

В. С. МОРКУН, д-р техн. наук, проф., В. В. ТРОНЬ, канд. техн. наук, доц.,  
И. А. ГАПОНЕНКО, науч. сотр., Криворожский национальный университет  
Д. И. ПАРАНЮК, инж., ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог»

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ ГОРНОЙ ПОРОДЫ В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ НА ОСНОВЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

**Целью исследования** является оптимизация технологии и повышение эффективности автоматизированного управления бурением скважин в процессе добычи железосодержащих руд, представленных минералогическими разновидностями.

**Методы исследования.** В работе использованы следующие методы: анализ отечественного и зарубежного опыта; методы аналитического конструирования и компьютерного моделирования; методы численного моделирования для синтеза и анализа математической модели; методы математической статистики и теории вероятности для обработки результатов экспериментов.

**Научная новизна** заключается в совершенствовании метода структурной и параметрической идентификации модели геологической структуры породы на основе косвенной информации об изменении в процессе бурения скважин параметров сформированного соответствующим образом ультразвукового поля в комплексе с параметрами буровой установки (скорость бурения, крутящий момент, энергетические характеристики).

**Практическое значение** состоит в том, что использование предложенного подхода позволяет получить дополнительную информацию о концентрации и структуре распределения ферромагнитного компонента в горной породе. Для его использования не требуется наличие скважинной жидкости, или специальных устройств ввода упругих колебаний в горный массив, что способствует расширению сферы его применения.

**Результаты.** Идентификация геологической структуры скважины будет успешной только в том случае, если будет использоваться максимальное количество данных о процессе бурения, а обучающее множество будет включать в себя полный объем информации обо всех минеральных образованиях, которые могут встретиться в процессе проходки скважины. Зависимость амплитуды от частоты результирующих упругих колебаний, которые формируются в горном массиве, определяется содержанием и структурой распределения ферромагнитного компонента в горном массиве, а также физико-механическими характеристиками горной породы. Эта зависимость является усредненной характеристикой содержания и структуры распределения ферромагнитного компонента в горной породе, физико-механических характеристик и состояния горного массива, то есть его минералогического состава. Для того чтобы на основании полученных результатов измерений идентифицировать минералогическую разновидность исследуемой ферромагнитной горной породы предварительно проводят аналогичные измерения на эталонных образцах.

**Ключевые слова:** идентификация, математическая модель, бурение скважин, ультразвуковые измерения

doi: 10.31721/2306-5435-2018-1-104-81-87

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Исследования процесса бурения способствует повышению эффективности бурения разведывательных скважин. В процессе исследования производится запись и обработка параметров бурения с целью получения информации о геологической среде. Основными сложностями для проведения таких исследований является низкое качество информационных данных и отсутствие эффективных методов анализа этих данных [1].

К настоящему времени выполнено значительное количество научных работ, посвященных исследованию закономерностей, математическому и имитационному моделированию, формализации процессов бурения скважин при добыче и переработке железорудного сырья, применению различных методов оперативного контроля параметров этих процессов. В то же время, стоит отметить, что применение упомянутых методов и средств требует соответствующего математического аппарата, который бы позволил осуществить формализацию закономерностей связей между параметрами бурения и характеристиками минералогических разновидностей железорудного сырья, образующих горную породу. Для разработки соответствующего математического аппарата необходимо выполнить исследования по совершенствованию математических и имитационных моделей процессов, протекающих в буровой установке и разработать методы оперативного измерения и обработки параметров упомянутых процессов.

Перспективным подходом для оптимизации технологии и повышения эффективности процесса бурения скважин при добыче железорудного сырья, представленного несколькими минералогическими разновидностями, является формирование модели геологической структуры на основе данных комплекса оперативного измерения в процессе бурения: парамет-

ров буровой установки (скорость бурения, крутящий момент, энергетические характеристики) и характеристик горной породы, полученных путём исследования закономерностей изменения параметров сформированного соответствующим образом ультразвукового поля.

**Анализ исследований и публикаций.** В настоящее время ведутся разноплановые работы по созданию методов формирования модели геологической структуры в процессе бурения [2-6]. Однако требования, предъявляемые к качеству и оперативности получаемой в процессе бурения информации, не могут быть до конца удовлетворены техническим уровнем и технико-методическими возможностями, которые обеспечивают существующие информационно-измерительные системы и отдельные их звенья. В исследованиях [7, 8, 14, 15] предложен подход к статической оптимизации процессов бурения в контексте добычи и переработки руды, однако недостаточно внимания уделено динамичным процессам, возникающие непосредственно в процессе бурения скважины. В работе [9] указано, что достаточным динамическим показателем, характеризующие свойства породы, является механическая скорость бурения. Но в условиях сложной геологической структуры железорудных месторождений данного показателя недостаточно и нужен анализ большого числа переменных, подтверждающие результаты исследований [10,16].

Определять тип породы в процессе бурения по двум показателям: механическая скорость бурения и крутящий момент предложено в работе [11]. Недостатком такого подхода является то, что достижение требуемой точности распознавания разновидности породы возможно только в условиях бинарной геологической структуры, поскольку указанные параметры достаточно точно указывают на гомогенность и прочность горной породы. При наличии нескольких минералого-технологических разновидностей применение данного подхода не обеспечивает необходимый результат.

В работе [12] для мониторинга процесса бурения использованы следующие параметры: горизонтальные и вертикальные вибрации, осевое давление, крутящий момент, скорость бурения, скорость вращения и тому подобное. Недостатком данного подхода можно считать то, что в перечне контролируемых параметров имеются лишь параметры буровой установки и не осуществляется прямое или косвенное измерение характеристик породы, которая бурится. Аналогичный подход использован в работе [13] для распознавания геологической структуры, которая включает три разновидности. Однако, как и в предыдущей работе, распознавание разновидностей горной породы осуществлялось по параметрам бурильной установки без измерения характеристик самой породы.

В работах [17-20] предлагаются измерительные системы горного производства с использованием ультразвуковых методов определения характеристик рудных материалов, а в работах [16, 21, 24] эти методы предлагается использовать для распознавания минералогических разновидностей руды. Усовершенствованные энергосберегающие технологии добычи и переработки железной руды описаны в работах [22, 28-30]. Фундаментальное обоснование новых подходов к решению задач адаптивного управления и определения устойчивости их решений, разработке и расширении информационного и алгоритмического обеспечения, в том числе – на неформализованные данные, создание современных адаптивных систем оптимального управления производственными процессами на базе интеллектуальных технологий, выполнено в работах [23, 25]. В работах [26, 27] рассмотрены методы моделирования нелинейных динамических объектов обогащительного производства на основе ядерных операторов, формирование оптимального управления многоконтурными структурами и многокритериального управления нелинейными динамическими объектами с распределенными параметрами.

**Постановка задачи.** Целью исследований является оптимизация технологии и повышение эффективности автоматизированного управления бурением скважин в процессе добычи железосодержащих руд, представленных минералого-технологическими разновидностями. Для этого необходимо разработать метод структурной и параметрической идентификации модели геологической структуры породы на основе косвенной информации об изменении в процессе бурения скважин параметров сформированного соответствующим образом ультразвукового поля в комплексе с параметрами буровой установки (скорость бурения, крутящий момент, энергетические характеристики).

**Изложение материала и результаты.** Горная порода является сложным конгломератом, состоящим из аморфных и кристаллических соединений с различными прочностными свой-

ствами, структурным строением и гранулометрическим составом, имеющим стохастическую природу, в силу чего характеристики конкретной породы, вообще говоря, не являются однозначными (что подтверждается для одних и тех же пород с разных месторождений) [5]. Перспективным с точки зрения автоматизации вычислений и повышения качественного представления пространственных образов объектов является мета-математика нечетких множеств, на основании которой физико-механические характеристики  $\sigma_c, \tau_{cp}, f, A_p$  представляются в виде нечетких чисел  $s, t, f$  и  $a$  соответственно, каждое из которых описывается нечетким множеством. Элементами указанных множеств являются пары чисел  $\langle \mu_i/U_i(x) \rangle$  [32], где  $\mu_i(u)$  и  $U_i(x)$  – функции принадлежности и области определения (значения) характеристик как подмножества некоторых универсальных множеств  $S, T, F$  или  $A$  таких, что  $\sigma_c \in S, \tau_{cp} \in T, f \in F$  и  $A_p \in A$ .

В этом случае горная порода определяется как лингвистическая переменная (ЛП), множество базовых термов которой включает нечеткие переменные (НП), построенные на указанных нечетких множествах [32]. При этом определение значений ЛП основывается на процедуре принятия решений (ПР) [31, 33].

Пусть  $N_j(t) = U_0 \cdot I_j(t)$  – мощности, потребляемые приводными двигателями установки – функции общего вида класса  $L_1$ . Задача сопоставления функций  $N_j(t)$  некоторому искомому вектору  $f(z)$  сводится к решению двух задач: по времени – определение эффективных значений прочностных параметров  $f, \tau_{cp}, \sigma_c, \sigma_p$ , удельной подачи инструмента  $h(t)$  и глубины бурения  $z(t)$ ; пространственная – восстановление реальных значений прочностных параметров по их эффективным значениям.

Временная задача [33, 34] сопоставляет вектору  $f \equiv \{f, \tau_{cp}, \sigma_c, \sigma_p\}$  некоторую функцию  $W^*(t)$ , определяемую как эффективная удельная энергоёмкость бурения

$$W^*(t) = \int_{t_0}^t \left\{ \left[ F(f^*(t))h(t) + M(f^*(t)) \right] \omega + A_y n_y \right\} d\tau, \quad (1)$$

тем самым определяя неявный нелинейный оператор  $A(H, t) \equiv W^*(t)$  с мерой близости  $N_j$  и  $W^*$

$$\rho(N, W^*) = \|A - N\|_{L_1}, \quad N \equiv \Sigma N_j.$$

Пусть  $H$  – толщина пробуренного слоя породы,  $H = z(t)$ . Тогда решение первой задачи сводится к следующему. Если

$$F^*[H] = \|A - N\|_{L_1} \quad (2)$$

– функционал, определенный на  $H > 0$ , то требуется определить значения  $f^*(t), h(t), z(t)$ , минимизирующие этот функционал при условиях: (1) монотонности решения  $f^*(t) > 0$ ; (2)  $\|A - N\|_{L_1} \leq \varepsilon(\delta)$

Пространственная задача [33, 34] сопоставляет отрезку  $[z, z_0], 0 \leq z_0 - z \leq h_i$ , где  $Z_0, h_i$  – значение текущей координаты вершины породоразрушающей коронки и высота ее рабочего участка, функцию  $W(z)$ , определяющую реальную удельную энергоёмкость процесса разрушения породы заданным способом бурения

$$W(z) = \int_{z_0}^z \left\{ \left[ F(f)H(t(\zeta)) + M(\tau_{cp}) \right] \frac{\omega(t(\zeta))}{V(t(\zeta))} + A_y(\sigma) n_y / \eta \right\} d\zeta, \quad (3)$$

тем самым определяя нелинейный оператор  $B(z_0, z) = W(z)$  с мерой близости  $B$  и  $W^*$

$$\rho(B, W^*) = \|B - W^*\|_{L_1}.$$

В этом случае решение второй задачи сводится к следующему. Если

$$F[z_0 - z] = \|B - W^*\|_{L_1} \quad (4)$$

– функционал, определенный на отрезке  $[0, z_0 - z]$ , то требуется определить  $f(z), \tau_{cp}(z), \sigma_c(z), \sigma_p(z), A_p(z)$  и  $l_n$ , минимизирующие этот функционал при условиях

$$(B - W^*)_{L_1} \leq \varepsilon(f) \quad (5)$$

– и ограниченности решений:  $0 < f < f_{\max}; 0 < \tau_{cp} < \tau_{\max}; 0 < \sigma_c < \sigma_{\max}; 0 < \sigma_p < \sigma_{\max}; z_0 - z \leq h_i$ , а  $z(t)$  – удовлетворяет условию гомеоморфизма.

Получить дополнительную информацию для решения поставленной задачи предлагается путём оценки физико-механических характеристик ферромагнитных горных пород на основе ультразвуковых измерений.

Поставленная задача решается за счет того, что в процессе бурения скважин в горном массиве в зоне измерений формируют постоянное магнитное поле и электромагнитные импульсы синусоидальных колебаний заданной амплитуды и длительности, а частоту их заполнения меняют в определенных пределах, определяют зависимость амплитуды от частоты сложившихся упругих колебаний, по которой судят о характеристиках ферромагнитных горных пород и структуру их залегания.

Для возбуждения упругих колебаний в ферромагнитных породах горного массива используется акустический преобразователь электромагнитного типа. Он представляет собой распределенную структуру, состоящую из источника постоянного магнитного поля, источники переменного магнитного поля и некоторого объема ферромагнитного компонента горной породы, где происходят процессы преобразования энергии электромагнитного поля в энергию упругих колебаний частиц среды.

В режиме возбуждения упругих возмущений преобразователь электромагнитного типа за счет магнитострикционного эффекта и пондеромоторного действия электромагнитного поля реализует преобразования электромагнитных сигналов в упругие колебания ферромагнитной горной породы. В определенной точке ферромагнетика с координатами  $x_k$  формируется постоянное магнитное поле с напряженностью  $H^0(x_k)$  и переменное (в результате воздействия электромагнитного импульса определенной амплитуды, длительности и частоты) с напряженностью  $H^*(x_k, t)$  в момент времени  $t$ . В области существования магнитных полей  $H^*(x_k, t)$  и  $H^0(x_k)$  в ферромагнетике формируются деформации. Энергия в зоне формирования деформаций передается дальше упругими волнами. Таким образом, акустический преобразователь электромагнитного типа формирует упругие колебания непосредственно в зоне измерений характеристик ферромагнитных пород горного массива. Поскольку при этом отсутствуют какие-либо промежуточные элементы для передачи сформированных упругих колебаний в среду, то и отсутствуют погрешности процедуры измерений его характеристик, обусловленные этими факторами.

Амплитуда и частота сложившихся упругих акустических колебаний зависит от содержания и структуры распределения ферромагнитного компонента в горной породе, физико-механических характеристик и состояния горного массива. Приемник акустических колебаний принимает сформированный в горном массиве сигнал. Амплитуда принимаемого сигнала характеризует амплитудное значение содержания ферромагнитного компонента в зоне измерений: чем больше концентрация ферромагнетика, тем выше эффективность преобразования энергии электромагнитного импульса в механическую энергию деформации горной породы и, соответственно, амплитуда упругих колебаний, сформированных в горном массиве.

Электромагнитный акустический преобразователь и приемник размещаются на рабочем органе буровой установки, который перемещается по скважине с известной скоростью. Для оценки среднего значения содержания ферромагнитного компонента в контролируемой области горного массива измеряют среднее значение амплитуды  $A_{cp}$  сложившихся и принятых приемником упругих колебаний.

При формировании упругих колебаний в ферромагнитной горной породе происходит их отражение, наложение и поглощения. Параметры этих процессов зависят от амплитуды и частоты электромагнитного импульса, структуры распределения ферромагнитного компонента в горном массиве и физико-механических свойств горных пород. Процессы отражения упругих колебаний на структурных неоднородностях распределения ферромагнитного компонента в горной породе и наложения отраженных сигналов друг на друга приводят к вариациям частоты результирующих упругих колебаний. Причем величина этих вариаций определяется соотношением длины волны сложившихся упругих колебаний и размеров включений ферромагнитного компонента в горной породе, то есть структурой его распределения в горном массиве. С изменением частоты синусоидальных колебаний, заполняющих электромагнитный импульс, меняется и длина волны упругих колебаний, которые формируются в горном массиве и, соответственно, условия их распространения в зоне измерений. Зависимость процессов отражения и наложения сформированных упругих колебаний в горной породе от размеров и структуры ее

неоднородностей приводит к изменению амплитуды принятого приемником сигнала. Изменение частоты синусоидальных колебаний, которыми заполняется электромагнитный импульс, позволяет осуществить формирование упругих колебаний с различной длиной волны и тем самым выявить и оценить реакцию горного массива на соотношение этого параметра, размера и структуры распределения ферромагнитного компонента. Таким образом, зависимость амплитуды от частоты результирующих упругих колебаний, которые формируются в горном массиве, определяются содержанием и структурой распределения ферромагнитного компонента в горном массиве, а также физико-механическими характеристиками горной породы.

Эта зависимость является усредненной характеристикой содержания и структуры распределения ферромагнитного компонента в горной породе, физико-механических характеристик и состояния горного массива, то есть его минералогического состава. Обычно для разрабатываемых месторождений характерно наличие 5-7 минералогических разновидностей. Для того чтобы на основании полученных результатов измерений идентифицировать минералогическую разновидность исследуемой ферромагнитной горной породы предварительно проводят аналогичные измерения на эталонных образцах.

Используемый метод позволяет получать дополнительную информацию о концентрации и структуре распределения ферромагнитного компонента в горной породе, то есть ее минерального вида. Для его использования не требуется наличие скважинной жидкости, или специальных устройств ввода упругих колебаний в горный массив, способствует расширению сферы его применения.

Этапы решения задачи интерпретации косвенных экспериментальных данных перечислены ниже. Поиск и построение функциональных зависимостей, описывающих связь между искомыми прочностными характеристиками исследуемого объекта и режимными (силовыми и кинематическими параметрами), развиваемыми на рабочий орган установки. Решение второй задачи динамики (при неизвестных значениях нагрузки на рабочем органе БРИ). Восстановление эффективных значений силовых ( $M$ ,  $F$ ) и кинематических ( $V$ ,  $\omega$ ) параметров, развиваемых на РО как функций от времени. Восстановление реальных значений силовых ( $M$ ,  $F$ ) и кинематических ( $V$ ,  $\omega$ ) параметров и соответствующее им энергопотребление приводных двигателей по их эффективным значениям. Получение информации относительно концентрации и структуры распределения ферромагнитного компонента в горной породе на основе ультразвуковых измерений. Представление данных различных математических классов в едином обобщенном пространстве. Выработка управленческих решений на компакте обобщенных данных.

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Результаты выполненных исследований свидетельствуют о том, что идентификация геологической структуры скважины будет успешной только в том случае, если будет использоваться максимальное количество данных о процессе бурения, а обучающее множество будет включать в себя полный объем информации обо всех минеральных образованиях, которые могут встретиться в процессе проходки скважины.

Зависимость амплитуды от частоты результирующих упругих колебаний, которые формируются в горном массиве, определяются содержанием и структурой распределения ферромагнитного компонента в горном массиве, а также физико-механическими характеристиками горной породы.

Используемый метод позволяет получать дополнительную информацию о концентрации и структуре распределения ферромагнитного компонента в горной породе, то есть ее минералогической разновидности. Для его использования не требуется наличие скважинной жидкости, или специальных устройств ввода упругих колебаний в горный массив, что способствует расширению сферы его применения.

#### *Список литературы*

1. **Smith L.I.** A tutorial on principal component analysis. 2002 URL: [http://www.cs.otago.ac.nz/cosc453/student\\_tutorials/principal\\_components.pdf](http://www.cs.otago.ac.nz/cosc453/student_tutorials/principal_components.pdf)
2. **Martin J.** Application of pattern recognition techniques to monitoring-while-drilling on a rotary electric blast hole drill at an open-pit coal mine. Master's thesis, Queen's University. 2007.
3. **Liu H., Karen Yin K.** Using information extracted from drill data to improve blasting design and fragmentation. *Fragblast*. 2001. Vol 5 (3), 157-179.

4. **Beattie N.** Monitoring-while-drilling for open-pit mining in a hard rock environment. Master's thesis, Queen's University. 2009.
5. **Козин В.З.** Исследование руд на обогатимость. – Екатеринбург: Изд.-во УГГУ, -2008. – 312 с.
6. **Demuth H., Beale M., Hagan M.** Neural Network Toolbox 6: User's Guide. Natwick, MA: The MathWorks Inc. 2008.
7. **Xiaowei P.** Optimization of mineral processing plant through ROM ore size // AGH Journal of Mining and Geoengineering, 2012. Vol 36(4), 123-132.
8. **Mwango Bowa V.** Optimization of blasting design parameters on open pit bench a case study of Nchanga open pits. International Journal of Scientific Technology Research, 2015. Vol 4(9), 45-51.
9. **Yue Z.Q., Lee C.F., Law K.T., Lam L.G.** Automatic monitoring of rotary percussive drilling for ground characterization. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences, 2015. Vol 41, 573-612.
10. **Schunnesson H.** Rock characterisation using percussive drilling. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences, 2014. Vol 35(6), 711-725.
11. **Schunnesson H., Holme K.** Drill monitoring for geological mine planning in the Viscaria copper mine, Sweden. CIM Bulletin, 2015. Vol 90(1030), 82-89.
12. **Beattie N.** Monitoring-while-drilling for open-pit mining in a hard rock environment: Master's thesis. Kingston. Queen's University. 2012.
13. **Martin J.** Application of pattern recognition techniques to monitoring-while-drilling on a rotary electric blast hole drill at an open-pit coal mine: Master's thesis. Kingston. Queen's University. 2013.
14. **Segui J.B., Higgins M.** Blast design using measurement while drilling parameters. Fragblast: International Journal for Blasting and Fragmentation. 2012. 6, (3-4), 287-299.
15. **Scoble, M. J., Peck, J., Hendricks, C.** Correlation between rotary drill performance parameters and borehole geophysical logging. Mining Science and Technology, 2012. 8, 301-312.
16. **Morkun, V., Tron, V.** Automation of iron ore raw materials beneficiation with the operational recognition of its varieties in process streams. Metallurgical and Mining Industry, 2014. 6, 4-7.
17. **Morkun, V., Morkun, N., Pikilnyak, A.** The study of volume ultrasonic waves propagation in the gas-containing iron ore pulp. Ultrasonics, 2015. 56, 340-343.
18. **Morkun, V., Morkun, N., Pikilnyak, A.** Ultrasonic facilities for the ground materials characteristics control. Metallurgical and Mining Industry, 2014. 2, 31-35.
19. **Morkun, V., Morkun, N., Pikilnyak, A.** Simulation of high-energy ultrasound propagation in heterogeneous medium using k-space method. Metallurgical and Mining Industry, 2014. 3, 23-27.
20. **Morkun, V., Morkun, N., Pikilnyak, A.** Simulation of the Lamb waves propagation on the plate which contacts with gas containing iron ore pulp in Waveform Revealer toolbox. Metallurgical and Mining Industry, 2014. 5, 16-19.
21. **Morkun, V., Tron, V., Goncharov, S.** Automation of the ore varieties recognition process in the technological process streams based on the dynamic effects of high-energy ultrasound. Metallurgical and Mining Industry, 2015. 2, 31-34.
22. **Morkun, V., Morkun, N., Pikilnyak, A.** Ultrasonic phased array parameters determination for the gas bubble size distribution control formation in the iron ore flotation. Metallurgical and Mining Industry, 2014. 3, 28-31.
23. **Morkun, V., Tron, V.** Ore preparation energy-efficient automated control multi-criteria formation with considering of ecological and economic factors. Metallurgical and Mining Industry, 2014. 5, 8-10.
24. **Morkun V., Tsvirkun S.** Investigation of methods of fuzzy clustering for determining ore types. Metallurgical and Mining Industry, 2014. 5, 11-14.
25. **Morkun, V., Morkun, N., Pikilnyak, A.** The gas bubble size distribution control formation in the flotation process. Metallurgical and Mining Industry, 2014. 4, 42-45.
26. **Morkun, V., Morkun, N., Pikilnyak, A.** Adaptive control system of ore beneficiation process based on Kaczmarz projection algorithm. Metallurgical and Mining Industry, 2015. 2, 35-38.
27. **Morkun, V., Morkun, N., Tron, V.** Formalization and frequency analysis of robust control of ore beneficiation technological processes under parametric uncertainty. Metallurgical and Mining Industry, 2015. 5, 7-11.
28. **Golik V., Komashchenko V., Morkun V.** Geomechanical terms of use of the mill tailings for preparation, Metallurgical and Mining Industry, 2015. 4, 321-324.
29. **Golik, V., Komashchenko, V., Morkun, V., Burdzieva, O.** Metal deposits combined development experience. Metallurgical and Mining Industry, 2015. 6, 591-594.
30. **Golik, V., Komashchenko, V., Morkun, V., Khasheva, Z.** The effectiveness of combining the stages of ore fields development. Metallurgical and Mining Industry, 2015. 5, 401-405.
31. **Борисов А.Н., Алексеев А.В., Меркурьева Г.В. и др.** Обработка нечеткой информации в системах принятия решений. М.: Наука, 1989. 303 с.
32. **Заде З.** Понятие лингвистической переменной и её приложение. М.: Мир, 1972. 120 с.
33. **Моркун В.С., Покуренько А.А., Луценко И.А.** Адаптивные системы оптимального управления технологическими процессами. - Кривой Рог: Минерал, 2005. 261 с.
34. **Покуренько А.А.** Информационно-вычислительный комплекс и обратные задачи. – Київ: Наукова думка, 1998. 281 с.

Рукопись поступила в редакцию 06.04.2018