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.
11. 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).
12. Зиновьев, В.В. Имитационный подход при моделировании энерготехнологического комплекса по переработке угля / В.В. Зиновьев, А.Н. Стародубов, А.Е. Майоров, В.Н. Кочетков // Ежемесячный производственно-массовый журнал «Энергетик». – 2013. – №1. – С. 26-29.
13. Vasiliy 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: 1109-2777 / 2224-2678, Volume 14, 2015, Art. #24, pp. 261-267.
14. 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.
15. Зиновьев, В.В. Моделирование многозабойной проходки с использованием имитационного подхода // Институт угля Сибирского отделения РАН: Отдельный выпуск горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала) Mining Informational And Analytical Bulletin (Scientific And Technical Journal). – М.: Изд-во «Горная книга». – 2013. – №OB6. – 532 с. – С. 138-144.
16. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: Учеб. для вузов - 3-е юд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 2001. - 343 с: ил..

REFERENCES

1. Starodubov A.N. Konceptual'naya model' ugle-ehnergohimicheskogo klastera / A.N. Starodubov, V.V. Zinov'ev, YU.V. Patrakov // Vestnik KuzGTU. - 2016. - №5. - C. 108-113.
2. Lou A.M., Kel'ton A.D. Imitacionnoe modelirovanie. SPb., 2004.

3. Klishin V.I. Perspektivnye napravleniya razvitiya podzemnyh gornyh rabot / V.I. Klishin // Perspektivy innovacionnogo razvitiya ugol'nyh regionov rossii. Sbornik trudov V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Otvetstvennye redaktory Pudov E. YU., Klaus O. A. – Prokop'evsk. - 2016. – S. 6-13.
4. Fedorin V.A. Metod optimizacii dostupa k uchastku ugol'nogo mestorozhdeniya / Fedorin V.A., Tatarinova O.A. // Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nyh resursov. 2016. № 3. S. 182-185.
5. Tatarinova O.A. Transportnaya logistika nazemnyh gruzoperevozok pri osvoenii ugol'nyh mestorozhdenij / O.A. Tatarinova // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2014. № 6 (106). S. 141-144.
6. Starodubov, A.N. Obobshchennaya struktura modeli ehnergotekhnologicheskogo kompleksa v vide sistemy massovogo obsluzhivaniya: Otdel'nyj vypusk gornogo informacionno-analiticheskogo byulletenya (nauchno-teknicheskogo zhurnala) Mining Informational And Analytical Bulletin (Scientific And Technical Journal). – M.: Izd-vo «Gornaya kniga». – 2013. – №OV6. – 532 s. – S. 145-151.
7. Baganina A.E. Matematicheskoe modelirovanie vzaimodejstviya gazovogo vzryva s betonnoj stenkoj / A.E. Baganina, I.M. Vasenin // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika. 2007. T. 50. № 9-2. S. 229-232.
8. Pavlova L.D. Modelirovanie geomehanicheskikh processov v razrushaemom ugleporodnom massive: monografija / L.D. Pavlova; Sib. gos. un-t. Novokuzneck: Sib-GIU, 2005. - 239 s.
9. Fryanov V.N. Teoreticheskie podhody k proektirovaniyu robotizirovannyh ugol'nyh shaht na osnove sovremennyh tekhnologij modelirovaniya / V.N. Fryanov, L.D. Pavlova, M.V. Temlyancev // Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nyh resursov: nauch. zhurnal. Sib. gos. industr. un-t; pod obshchej red. V.N. Fryanova. – Novokuzneck, 2017. - № 3. S. 15-21.
10. Oganesyan A.S. Algoritm modul'nogo sinteza tekhnologicheskikh skhem ugol'nyh / A.S. Oganesyan, V.V. Agafonov // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-teknicheskij zhurnal). – M.: «Gornaya kniga», 2013. - №12. S. 18-27.
11. Metodologiya i tekhnologiya imitacionnyh issledovanij slozhnyh sistem: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya: Monografiya/ V.V. Devyatkov - M.: Vuzovskij uchebnik: INFRA-M, 2013. - 448 s.: 60x90 1/16. - (Nauchnaya kniga).
12. Zinov'ev, V.V. Imitacionnyj podhod pri modelirovaniyu ehnergotekhnologicheskogo kompleksa po perekrojke uglya / V.V. Zinov'ev, A.N. Starodubov, A.E. Majorov, V.N. Kochetkov // Ezhemesyachnyj proizvodstvenno-massovyj zhurnal «EHnergetik». – 2013. – №1. – S. 26-29.
13. Vasiliy 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.
14. Starodubov A.N., Sistema imitacionnogo modelirovaniya gornoprohodcheskikh rabot / A.N. Starodubov, V.V. Zinov'ev, M.V. Beresnev, A.E. Majorov // Ezhemesyachnyj nauchno-teknicheskij i proizvodstvenno-ekonomiceskij zhurnal «Ugol'», 2-2016. – S. 20-24.
15. Zinov'ev, V.V. Modelirovaniye mnogozabojnoj prohodki s ispol'zovaniem imitacionnogo podhoda // Institut uglya Sibirskogo otdeleniya RAN: Otdel'nyj vypusk gornogo informacionno-analiticheskogo byulletenya (nauchno-teknicheskogo zhurnala) Mining Informational And Analytical Bulletin (Scientific And Technical Journal). – M.: Izd-vo «Gornaya kniga». – 2013. – №OV6. – 532 s. – S. 138-144.
16. Sovetov B.YA., YAKOVLEV S.A. Modelirovanie sistem: Ucheb. dlya vuzov - 3-e yud., pererab. i dop. - M.: Vyssh. shk., 2001. - 343 s: il..

Поступило в редакцию 15.11.2017
Received 15.11.2017