

**ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ****УДК 519.876.5****КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ УГЛЕ-ЭНЕРГОХИМИЧЕСКОГО КЛАСТЕРА**

**CONCEPTUAL MODEL OF CARBON ENERGY AND CHEMICAL CLUSTER**

**Стародубов Алексей Николаевич<sup>1,2</sup>,**  
 к.т.н., с.н.с., доцент, e-mail: [a.n.starodubov@gmail.com](mailto:a.n.starodubov@gmail.com)

**Starodubov Aleksey N.** <sup>1,2</sup>, C. Sc.in Engineering., senior researcher, Associate Professor

**Зиновьев Василий Валентинович<sup>1,2</sup>,**  
 к.т.н., с.н.с., доцент, e-mail: [zvv@coal.sbras.ru](mailto:zvv@coal.sbras.ru)

**Zinoviev Vasily V.** <sup>1,2</sup>, C. Sc.in Engineering, senior researcher, Associate Professor

**Патраков Юрий Фёдорович<sup>1</sup>,**  
 д.х.н., зав. лабораторией, e-mail: [yupat@icc.kemsc.ru](mailto:yupat@icc.kemsc.ru)

**Patrakov Yuri F.** <sup>1</sup>, D. Sc.in Chemistry. Professor, Head laboratory

<sup>1</sup> Федеральный Исследовательский Центр угля и углехимии СО РАН, Ленинградский пр. 10, Кемерово, 650065, Россия

<sup>1</sup> Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of SB RAS, 10 Leningradsky Prospect, Kemerovo, 650065, Russian Federation

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

<sup>2</sup> T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Institute of chemical and petroleum technology, Department of technology of organic substances and petrochemistry. 28 street Vesennyyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation.

**Аннотация.** Комплексное освоение месторождений высокозольных твердых горючих ископаемых на принципах кластерного подхода позволяет исключить дорогостоящие энергетические и транспортные составляющие при их добыче и переработке. Кластерный подход подразумевает сосредоточение на закрытой территории объектов добычи и переработки, что обуславливает необходимость согласования нескольких сотен единиц технологического оборудования во времени и пространстве. Разработанная концептуальная модель угле-энерготехнологического кластера на основе теории массового обслуживания, при ее программной реализации, позволит определить требуемые для выполнения производственных задач характеристики элементов такого кластера.

**Abstract:** Complex development of phyroshales fields, which is based on the principles of the cluster approach. It allows exclude expensive energetic and transportation sides of mining and processing. Cluster approach involves objects of mining and processing in one area that's why it is necessary to coordinate hundreds of pieces of technological equipment in time and space. Developed concept model of coal-energy-chemical cluster, which is based on queuing theory with program applying allows to define characteristics of cluster pieces which are necessary for execution of industrial tasks.

**Ключевые слова:** угле-энергохимический кластер, теория массового обслуживания, моделирование.

**Keywords:** coal-energy-chemical cluster, queuing theory, simulation.

Барзасский геолого-экономический район обладает значительными запасами разнообразного органического и минерального сырья, имеющего ценные химико-технологические качества. Однако его добыча и переработка энерго- и ресурсозатратны и сопряжены с высокими транспортными затратами. Данные проблемы могут быть частично преодолены при использовании кластерного принципа комплексного освоения месторожде-

ний<sup>1</sup>.

Для создания кластера предполагается объ-

<sup>1</sup> Работа выполнена при частичном финансировании РФФИ проект № 16-45-420524 «Научное обоснование концепции комплексного освоения месторождений высокозольных твердых горючих ископаемых на принципах кластерного подхода (на примере месторождений сапропелитовых углей и горючих сланцев Кузбасса)»

единить 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 химический 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, согласно схемы в работе [1], будет представлять 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 авто-

транспорт различного назначения.

При создании такой системы целесообразно применение имитационного и экономико-математического моделирования для 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 [2,3,4].

Большинство операций в угле-энергохимическом кластере являются дискретными с конечным числом значений переменных. К таким операциям относятся: начало и окончание буровзрывных 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. Функционирование такой системы можно представить как последовательную смену состояний в дискретные моменты времени. Для реальной системы характерны неравномерность и стоха-

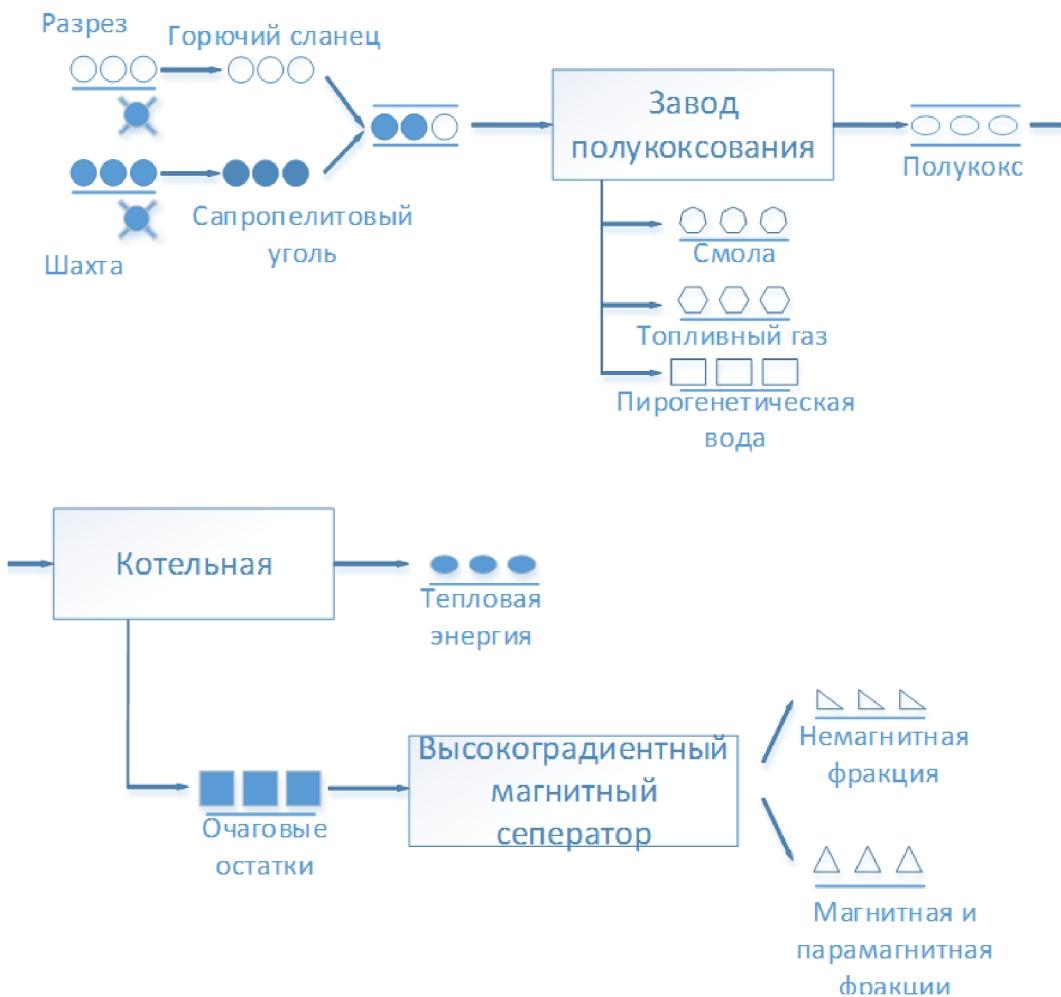


Рис. 1. Концептуальная модель угле-энергохимического кластера

стичность поставок угля (из-за скопления вагонов на промежуточных станциях, ухудшения качества сырья из-за многочисленных перевалок, множества видов перерабатываемого сырья), наличие вспомогательных операций (загрузка, выгрузка, очистка газификаторов, пуск, останов и др.) и возникающих аварий, сбоев и простоев оборудования. Все это обуславливает необходимость рассматривать углехимический кластер как сложную дискретно-стохастическую систему.

Одним из мощнейших математических аппаратов для описания дискретно-стохастических процессов является теория массового обслуживания. Модель кластера можно представить сетью одно- и многоканальных систем массового обслуживания (СМО) без отказов с дисциплиной обслуживания FIFO требований различными приборами (рис. 1).

Концептуальная модель рассматривает кластер в целом, определение характеристик системы требует декомпозиции приборов обслуживания и источников требований. Так, например, источник «Шахта» в свою очередь так же представляет собой сеть одно- и многоканальных систем массового обслуживания, структура и вид которых зависит от применяемых технологий проходки и добычи. Для технологии проведения выработки буровзрывным способом разработаны модели в виде замкнутых многоканальных многофазных СМО, где заявками являются моменты готовности оборудования к следующему циклу [5,6]. Обслуживание заявок заключается в их задержке на время

выполнения процессов проходческого цикла в приборах, имитирующих соответствующее оборудование. Продолжительность процессов технологического цикла отображается вводом случайных временных задержек в приборы СМО. Длина проводимой выработки задается в СМО количеством поступающих на вход системы заявок

$$m = L/l,$$

где  $L$  - длина выработки;  $l$  - подвигание забоя за цикл.

Средняя продолжительность проходческого цикла определяется в модели как сумма случайных величин

$$t_u = \left( \sum_{i=1}^m t_{pi} + \sum_{i=1}^m t_{ni} + \sum_{i=1}^m t_{ki} \right) / m,$$

где  $t_{pi}$ ,  $t_{ni}$ ,  $t_{ki}$  - случайные значения времени обслуживания заявки приборами, имитирующими оборудование для разрушения горного массива, погрузки горной массы и крепления выработанного пространства при  $i$ -ом цикле.

На рис. 2 в качестве примера приведено представление технологии проведения выработки буровзрывным способом в виде двухканальной многофазной замкнутой системы массового обслуживания.

Заявка представляет собой момент готовности оборудования к следующему проходческому циклу, а приборы - проходческие машины, выполняющие заявки за случайное время; скорость поступления заявок в систему определяется скоростью их обслуживания. По одному каналу заявка

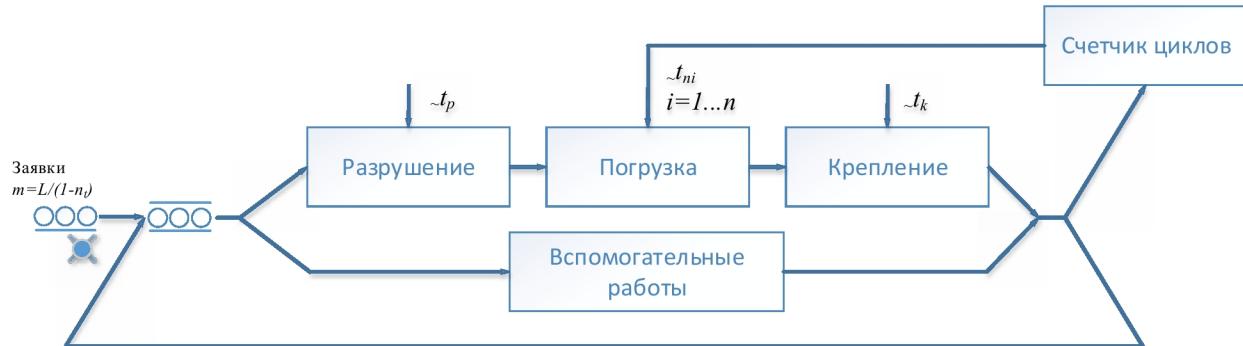


Рис. 2. Модель роботизированной технологии проведения выработки буровзрывным способом в виде СМО

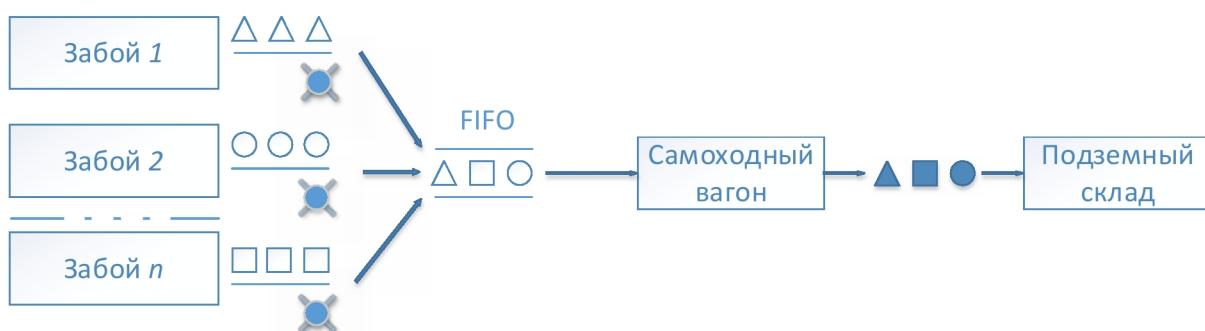


Рис. 3. Система массового обслуживания, отображающая доставку материалов самоходным вагоном

обслуживается бурильными установками, погружочными машинами и крепеустановщиком. По другому каналу выполняются вспомогательные работы. По окончании проходческого цикла обслуженная заявка фиксируется счетчиком циклов и разрешает поступление необслуженной заявке на вход системы.

В качестве транспортного средства при проведении горной выработки возможно применение самоходного вагона, модель работы которого представлена в виде одноканальной системы массового обслуживания, в которой заявки поступают от  $n$ -го количества забоев, а время обслуживания зависит от времени движения вагона к забою и обратно с учетом времени загрузки на подземном складе (рис. 3) [7].

Завод полукоксования, рассчитанный на получение 860 тыс. т. полукокса, при применении технологии газификации, представляет собой технологический объект, состоящий из более 180 элементов (газификаторы, дробильные установки, система конвейеров, перегружателей, складов и др.). В модели завода полукоксования требовани-

дробление, обработку и ожидающие обслуживания, а приборы обслуживания – технологическое оборудование и транспортные средства.

На рис. 5, 6 входной поток  $Q$  – дискретные объемы угля, поступающие железнодорожным транспортом на завод. Такой же объем угля будет на выходе из модуля «прием угля», а также на входе в модуль «подготовка угля», в котором в приборе обслуживания «сортировочный узел» после дробления произойдет разделение на два потока:

$$Q = Q_1 + Q_2,$$

где  $Q_1$  – отсев,  $Q_2$  – уголь требуемой фракции.

Общее время нахождения требования в модели «прием угля»:

$$t_{ny} = t_{so} + \frac{l_{k1}}{V_{k1}} + t_{mc},$$

где  $t_{so}$  – время, необходимое на разгрузку одного вагона угля,  $l_{k1}$  и  $V_{k1}$  – длина и скорость транс-

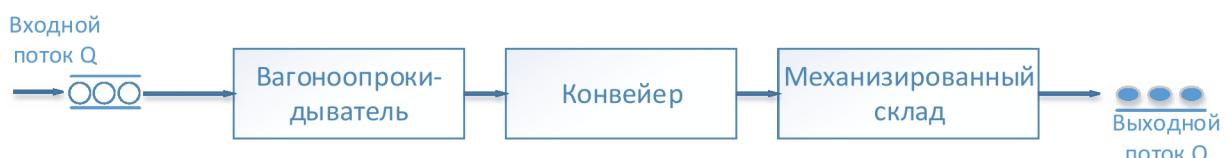


Рис. 4. Модель «прием угля» завода полукоксования

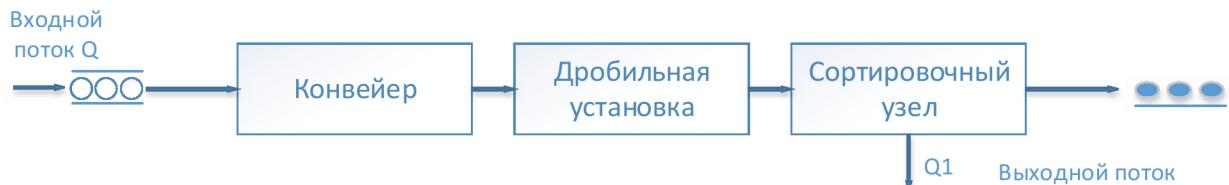


Рис. 5. Модель «подготовка угля» завода полукоксования

ями в СМО являются дискретные объемы угля и заявки на загрузку соответствующего газификатора. В модели множество технологических параметров разбито на пересекающиеся подмножества, каждое из которых сведено ко времени обслуживания требования в СМО. Продолжительность технологических процессов отображается вводом случайных временных задержек в приборы СМО, имитирующие оборудование завода.

В целом, модель завода полукоксования представляет собой сеть, состоящую из 10 одно- и многоканальных одно- и многофазных СМО. Наиболее простым примером является модель «прием угля» и «подготовки угля» (рис. 4, 5).

Модели «прием угля» и «подготовка угля» отображены многофазными одноканальными СМО без отказов с простейшей дисциплиной обслуживания FIFO [8]. Требованиями выступают дискретные объемы угля, поступившие на склад,

портирующего конвейера в данном модуле,  $t_{mc}$  – время нахождения партии угля на механизированном складе. Длина конвейера постоянна, остальные величины носят стохастический характер, причем, величина  $t_{mc}$  определяется темпами работы всего завода.

Общее время нахождения требования в модели «подготовка угля»:

$$t_{node} = \frac{l_{k2}}{V_{k3}} + t_{op} + t_c,$$

где  $l_{k2}$  и  $V_{k3}$  – длина и скорость транспортирующего конвейера в модели «подготовка угля»,  $t_{op}$  – время дробления партии угля дробильной установкой,  $t_c$  – время, затрачиваемое на сортировку угля. Как и в предыдущей модели неизмен-

на только величина  $l_{k_2}$ , остальные величины – имеют случайную природу, например, производительность дробилки колеблется в широких пределах и зависит от твердости дробимого материала и необходимой степени измельчения.

Аналогично разработаны модели всех элементов угле-энергохимического кластера. Таким образом, угле-энергохимический кластер представлен в виде сети 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.

Взаимодействие оборудования во времени и пространстве отображается перемещением требований (дискретных объемов угля), через приборы

обслуживания (оборудование кластера) со случайными временными задержками, соответствующими времени выполнения технологических операций.

Программная реализация разработанной концептуальной модели позволит в дальнейшем создать имитационную модель угле-энергохимического 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.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Патраков Ю.Ф., Кузнецова Л.В., Анферов Б.А. Концепция рационального использования высокозольных твердых горючих ископаемых // Безопасность труда в промышленности. – 2015. – № 2. – С. 38-41.
2. Лоу А.М., Кельтон А.Д. Имитационное моделирование. СПб., 2004.
3. 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).
4. 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.
5. Vasilij 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.

## REFERENCES

1. Patrakov Ju.F., Kuznecova L.V., Anferov B.A. Koncepcija racional'nogo ispol'zovanija vys okozol'nyh tverdyh gorjuchih iskopаемyh // Bezopasnost' truda v promyshlennosti. – 2015. – № 2. – S. 38-41.
2. Lou A.M., Kel'ton A.D. Imitacionnoe modelirovanie. SPb., 2004.
3. Metodologija i tehnologija imitacionnyh issledovanij slozhnyh sistem: sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitiya: Monografija/ V.V. Devjatkov - M.: Vuzovskij uchebnik: INFRA-M, 2013. - 448 s.: 60x90 1/16. - (Nauchnaja kniga).
4. Zinov'ev, V.V. Imitacionnyj podhod pri modelirovaniu jenergotehnologicheskogo kompleksa po pere-rabotke uglja / V.V. Zinov'ev, A.N. Starodubov, A.E. Majorov, V.N. Kochetkov // Ezhemesjachnyj proizvod-stvenno-massovyy zhurnal «Jenergetik». – 2013. – №1. – S. 26-29.
5. Vasilij 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.

6. Starodubov A.N., Sistema imitacionnogo modelirovaniya gornoprohodcheskih rabot / A.N. Starodubov, V.V. Zinov'ev, M.V. Beresnev, A.E. Majorov // Ezhemesjachnyj nauchno-tehnicheskij i proizvodstvenno-ekonomicheskij zhurnal «Ugol'», 2-2016. – S. 20-24.
7. Zinov'ev, V.V. Modelirovanie mnogozabojnoj prohodki s ispol'zovaniem imitacionnogo podhoda // Institut uglja Sibirskogo otdelenija RAN: Otdel'nyj vypusk gornogo informacionno-analiticheskogo bjulletenja (nauchno-tehnicheskogo zhurnala) Mining Informational And Analytical Bulletin (Scientific And Technical Journal). – M.: Izd-vo «Gornaja kniga». – 2013. – №OV6. – 532 s. – S. 138-144.
8. Starodubov, A.N. Obobshhennaja struktura modeli jenergotehnologicheskogo kompleksa v vide sistem massovogo obsluzhivaniya: Otdel'nyj vypusk gornogo informacionno-analiticheskogo bjulletenja (nauchno-tehnicheskogo zhurnala) Mining Informational And Analytical Bulletin (Scientific And Technical Journal). – M.: Izd-vo «Gornaja kniga». – 2013. – №OV6. – 532 s. – S. 145-151.

Поступило в редакцию 07.09.2016  
Received 7 September 2016