

В. С. МОРКУН, д-р техн. наук, проф., В. В. ТРОНЬ, канд. техн. наук, доц.,
Д. И. ПАРАНИЮК, аспирант, Криворожский национальный университет

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КОСВЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ БУРЕНИЕМ РАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН

Рассмотрен метод интерпретации косвенной информации для построения модели геологической структуры в процессе бурения с целью повышения качества автоматического управления данным процессом. С целью формирования модели геологической структуры рудной породы предложено при обработке и анализе текущей информации об оперативных характеристиках процесса бурения использовать алгоритмы кластеризации таких характеристик процесса, как крутящий момент и скорость бурения, что позволит распознать разновидность буримой в данный момент породы. Оперативное распознавание технологических разновидностей рудной породы на основе кластеризации косвенных признаков, полученных в результате мониторинга процесса бурения, позволит повысить точность автоматизированного управления бурением за счет использования расширенной геологической информации об определенных разновидностях. При обработке и анализе текущей информации об оперативных характеристиках процесса бурения целесообразно с целью формирования модели геологической структуры рудной породы использовать результаты кластеризации таких характеристик процесса, как крутящий момент и скорость бурения, что позволит распознать разновидность породы в ходе технологического процесса.

Ключевые слова: автоматизация бурения, геологическая структура, кластеризация данных.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Значительные затраты в процессе бурения разведочных скважин в горной промышленности обуславливают необходимость повышения эффективности данного процесса посредством адаптации управления в соответствии с изменяющимися с глубиной характеристиками геологической структуры породы. Одним из перспективных вариантов распознавания разновидностей буримой породы является оперативный анализ и сопоставление выходных переменных процесса бурения с результатами геолого-технологических исследований, что позволяет изучать геологическую структуру уже на стадии проводки скважин. Однако при формировании модели геологической структуры возникает ряд задач, связанных количественной интерпретацией полученной оперативной информации.

Геолого-технологическое исследование скважин в процессе бурения путем комплексного анализа технологических характеристик процесса позволяет осуществлять единый геологический и технологический контроль и формировать на его основе управляющие воздействия, соответствующие оптимальным режимам бурения определенной технологической разновидности рудного материала. Учет характеристик отдельных технологических разновидностей позволит также предотвратить преждевременный износ и поломку бурового оборудования.

Анализ исследований и публикаций. Проводимые в настоящее время исследования показывают, что оптимизация процесса бурения возможна только при условии комплексного анализа характеристик бурильной установки и факторов окружающей среды, важнейшим из которых является геологическая структура рудной залежи. В свою очередь формирование и поддержание оптимальных режимных параметров в условиях непрерывных изменений возмущающих воздействий обуславливает необходимость применения специальных методов контроля и управления [1-5].

В работах Е. А. Козловского [2-3] обоснована целесообразность применения самонастраивающихся автоматических буровых систем, которые в простейшем случае сводятся к экстремальным системам управления. Установлено, что с ростом осевой нагрузки и частоты оборотов породоразрушающего инструмента до определённого предела растёт механическая скорость бурения. При этом существуют оптимальные зависимости частоты оборотов n и осевой нагрузки G_{oc} (рис. 1а). Оптимальным предложено считать такое регулирование осевой нагрузки и частоты вращения коронки, которое будет соответственно пропорционально и обратно пропорционально крепости пород f . Рациональные соотношения частоты вращения n и осевой нагрузки G_{oc} для твердосплавных коронок, которые получены на основании данных (рис. 1а) для разной крепости пород f представлены на рис. 1б.

На основе рассмотренных зависимостей построена структурная схема системы автоматического поиска оптимальных параметров режима бурения (рис. 2) [2-3]. В данной системе управления сигнал датчика DV_b скорости бурения U_{OC1} подается на вход экстремального регулятора ЭР, исполнительная схема которого, воздействуя на вход гидравлического органа подачи ГО, регулирует осевую нагрузку. Сигнал U_{OC1} подается также на вход функционального преобразователя ФП и воздействует на регулируемый привод РП, который, согласно рациональному соотношению n и G_{oc} , меняет частоту вращения бурового инструмента.

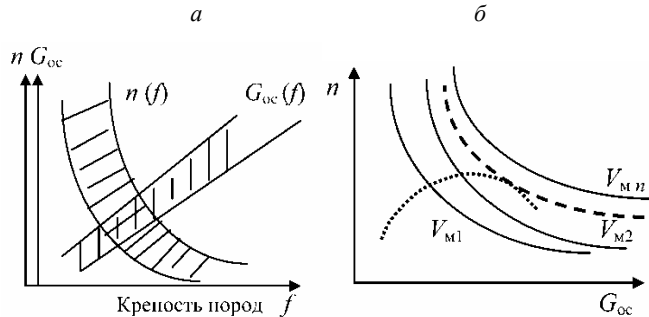


Рис. 1. Соотношения частоты вращения и осевой нагрузки для твердосплавных коронок

Экстремальный регулятор на основе значения разности мгновенного значения механической скорости и максимального значения, зафиксированного экстремальным регулятором $\Delta V_m = V_{mгн} - V_{m\max}$ выдает команду исполнительной схеме на уменьшение осевой нагрузки. Таким образом, исходя из условия оптимальности процесса бурения для конкретной крепости пород, находится максимальная механическая скорость бурения.

тимальности процесса бурения для конкретной крепости пород, находится максимальная механическая скорость бурения.

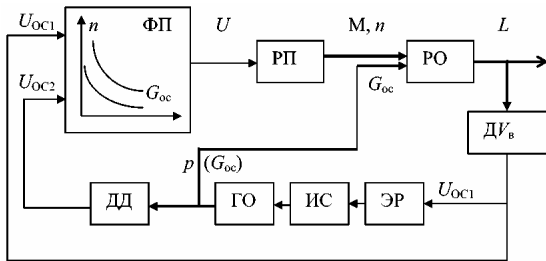


Рис. 2. Система автоматического поиска оптимальных параметров режима бурения: ФП - функциональный преобразователь; РП - регулируемый привод; РО - рабочий орган бурового станка; DV_b - датчик скорости бурения; ЭР - экстремальный регулятор; ИС - исполнительная схема; ГО - гидравлический орган; ДД - датчик давления

Учитывая широкий спектр значений характеристик железорудного материала, добываемого на отечественных горных предприятиях в процессе управления бурением необходимо учитывать геологическую структуру буримой породы.

Проведенные исследования корреляции между данными, полученными в процессе бурения, и геологической информацией [4] выявили высокую степень корреляции между параметрами, полученными в процессе бурения и данными геофизического опробования скважин. В процессе исследования осуществлялся контроль следующих параметров: скорость бурения, скорость вращения, осевая нагрузка, крутящий момент. Данные из скважин были использованы для определения типа породы в шпурах и определения степени соответствия параметров модели геологической структуры шпура, построенной в результате анализа характеристик процесса бурения, параметрам геологической структуры ближайших к месту бурения скважин. При сопоставлении с данными мониторинга буровой машины использованы данные ближайшей скважины. Представленные в работе результаты показали, что существует высокая степень корреляции между параметрами бурения (скорость бурения и крутящий момент) и типом породы.

Исследования [5] показали, что скорость бурения снижается при прохождении твердой породы и увеличивается при прохождении более мягкой. Следует отметить, что анализ динамики крутящего момента также позволяет определить твердую и мягкую породу, однако имеет полностью противоположный характер динамике скорости бурения. Учитывая, что существует некоторое оптимальное значение осевой нагрузки, которое позволяет получить наилучшую скорость бурения, осевую нагрузку целесообразно регулировать для повышения эффективности бурения. Вследствие чего динамика данного параметра уже не будет отражать характеристики разновидностей буримой породы, т.е., использование осевой нагрузки как единственного индикатора характеристик породы является нецелесообразным.

Постановка задачи. Поскольку, существующие методы получения и анализа оперативной информации об текущих характеристиках процесса бурения обеспечивают недостаточную скорость и точность обработки, что обуславливает необходимость проведения дополнительных исследований в данном направлении с целью формирования модели геологической структуры рудной породы в процессе бурения.

Изложение материала и результаты исследований. Определение принадлежности буримого рудного материала к определенной разновидности, как показано выше, может быть выполнено по нескольким характеристикам. Следовательно, целесообразно применить методы кластеризации для поиска закономерностей в полученной в процессе бурения оперативной информации. Следует отметить, что методы кластеризации, в отличие от статистических методов, могут использоваться в условиях практически полного отсутствия априорной информации о законах распределения анализируемых данных [6].

Исходной информацией для кластеризации была матрица измерений характеристик бурения на определенной глубине, состоящая из n строк, каждая из которых содержит показатели, соответствующие определенному значению глубины скважины. В данном случае, задачей является распределение характеристик бурения, соотношенных с текущим значением глубины разведочной скважины, на определенное количество кластеров, соответствующих встречающимся в ходе бурения технологическим разновидностям руды. Для повышения эффективности процесса кластеризации была выполнена нормализация входных данных [7,8]

$$\bar{\psi} = \frac{\psi - \psi_{\min}}{\psi_{\max} - \psi_{\min}} \quad (1)$$

где ψ — текущее значение характеристики процесса бурения, $[\psi_{\min}, \psi_{\max}]$ — диапазон значений характеристики процесса бурения в исследуемом множестве измерений. Результаты нормализации пары характеристик процесса бурения: скорости и крутящего момента; после исключения из выборки выбросов приведены на рис. 3. Для осуществления кластеризации характеристик были рассмотрены методы четкой и нечеткой кластеризации. Диаграмма количества итераций, необходимого для распределения исходных данных на определенное количество кластеров: от 2 до 8; представлена на рис. 4. Следует отметить, что при распределении исходных данных на 6 и более кластеров количество итераций существенно возрастает. Это позволяет сделать вывод, что оптимальное количество кластеров, соответствующее внутренней структуре данных, находится в пределах от 2 до 5.

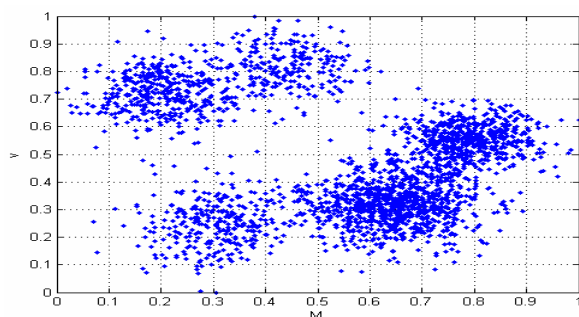


Рис. 3. Нормированные исходные данные

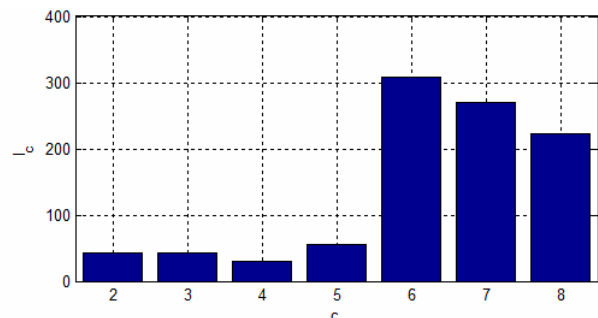


Рис. 4. Количество итераций кластеризации

С применением классической теории множеств четкая кластеризация определяется как семейство подмножеств $\{A_i | 1 \leq i \leq c \subset P(X)\}$ удовлетворяющих условиям: все объекты распределены по кластерам, каждый объект принадлежит только одному кластеру, ни один из кластеров не пуст [6,9].

Среди методов четкой кластеризации наиболее эффективными оказались методы K-means и K-medoid, которые определяют принадлежность каждого набора характеристик процесса бурения одному из c кластеров, обеспечивая минимизацию в рамках кластера суммы квадратов [6,9]

$$\sum_{i=1}^c \sum_{k \in A_i} \|\psi_k - v_i\|_2 \quad (2)$$

где A_i — собой набор объектов (опорных точек) в i -го кластера; v_i — центр масс координат точек кластера i . Согласно алгоритму K-means кластеризации координаты центров кластеров вычисляются по формуле

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^{N_i} \psi_k}{N_i}, \psi_k \in A_i \quad (3)$$

где N_i – количество объектов в A_i .

Результат кластеризации измеренных характеристик процесса бурения, выполненной по алгоритму *K-means* приведен на рис. 5а.

Согласно методу *K-medoid* кластеризации центрами кластеров являются ближайшие объекты средних данных в одном кластере $V = \{V_i \in X | 1 \leq i \leq c\}$ [6,9]. Результат кластеризации, выполненной по алгоритму *K-medoid*, приведен на рис. 5б.

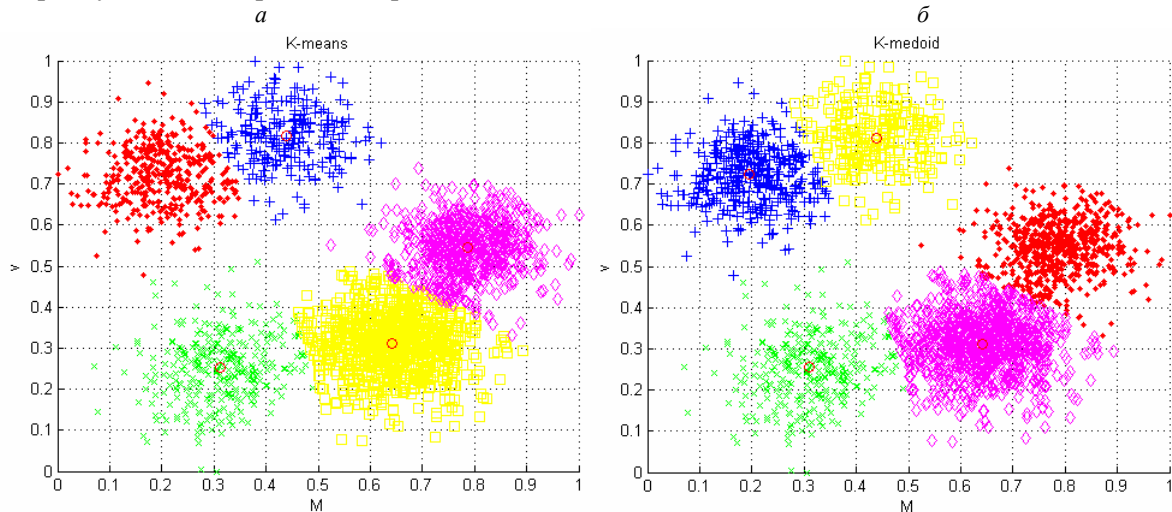


Рис. 5. Результат кластеризации характеристик процесса бурения: а - алгоритм *K-means*; б - алгоритм *K-medoid*

Качество алгоритмов кластеризации, как итерационных процессов, оценивалось по скорости достижения оптимума с заданной точностью за конечное число шагов.

Сходимость алгоритмов кластеризации характеристик процесса бурения проверялась при разбиении на близкое к оптимальному количество кластеров, что позволило не только оценить показатели сходимости, но и дополнительно проверить целесообразность проведенного ранее выбора количества кластеров.

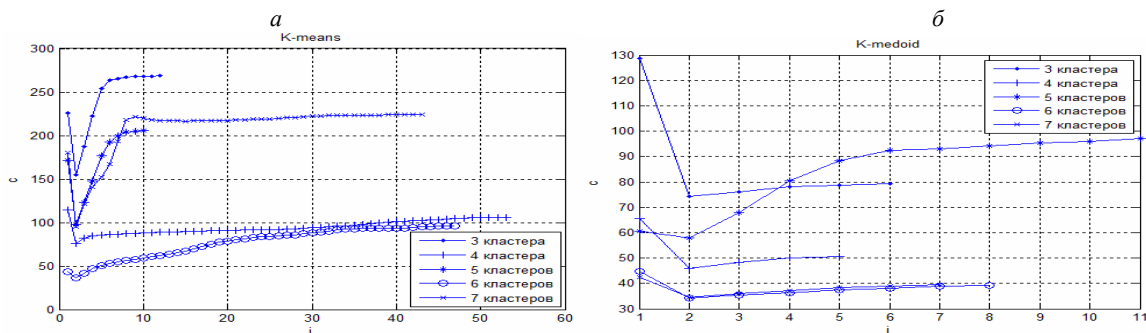


Рис. 6. Сходимость алгоритмов четкой кластеризации при различном количестве кластеров: а - *K-Means*; б - *K-Medoid*

Рассмотрим усредненные результаты оценки сходимости для исследуемых алгоритмов.

Результат оценки сходимости алгоритма кластеризации *K-Means* приведен на рис. 6а.

С точки зрения скорости сходимости, оптимальным является разбиение на 5 кластеров.

Минимальное значение целевой функции обеспечивает распределение на 6 кластеров.

Оценка сходимости алгоритма кластеризации *K-Medoid* представлена на рис. 6б.

Наилучший результат по скорости сходимости получен в результате разбиения на 4 кластера.

Вместе с тем, наименьшее среднее значение целевой функции алгоритма соответствует разбиению на 6 и 7 кластеров.

Сравнительная оценка результатов исследования скорости сходимости алгоритмов четкой и нечеткой кластеризации (рис. 7) показала, что наилучшие показатели сходимости имеют алгоритмы четкой кластеризации: 10-12 итераций.

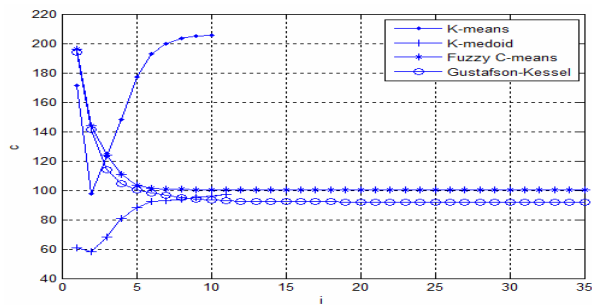


Рис. 7. Сходимость алгоритмов кластеризации при заданном количестве кластеров

Оперативное распознавание технологических разновидностей рудной породы на основе кластеризации косвенных признаков, полученных в результате мониторинга процесса бурения, позволит повысить точность автоматизированного управления бурением за счет использования расширенной геологической информации об определенных разновидностях.

Выводы и направления дальнейших исследований. Таким образом, при обработке и анализе текущей информации об оперативных характеристиках процесса бурения целесообразно с целью формирования модели геологической структуры рудной породы использовать результаты кластеризации таких характеристик процесса, как крутящий момент и скорость бурения, что позволит распознать разновидность породы в ходе технологического процесса.

Список литературы

1. Храменков В. Г. Автоматизация производственных процессов / В. Г. Храменков. – Томск: Томск. политех. университет, 2011. – 343 с.
2. Козловский Е.А. Оптимизация процесса разведочного бурения / Е.А. Козловский. - М.: Недра, 1975.-280 с.
3. Козловский Е.А. Механизация и оптимизация процессов бурения разведочных скважин / Е. А. Козловский, А. Д. Дьяков, П. А. Петров. - М.: Недра, 1980. - 349 с.
4. Scoble M. J. Correlation between Rotary Drill Performance Parameters and Borehole Geophysical Logging. Mining Science and Technology / M. J. Scoble, J. Peck, C. Hendricks. – 1989. – 8. – pp. 301-312.
5. Segui, J. B. Blast Design Using Measurement While Drilling Parameters. Fragblast /, J. B. Segui, , M. Higgins - 2002. - Vol. 6, No. 3 – 4. - pp. 287 – 299
6. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику / С.Д. Штовба. – Режим доступа: <http://matlab/exponenta.ru/fuzzylogic/book1>.
7. Balasko B. Fuzzy Clustering and Data Analysis Toolbox / Balasko B., Abonyi J., Feil B. – 74 p.
8. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под. ред. Д. А. Поспелова. – М.: Наука, 1986. – 312 с.
9. Bezdek J. C. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. Plenum Press, 1981.

Рукопис подано до редакції 16.03.15

УДК 622.73: 622.74

Т.А. ОЛІЙНИК, д-р техн. наук, проф.,

І.В. ХМЕЛЬ, аспірант, І.А. КОРЖАН, магістр, М.О. ОЛІЙНИК, аспірант

Криворізький національний університет

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ РУДОПІДГОТОВКИ НА ПАТ «ПівніГЗК»

Розглянуто проблему надлишкових енерговитрат при рудопідготовці магнетитових кварцитів публічному акціонерному товаристві «Північний гірничо-збагачувальний комбінат». Для детального вивчення цього питання на публічному акціонерному товаристві «Північний гірничо-збагачувальний комбінат» було проведено генеральне опробування технологічної схеми та виконано детальне дослідження всіх продуктів на предмет розкриття мінеральних зерен. За результатами дослідження були встановлені коефіцієнти розкриття рудних та нерудних мінералів за всією технологічною схемою збагачення магнетитових кварцитів на гірничо-збагачувальному комбінаті, зроблено аналіз та синтез отриманої інформації для розробки рекомендацій з вдосконалення процесу подрібнення та класифікації руди на комбінаті. Виявлено те, що розкриття є одним з головних факторів, що впливає на процесу рудопідготовки магнетитових кварцитів на публічному акціонерному товаристві «Північний гірничо-збагачувальний комбінат». Доведено, що при збагаченні корисних копалин основна роль подрібнення полягає в повному розкритті мінеральних зростків з утворенням вільних зерен компонентів для подальшого їх поділу за фізико-хімічними характеристиками.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Збагачення залізних руд за масштабами виробництва концентратів займає одне з перших місць у використанні і переробці мінеральної сировини. У даний час 86 % видобутих руд піддається збагаченню.