

УДК 621.9:519.8

DOI 10.18413/2411-3808-2018-45-4-741-747

**СИСТЕМАТИЗАЦИЯ КРИТЕРИЕВ И МЕТОДИКА
МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ
ВНУТРИМЕЛЬНИЧНОГО УСТРОЙСТВА ТРУБНОЙ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ**

**SYSTEMATIZATION OF CRITERIA AND TECHNIQUE
OF A MULTICRITERIAL SELECTION OF A RATIONAL STRUCTURE
OF AN INTERNAL DEVICE OF A TUBE BALL MILL**

**С.И. Ханин¹, В.В. Ломакин², Н.П. Путивцева², О.П. Пусная², Т.В. Зайцева²
S.I. Khanin¹, V.V. Lomakin², N.P. Putivtseva², O.P. Pusnaya², T.V. Zaitseva²**

¹⁾ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46

²⁾ Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, 85

¹⁾ Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov,
46 Kostyukov St., Belgorod, 308012, Russia

²⁾ Belgorod State National Research University,
85 Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia

E-mail: dh@intbel.ru, lomakin@bsu.edu.ru, putivzeva@bsu.edu.ru, pusnaya@bsu.edu.ru,
zaitseva@bsu.edu.ru

Аннотация

В статье изложена методика подбора конструкции внутримельничного устройства шаровой мельницы. Был проведен анализ лопастных энергообменных устройств и выделены характеристики, которые позволяют уменьшить количество рассматриваемых мельниц. В методике на первом этапе происходит удаление заведомо неподходящих вариантов внутримельничных устройств по заданным критериям, на втором этапе производится окончательный выбор мельниц по технико-экономическим показателям с использованием метода анализа иерархий. Приведена классификация внутримельничных лопастных энергообменных устройств, составлена сводная таблица первичных данных характеристик ЛЭУ. Представлено описание предметной области, выделены критерии и определены связи между ними, произведено многокритериальное оценивание конструкций лопастных эллипсных энергообменных устройств. В результате сформулированы рекомендации по выбору оптимального внутримельничного устройства при проектировании конструкции шаровой мельницы.

Abstract

The article describes the methodology for selecting the design of the intra-mill device of a ball mill. The analysis of the blade energy-exchanging devices was carried out and the characteristics that reduce the number of mills were highlighted. On the first stage of the method, the obviously unsuitable variants of intra-mill devices are removed according to specified criteria; on the second stage the final selection of mills according to technical and economic indicators with the use of the analytical hierarchical procedure was made. A classification of intra-mill bladed energy-exchanging devices is represented; a summary table of the primary data of the characteristics of VED is compiled. A description of the subject area is presented, criteria are highlighted and relationships between them are determined, multi-criteria evaluation of the designs of vane ellipse energy-exchange devices was carried out. As a result, recommendations on the choice of the optimal intra-mill device during designing the construction of a ball mill were formulated.

Ключевые слова: шаровая мельница, лопастное энергообменное устройство, многокритериальный подход, принятие решений, метод анализа иерархий, лопастное энергообменное устройство.

Keywords: ball mill, vane energy-exchange device, multicriteria approach, decision making, hierarchy analysis method, vane energy exchanger.

Введение

Производство многих материалов связано с необходимостью тонкого измельчения исходного сырья [Глухарев, 2014]. Это производство цемента и удобрений, выпуск керамических и стеклянных изделий, помол угля, руды и др. Измельчение материалов является одним из самых энерго- и трудоемких процессов в различных отраслях промышленности. Основные технологические процессы преимущественно осуществляются с материалами в измельченном состоянии [Bogdanov et al., 2014]. Тонкость измельчения оказывает существенное влияние на качество готовой продукции. При производстве различных строительных материалов и изделий из них (листовое строительное стекло, цемент, изделия из тонкой керамики и др.) требуется достаточно высокая дисперсность используемых компонентов. Так, около 85% электроэнергии, затрачиваемой на производство цемента, расходуется на дробление и помол, из которой 75% приходится только на помол [Khanin et al., 2015]. Несмотря на низкий коэффициент полезного действия, большие габариты и энергоемкость, шаровые мельницы (ШМ) по-прежнему остаются наиболее распространенными агрегатами для помола различных материалов благодаря большой производительности, простоте и надежности конструкции.

Основная часть

Производство многих материалов связано с необходимостью тонкого измельчения исходного сырья. Это производство цемента и удобрений, выпуск керамических и стеклянных изделий, помол муки и фарм-компонентов. Измельчение материалов является одним из самых энерго- и трудоемких процессов в различных отраслях промышленности. Основные технологические процессы преимущественно осуществляются с материалами в измельченном состоянии. Тонкость измельчения оказывает существенное влияние на качество готовой продукции. При производстве различных строительных материалов и изделий из них (листовое строительное стекло, цемент, изделия из тонкой керамики и др.) требуется достаточно высокая дисперсность используемых компонентов.

При измельчении различных материалов нашли достаточно широкое применение ШМ различных типоразмеров с внутримельничными классифицирующими устройствами и разгрузкой материала через сито. Они могут использоваться как в открытом, так и в замкнутом циклах (рис. 1).

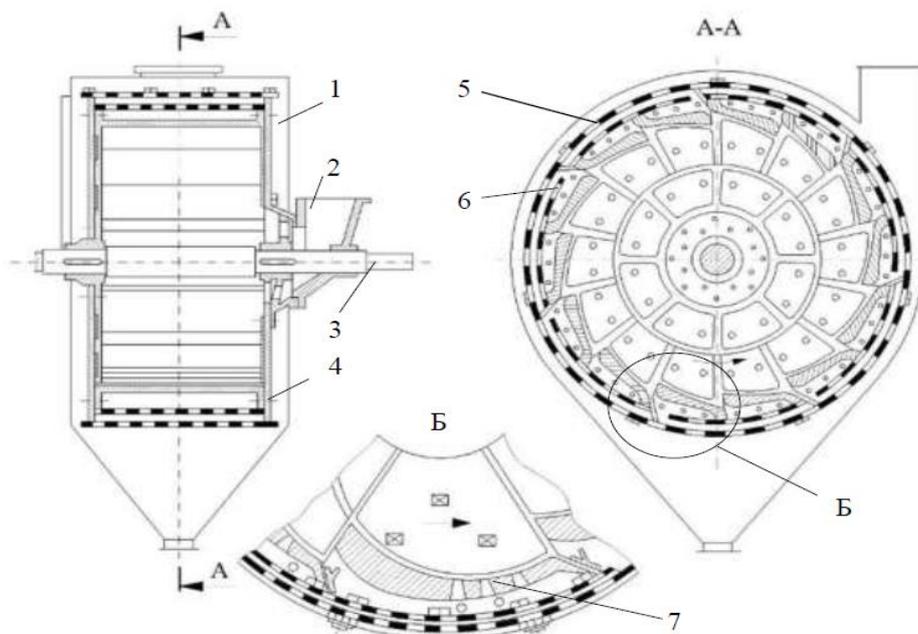


Рис. 1. Шаровая мельница с периферийной разгрузкой: 1 – кожух, 2 – загрузочная часть, 3 – вал, 4 – днище, 5 – наружное сито, 6 – промежуточное сито, 7 – перфорированная бронеплита
 Fig. 1. Ball mill with peripheral unloading: 1 – casing, 2 – loading part, 3 – shaft, 4 – bottom, 5 – outer sieve, 6 – intermediate sieve, 7 – perforated armored plate

Эта конструкция ШМ позволяет удалять из шароматериальной среды частицы определённой крупности, исключить их переизмельчение, повысить эффективность процесса помола.

На предприятиях при помолу угля, производстве керамических изделий в условиях мокрого и сухого помолов различных материалов (пегматита, полевого шпата, кварца и др.) нашли применение ШМ непрерывного действия с комбинированной конструкцией корпуса [Buchholtz et al, 2000; Schwager and Poschel, 2008]. Корпус мельницы выполняется составным из цилиндрической части и примыкающих к ней большими основаниями двух конусообразных частей – короткоконусной, расположенной со стороны загрузочной части, имеющей больший угол при вершине конуса и расположенной со стороны разгрузочной части длинноконусной, с меньшим углом при вершине конуса (рис. 2).

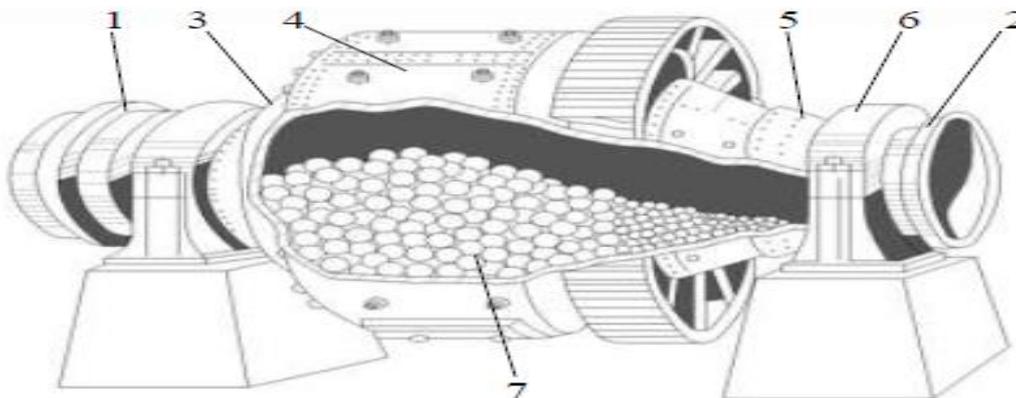


Рис. 2. Шаровая мельница с комбинированной конструкцией корпуса:

1,2 – загрузочная и разгрузочная части; 3,4 и 5 – соответственно короткоконусная, цилиндрическая и длинноконусная части корпуса; 6 – подшипники; 7 – мелющие тела

Fig. 2. Ball mill with a combined housing design:

1,2 – loading and unloading parts; 3,4 and 5 – short-cone, cylindrical and long-cone parts of the body, respectively; 6 – bearings; 7 – grinding bodies

Стремление к повышению эффективности работы ШМ и их конструктивные и эксплуатационные особенности предопределили образование внутримельничных устройств различных конструкций. К ним следует отнести межкамерные перегородки, выходные решетки, классифицирующие решетки, лопастные энергообменные устройства (ЛЭУ) и ряд других. Исходя из конструктивных признаков, устройства объединяются в соответствии с представленной классификацией (рис. 3).



Рис. 3. Классификация внутримельничных лопастных энергообменных устройств

Fig. 3. Classification of intra-mill bladed energy-exchanged machines

Методика

Выбор ЛЭУ является сложной и неоднозначной задачей, что связано как с большим количеством предлагаемых конструктивных устройств, так и возможностью их комбинирования. При этом процесс выбора устройства необходимо осуществлять как по ряду формальных признаков, так и с помощью экспертов, обладающих профессиональными знаниями и имеющих соответствующий опыт их применения в конкретных ситуациях [Lomakin and Lifirenko, 2014].

При принятии решения по выбору наиболее подходящего по критериям ЛЭУ авторами предлагается двухэтапная методика:

1. Выбор типа лопастного энергообменного устройства исходя из конструктивных параметров мельницы и условий реализации процесса помола.

2. Подбор конструкции рационального ЛЭУ с учетом затрат, качественных и количественных показателей работы мельницы.

Этап 1. Выбор типа лопастного энергообменного устройства. Данный этап осуществляется с целью отбрасывания заведомо неподходящих типов ЛЭУ [Маторин и др., 2015].

При проектировании конструкции шаровой мельницы в зависимости от исходных свойств материалов и требования к тонкости помола проведем выбор типа лопастного энергообменного устройства. Основными критериями отбора будут служить следующие параметры: способ производства, тип измельчаемого материала, типоразмер и режим работы. При выборе оборудования по переработке пород необходимо учитывать их основные физико-механические свойства. В первую очередь это относится к размолоспособности материалов. Общепринято их разделять на материалы повышенной, средней и пониженной размалываемости. Машиностроительные компании, занимающиеся производством мельниц, выпускают несколько типоразмеров мельниц различной производительности. Основные характеристики лопастных энергообменных устройств приведены в таблице.

На основании анализа таблицы построим дерево решений [Lomakin et al, 2017], отбрасывающее заведомо неподходящие варианты ЛЭУ, исходя из выделенных ранее критериев (рис. 4) [Путивцева и др., 2017; Petrovsky et al, 2011].

Таблица
Table

Сводная таблица первичных данных характеристик ЛЭУ
Summary table of BEM characteristics primary data

Вид устройства	Способ помола		Соотношение диаметра и длины камеры мельницы			Размалываемость			Исходная крупность материала		Режим работы	
	Мокрый	Сухой	$D_1/L_1 < 1$	$1 < D_1/L_1 < 2$	$2 < D_1/L_1 < 3$	Повышенная	Средняя	Пониженная	Регламентированная	Повышенная	Непрерывный	Периодический
ЛЭС	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+	+	-
ЛЭС и ЛДД	+	-	-	-	+	-	+	+	+	+	+	-
ЛЭС и НМП	+	+	-	-	+	-	+	+	+	+	+	-
ЛЭЧУ	+	+	+	-	-	+	+	-	+	-	+	+
ДВЛ	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+
ОВЛ	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+	+	-
НПЛУ	+	+	+	-	-	+	+	-	+	-	+	+
РПЛУ	+	+	+	-	-	+	+	-	+	+	+	+

В результате получена совокупность наборов ЛЭУ, удовлетворяющая заданным исходным условиям. При этом в каждом наборе для любого из ЛЭУ проставлена степень соответствия в виде десятичной дроби из диапазона [0;1] [Зайцева и др., 2012; Putivtseva et al, 2016].

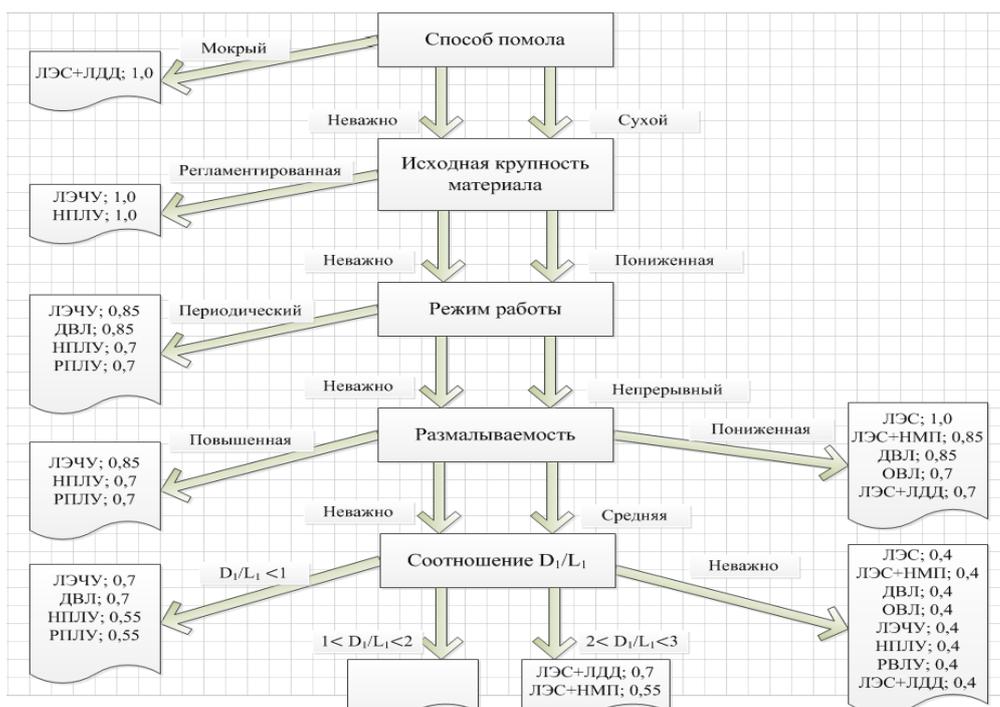


Рис. 4. Дерево решений
Fig. 4. Solution tree

Этап 2. Подбор конструкции рационального ЛЭУ с учетом затрат, качественных и количественных показателей работы мельницы.

Этот этап выбора рациональной конструкции лопастного энергообменного устройства мельницы осуществляется с учетом множества критериев на основе метода анализа иерархий [Ларичев, 2002; Саати, 1993]. Данный метод предназначен для упорядочения конечного множества реальных вариантов A_1, \dots, A_m , оценённых по многим количественным и качественным критериям K_1, \dots, K_n , и выбора лучшего варианта по наибольшей общей ценности. Задача выбора вида ЛЭУ шаровой мельницы представляется в виде иерархии, которая в самом простом случае состоит из 3 уровней: цель (доминанта), критерии, альтернативы (варианты) [Сенник, Гребенников, 2015; Шрейдер, Шаров, 1982].

Альтернативами являются шаровые мельницы с выбранными конструкциями внутримельничных устройств [Ломакин и др., 2014; Ломакин и Лифиренко, 2014].

Критериями являются технико-экономические показатели, характеризующие особенности эксплуатации мельницы с различными конструкциями лопастных эллипсных энергообменных устройств (рис. 5) [Путивцева и др., 2015; Lomakin et al, 2018].

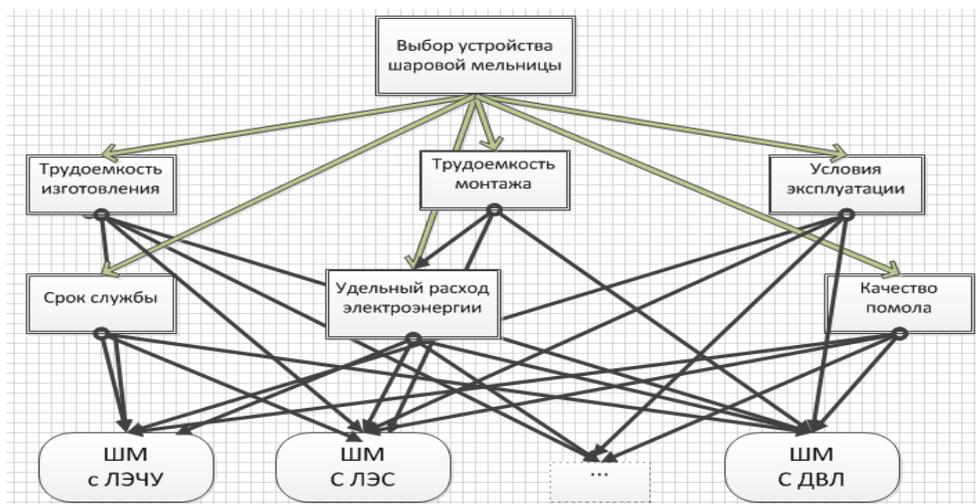


Рис. 5. Иерархия выбора устройства шаровой мельницы
Fig. 5. Hierarchy of selection of a ball mill device

Заключение

Предложенная методика использована для подбора ЛЭУ шаровой мельницы по заявленным требованиям предприятия. Рассмотренный подход позволил на первом этапе сузить количество рассматриваемых вариантов с 8 до 5. На 2 этапе лицо, принимающее решение, выбрало вид, который наиболее выгоден предприятию на основе технико-экономических показателей [Пусная и др., 2018]. Предлагаемые научно-технические решения позволяют осуществить поддержку пользователя в ходе принятия решений при построении новых конструкций трубной шаровой мельницы с энергообменными устройствами.

Выводы

1. Проведен анализ использования шаровых мельниц в различных отраслях промышленности: строительных материалов, химической, горнорудной и др. Приведены особенности условий их эксплуатации.

2. Для шаровых мельниц рассмотрены различные конструкции лопастных энергообменных устройств и схемы их установки в корпусе, а также преимущества их применения, позволяющие осуществлять помол необходимого качества из различных материалов.

3. Предложена двухэтапная методика, позволяющая выбрать наиболее рациональную конструкцию лопастных энергообменных устройств шаровой мельницы, исходя из ее конструкции и особенностей технологического производства.

4. Проведена апробация предлагаемого метода для применения на машиностроительном предприятии.

Список литературы References

1. Глухарев Н.Ф. Сухое измельчение в условиях электронейтрализации: монография. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2014. 193.

Gluxarev N.F. Suxoe izmel'chenie v usloviyax e'lektronejtralizacii: monografiya [Dry grinding in electroneutralization conditions: monograph] SPb.: Izd-vo Politehnxicheskogo universiteta, 2014. 193.

2. Зайцева Т.В., Нестерова Е.В., Игрунова С.В., Пусная О.П., Путивцева Н.П., Смородина Н.Н. 2012 Байесовская стратегия оценки достоверности выводов. Научные ведомости БелГУ. Сер. Экономика Информатика 13(132): 180–183.

Zajceva T.V., Nesterova E.V., Igrunova S.V., Pusnaja O.P., Putivceva N.P., Smorodina N.N. 2012. Bajesovskaja strategija ocenki dostovernosti vyvodov [Bayesian estimation of the reliability of the conclusions of the strategy]. Nauchnye vedomosti BelGU. Ser. Jekonomika Informatika, 13(132): 180–183 (in Russian)

3. Ларичев О.И., 2002 Теория и методы принятия решений. М.: Логос, 392.

Larichev O.I., 2002 Teorija i metody prinjatija reshenij [Theory and methods of decision-making]. M.: Logos, 392. (in Russian)

4. Ломакин В.В., Лифиренко М.В. 2014. Система поддержки принятия решений с автоматизированными средствами корректировки суждений экспертов. Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. 1(172): 114–120.

Lomakin V.V., Lifirenko M.V. 2014. Decision support system with means of expert judgment correction. Nauchnye vedomosti BelGU. Istoriya. Politologiya. Ekonomika. Informatika. [Belgorod State University Scientific Bulletin. History Political Science Economics Information technologies]. 1(172): 114–120. (in Russian)

5. Ломакин В.В., Лифиренко М.В. 2014. Инструментальные средства поддержки жизненного цикла автоматизированных систем управления наружным освещением на основе экспертных методов принятия решений. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 5: 196–200.

Lomakin V.V., Lifirenko M.V. 2014. Instrumental decision-making tools for lifecycle support of outdoor lighting automated control systems. Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova, 5: 196–200. (in Russian)

6. Маторин С.И., Жихарев А.Г., Зайцева Н.О. 2015. Имитационное моделирование с использованием системно-объектного подхода. Прикладная информатика, 6(10): 91–104.

Matorin S.I., Zhikharev A.G., Zaitseva N.O. 2015. Imitatsionnoe modelirovanie s ispol'zovaniem sistemno-ob'ektnogo podkhoda. Prikladnaya informatika, 6(10): 91–104. (in Russian)

7. Пусная О.П., Путивцева Н.П., Зайцева Т.В., 2018. Расчет вероятностей выбора внутримельничных устройств. Международный научно-практический журнал «Теория и практика со-

временной науки», 9(39). Date Views 05.10.2018 www.modern-j.ru/domains_data/files/39/Pusnaya%20O.P.pdf.

Pusnaya O.P., Putivceva N.P., Zajceva T.V., 2018. Raschet veroyatnostej vy`bora vnu-trimel`nichny`x ustrojstv [Calculation of probabilities of the choice of intramuscular devices]. *Mezhdunarodny`j nauchno-prakticheskij zhurnal «Teoriya i praktika sovremennoj nauki»*, 9(39). (in Russian)

8. Путивцева Н.П., Зайцева Т.В., Игрунова С.В., Нестерова Е.В., Пусная О.П. 2015. О разработке пакета компьютерной поддержки принятия решений для выбора корреляционно-регрессионных моделей анализа и прогнозирования эмпирических данных. *Научные ведомости БелГУ Сер. Экономика Информатика*. 21(216): 126–131

Putivceva N.P., Zajceva T.V., Igrunova S.V., Nesterova E.V., Pusnaja O.P. 2015. O razrabotke paketa komp`juternoj podderzhki prinjatija reshenij dlja vybora korrelyacionno-regressionnyh modelej analiza i prognozirovaniya jempiricheskikh dannyh. *Nauchnye vedomosti BelGU. Ser. Jekonomika Informatika* [On the development computer support package decision to select the correlation-regression model analysis and prediction of empirical data. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics Information technologies*] 21(216): 126–131 (in Russian)

9. Путивцева, Н.П., Ряснова В.А., Зайцева Т.В., Пусная О.П., Нестерова Е.В., Игрунова С.В. 2017. Выбор системы электронного документооборота методом ELECTRE и сравнение результатов при использовании метода анализа иерархий. *Научные ведомости БелГУ. Сер. Экономика Информатика*. 2(251): 135–141

Putivceva, N.P., Rjasnova V.A., Zajceva T.V., Pusnaya O.P., Nesterova E.V., Igrunova S.V. 2017. Vy`bor sistemy e`lektronnogo dokumentooborota metodom ELECTRE i sravnenie rezul`tatov pri ispol`zovanii metoda analiza ierarxij. [Selecting an electronic document management system using the ELECTRE method and comparing the results using the hierarchy analysis method] *Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics Information technologies*. 2(251): 135–141. (in Russian)

10. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 320.

Saati T., 1993. Prinjatie reshenij. Metod analiza ierarhij [Making decisions. Analytic Hierarchy Method. *Radio and Communications*]. М.: Radio i svjaz', 320. (in Russian)

11. Сенник Ю.С., Гребенников И.Р. 2015. Жизненный цикл информационных систем. Системный анализ и прикладная информатика, 2: 4–9.

Sennik U.S., Grebennikov I.R. 2015. Life cycle of information systems. *System analysis and applied informatics*, 2: 4–9. (in Russian)

12. Шрейдер Ю.А., Шаров А.А. 1982. Системы и модели. М., Радио и связь, 152.

Shreyder Y.A., Sharov A.A. 1982. Sistemy i modeli. [Systems and models] М., Radio i svjaz', 152. (in Russian)

13. Bogdanov V.S., Hanin S.I., Starchenko D.N. and Sagitov I.A., 2014. Distinctive features of the relations between grinding equipment and devices inside ball mill body. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9(11): 2344–2350.

14. Buchholtz V J, Freund A., Poschel T. 2000 Molecular dynamic of comminution in ball mills. *European physical journal* 16: 162–182

15. Khanin S.I., Starchenko D.N., Bogdanov V.S. and Mordovskaya O.S., 2015. Grinding Bodies Movement Features In A Ball Grinder Tapered Chamber. *International Journal of Applied Engineering Research (IJAER)*, 10(24): 45097–45107

16. Lomakin V.V. and Lifirenko M.V., 2014. Supporting Tools for Decision-making in the Outdoor Lighting Control Systems. *Research Journal of Applied Sciences*, 9(12): 1185–1190.

17. Lomakin V.V., Putivtseva N.P., Zaitseva T.V., Liferenko M.V. and Zaitsev I.M., 2017. Multi-criteria selection of a corporate system by using paired comparison analysis. *J. Fundam. Appl. Sci*, 9(7S): 1472–1482.

18. Lomakin V.V., Khanin S.I., Putivtseva N.P., Pusnaya O.P. and Zaitseva T.V., 2018. Method of selecting the rational structure of the intra-mill device while designing a ball mill. *J. Fundam. Appl. Sci*, 10(4S): 1188–1197.

19. Petrovsky A.B., Royzenson G.V. and Tikhonov I.P., 2011. Multiple Criteria Analysis and Expert Evaluation of Activity Efficiency of Scientific Organizations. *Advances in Decision Technology and Intelligent Information Systems*. Tecumseh: The International Institute for Advanced Studies in Systems Research and Cybernetics, 12: 22–26.

20. Putivtseva, N.P., Zaitseva T.V., Pusnaya O.P., Kuz`micheva T.G. and Kaljuzhnaja E.V., 2016. On the Use of Expert Evaluation Methods to Select the Electronic Document Management System. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(4): 733–737.

21. Schwager T., Poschel T. 2008. Coefficient of restitution for viscoelastic spheres: The effect of delayed recovery. *Physical review E* V. 78(5):1304–1316