

Системно-аналитические исследования методов анализа и идентификации технического состояния сложных технических систем

Н. А. Таланов, В. С. Хлопонина

Санкт-Петербургский горный университет
s225027@stud.spmi.ru, khloponina_vs@pers.spmi.ru

М. С. Фёдоров

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
mfed.sibur@gmail.com

Аннотация. В данном исследовании рассмотрены методы анализа и идентификации технического состояния апатит-нефелиновых шахт. Проведены обзоры адаптивных, робастных, синергетических методов анализа и синтеза систем управления технологическими процессами. На основе проделанной работы сделан вывод о необходимости комплексного исследования горных сооружений на предмет выявления входных, выходных и результирующих факторов, на основе которых необходимо построение концептуальных моделей подземных сооружений. Также в работе показаны методы оценки экономической эффективности предприятий.

Ключевые слова: идентификация систем, измерения, системный анализ, датчики, апатит-нефелиновые руды

I. ВВЕДЕНИЕ

В течение многих лет вопрос освоения подземного пространства не единожды затрагивается в научных изысканиях в таких сферах, как геотехнология и геомеханика. Этот вопрос тесно связан с размещением в природных и техногенных нишах объектов производства и жизнеобеспечения. Также он является неотъемлемой частью проблемы комплексного освоения подземных недр. Научные разработки в сфере строительной геотехнологии, которая является неотъемлемой частью целого комплекса горных наук, имеют тенденцию повышать эффективность строительства и эксплуатации горных предприятий и подземных объектов за счет внедрения передовых методов строительства и проектирования, а также последующей выемки полезных ископаемых. Но помимо улучшения технологии строительства горных предприятий, важное место занимает проблема модернизации процесса эксплуатации, и, как следствие, оценки технического состояния и разработки современных технологических решений по поддержанию вышеуказанных предприятий и объектов. Поэтому на сегодняшний день является актуальной задача по разработке современных методов и моделей оценки технического состояния шахт и подземных сооружений.

II. АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Несмотря на развитие современных технологий, внедрить в существующую базу горнодобывающих предприятий – задача особо трудная. Это связано с тем, что в отраслях, связанных с добычей полезных ископаемых преобладает традиционная методология комплексного освоения месторождений, то есть ресурсные недра используются максимально полно.

Поэтому предпочтение отдается инновациям в областях строительства и разработки, в то время как уже существующие предприятия нуждаются современных мерах эксплуатации, которые, в свою очередь требуют тщательного системного анализа взаимодействующих друг с другом элементов горно-геологических схем. Исходя из этого, необходимо более гибкое управление разработкой недр с моделированием данных систем и осуществлением непрерывного мониторинга горно-геологических условий.

Высокая конкуренция в области создания постоянного спроса на продукцию промышленных предприятий требует внедрять более инновационные способы производства, которые ведут к получению более совершенного продукта, который удовлетворяет современным требованиям рынка [1]. Данный процесс требует постоянных капиталовложений. В рамках горного предприятия это затраты на строительство новых подземных объектов, закупку более современной строительной и горнодобывающей техники, применение инновационных методов проектирования и строительства и, конечно же, на поддержание уже существующих мощностей.

Разработка методологических основ системного подхода к оцениванию состояния шахт и подземных сооружений позволяет получить более полную картину для последующего технико-экономического анализа целесообразности инвестирования в данные объекты.

Инвестиции в мероприятия по поддержанию шахт и подземных сооружений в период их эксплуатации, порой достигают 50 % от стоимости их строительства [2]. В отечественной практике до сих пор используется стратегия планово-предупредительного ремонта, что само по себе не удовлетворяет современным тенденциям и ведет к неоправданно большим затратам. Поэтому разработка методики системного подхода к оценке технического состояния шахт и подземных сооружений дает возможность получать более полную картину для технико-экономического анализа целесообразности инвестирования в вышеупомянутые мероприятия по поддержанию подземных объектов.

Анализируя научные данные, можно сделать вывод, что при составлении стратегии ремонта подземных сооружений необходимо учитывать их конструктивное состояние, которое является определяющим при выборе времени, технологии и подсчете затрат на ремонт [3]. Данный метод основывается на мониторинге конструктивного состояния подземных сооружений,

прогнозе их долговечности, выборе оптимальных технологических схем производства и поддержания, которые работают в связке с уже существующими конструктивными решениями.

Взаимодействие подземных объектов с окружающей средой играет важную роль в создании мероприятий по поддержанию горных предприятий. Объекты и конструкции на горных предприятиях и подземных сооружениях воспринимают по-разному воздействие агрессивных внешних факторов. Чаще всего у них происходит снижение надежности. Это можно обосновать конкретными особенностями сооружений, их изначальными конструктивными недостатками, а также сочетанием различных нагрузок и воздействий [4].

Таким образом, разработка методов и моделей оценки шахт и подземных сооружений является чрезвычайно важной и актуальной, не только в процессе их эксплуатации, но также и при проектировании строительства. Также важной является задача научно обосновать внедрение соответствующих методик и стратегий по эксплуатации конструктивных элементов подземных горных выработок, а также создания технологических схем их ремонта, которые соответствуют условиям ведения добычных и строительных работ [5]. На сегодняшний день выполнение задач по обеспечению необходимого уровня надежности конструктивных элементов подземных горных выработок, а также контролирование расходов возможно только при осуществлении разработки современных методик и современных моделей оценки технического состояния вышеуказанных подземных объектов.

Если рассматривать уже существующий современный подход к проблеме комплексного освоения недр, то можно нетрудно заметить закономерность возрастания роли строительства, поддержания и реконструкции горных предприятий и подземных сооружений, из-за расширения самого понятия георесурсов, которое включает в себя, согласно классификации, действующие подземные объекты [6]. Если рассмотреть вопрос в таком ключе, то действующие подземные сооружения не только являются материальным ресурсом, но и дают возможность освоить иные ресурсы, которые могут возместить начальные затраты и привести к дополнительному экономическому эффекту.

Характерная черта горного предприятия – это необходимость постоянно увеличивать, а иногда и восстанавливать собственные мощности в течение всего срока эксплуатации. Поскольку данный процесс необходимо осуществлять непрерывно, глубина разработки постоянно возрастает, и, следовательно, ухудшаются горно-геологические условия, то и затраты на данные мероприятия постоянно увеличиваются [7]. И, несмотря на разрабатываемые меры по предупреждению сложных геомеханических, газодинамических и других проявлений, затраты на поддержание подземных конструкций продолжают оставаться чрезмерно высокими.

Фундаментальные закономерности, которые были установлены опытным путем, описывающие распределение нагрузок на конструкции обделок тоннелей, сами по себе являются той основой, которая предопределяет создание принципиально новых нормативных документов, которые будут базой для

проектов тоннелей, шахт и других подземных сооружений.

Диагностика состояния отдельных конструктивных элементов горных выработок является важной и неотъемлемой частью процесса мониторинга технического состояния горного предприятия. Фактические значения тех или иных контролируемых параметров, которые получают в результате процедуры диагностики, характеризуют дальнейшую пригодность объекта для эксплуатации, а также выявляют необходимость в проведении восстановительных ремонтных работ по усилению элементов несущих конструкций. Дефекты, которые не выявляются вовремя, ведут к возникновению аварийных и чрезвычайных ситуаций непосредственно в процессе эксплуатации горных предприятий и подземных сооружений.

Методики, на которые лежат в основе диагностики состояния конструктивных элементов подземных объектов сами по себе являются традиционными и гибкими.

При этом создание новой методологии, которая будет основываться на современных подходах к комплексной диагностике технического состояния объектов, увеличит срок их безопасной эксплуатации и поможет вовремя отследить и не допустить критических изменений в их состоянии. В сложных системах, если отказывает даже один элемент, есть вероятность возникновения очень серьезных последствий.

Условия, в которых функционируют шахты и другие подземные сооружения, а также результаты их работы, характеризуются довольно большим набором показателей. В [1–2, 4, 6] показаны факторы, описывающие внутренние характеристики подземных сооружений. В [3] показана линия внешних факторов окружающей среды на структуру и работоспособность шахтных комплексов. Сущность эксплуатации подземных сооружений сводится к оценке экономической целесообразности той или иной технологической схемы реконструкции, т.е. они являются по сути критериальными [8]. Однако в большинстве случаев оценка экономической эффективности проекта затруднена множеством случайных факторов. Которые существенно ограничивают и не дают возможности построения прогнозной модели.

Изменения в современной экономике и возникновение различных видов собственности, а также производство работ во все более сложных геологических условиях, помогают предопределить необходимость разработки новых методик проектирования строительства, эксплуатации и реновации подземных сооружений.

Условия, при которых осуществляется строительство горных предприятий, определяют большое количество таких методик. В литературе достаточно большое количество работ призывает учитывать множественные внутренние и внешние факторы. Вместе с тем большинство природных и антропогенных факторов имеют сложную иерархическую структуру подчиненности. Что накладывает ряд существенных ограничений на большую часть применяемых методов. Например, в [4–6] и в [8] показано, что сложно организованная структура может влиять на технологический процесс и приводить к сбоям в

технологическом режиме эксплуатации. В этой связи выходит в свет новое направление технического проектирования, а именно разработка и внедрение гибких управляемых технологических процессов при осуществлении строительства или реновации подземных сооружений [9].

Теоретическая основа отрасли горного производства не имеет под собой фундамента, современной базы геоинформации, которая могла бы результативно работать в системе автоматизированного проектирования строительства горных предприятий [10]. Создание этой базы данных приведет к взаимодействию со многими отраслями при освоении ресурсного потенциала месторождений.

В этих условиях имеет место быть задача по автоматизации самого проектирования подземного строительства. Этот процесс имеет цель внедрить машинное моделирование горнотехнических систем на этапе их проектирования и непосредственно в контуре управления производством.

Таким образом, достигается реализация эффекта адаптивности горнотехнических систем, и это явление должно происходить, включая в реальном времени [11]. Однако, к сожалению, есть основания полагать, что существующая методологическая база проектирования горнотехнических систем не всегда соответствует указанным требованиям. Многие авторы, рассматривая данные методы, считают о низкой степени достоверности полученных результатов. Это связано с высокой степенью субъективности полученных результатов.

Разрабатываемые методы проектирования и строительства горных предприятий соприкасаются с общей методологией освоения подземного пространства [12].

Это достигается тем путем, когда принимаемые решения соответствуют общим требованиям по сохранению недр, как видоизменяемого геологического ресурса. Степень такого соответствия оценивается с помощью специальных критериев, позволяющих спрогнозировать различные последствия принимаемых решений. Поэтому задачу по разработке методов оценки технического состояния шахт, можно рассматривать как поликритериальную.

Метод обобщенного (интегрального) критерия функционала является одним из наиболее распространенных и применяемых подходов для решения поликритериальных задач. Этот метод связывает результаты работы подземных сооружений с производственно-техническими, социальными и горно-геологическими условиями, а также с техническим прогрессом. В [7, 9] авторы достаточно подробно рассматривают применение данного метода при строительстве объектов минерально-сырьевого комплекса. Они рассматривают взаимосвязь между факторами, которые выражаются в количественной оценке при помощи интегральных функционалов.

Использование данного метода приводит к значительной дифференциации природных, социальных и технических условий. Динамичность этих условий в процессе выполнения работ приводит к разнообразным конечным результатам в производственно-хозяйственной деятельности шахт и других подземных сооружений [13].

Для задания изначальных параметров работы используются три комплекса критериев, которые описывают производственно-технические условия работы в действующих подземных сооружениях, технологичность геологических условий разработки и социальные условия [14].

Исходная информация по результатам работы шахт и подземных сооружений может быть задана в виде двух комплексных критериев, характеризующих экономическую эффективность и производственно-технический уровень.

В случае применения данного метода к шахтному проектированию или эксплуатации, а также реконструкции, необходимо учесть качество схем вскрытия и подготовки, а также уровень научно-технического прогресса.

Чтобы решить задачу и определить степень износа, уровень надежности и техническое состояние конструктивных элементов сооружений в целом, и усовершенствовать методы существующей обследовательской деятельности, необходимо связать воедино в математический аппарат технической диагностики вероятностно-статистические методы с включением в процедуру диагностирования элементов теории информации.

Для выявления закономерностей физического износа могут быть использованы следующие методы [15]:

1. факторный анализ и последовательные классификации для зонирования конструкций и выявления характерных повреждений;
2. статистические методы обработки диагностических данных для выявления скорости коррозии и абразивного износа отдельных конструктивных элементов;
3. ускоренные натурные и лабораторные испытания для того, чтобы выявить скорость коррозии в характерных точках;
4. метод анализа разрушения упругопластических систем для того, чтобы оценить, как влияют эксплуатационные повреждения на подземный исследуемый объект.

В сложных системах отказ одного элемента приводит к серьезным последствиям. Исходя из этого, в первую очередь необходимо осуществить выбор механических и конструктивных параметров системы, а также учесть их массу, надежность и объем.

Для решения подобных задач необходимо осуществлять оценку надежности конструктивных элементов еще на стадии проектирования.

Однако, принятое большинством проектирование основывается на использовании коэффициентов безопасности и запаса прочности, что само по себе не дает объективно предсказать отказ того или иного элемента. При условии выбора одного и того же коэффициента безопасности, вероятность отказа колеблется в широких диапазонах значений.

Для того чтобы связать вышеуказанные критерии в единую автоматическую систему, существующих методов недостаточно. На современном этапе развития автоматических систем управления возникает проблема рассмотрения объектов управления, имеющих

пространственные координаты, методов их исследования и анализа. Поэтому необходимо рассматривать каждый критерий более подробно и использовать современный математический аппарат, то есть обратиться к методологии систем с распределенными параметрами.

Вопросы энергосбережения при переработке минерального сырья занимают важное место в решении проблем минерально-сырьевого комплекса. Цветная металлургия также является огромной базой по разработке пространственно-распределенных систем управления. Например, задачи по повышению экономической эффективности электролизера Содерберга успешно решаются при помощи математического моделирования температурных полей с помощью пространственно-распределенной математической модели и проведением экспериментальных исследований. Результаты данных исследований могут использоваться при экспериментальном определении внутренних дефектов днища электролизера.

Для того чтобы произвести оценку технического состояния шахты, в самом начале необходимо оценить надежность конструктивных элементов на стадии проектирования.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проектирование подземных зданий и сооружений является трудоемкой и ресурсоемкой задачей. Разработка элементов и систем подземных сооружений должна отвечать всем требованиям безопасности и энергоэффективности. В современных условиях разработки систем автоматического управления, такая задача максимально оптимизирована. Однако, каждое подземное сооружение представляет собой набор уникальных элементов. Что сводит к минимуму возможность применения шаблонных технологии и применения возможных «клеше» для горной отрасли. В данном исследовании проведены некоторые возможные элементы автоматизации, обобщение которых в перспективе позволит создать общую структуру автоматизации шахт и подземных сооружений. В статье проанализированы методы робастного, адаптивного управления. Показаны методы аналитического и численного решения моделирования. Так же отмечены положительные и отрицательные стороны различных методов. Важно понимать, что существенным ограничением на применение существующих методов является пожаро-взрыво-безопасность. Данное ограничение существенно сокращает аппаратную часть применяемых технологий. Таким образом, по результатам данной статьи можно сделать вывод о необходимости всестороннего анализа горного предприятия, выявление закономерностей и алгоритмов функционирования предприятия, с целью построения его концептуальной модели. По проделанной работе видно, что только такой подход позволит масштабировать все предприятие целиком и разработать для него адекватный алгоритм функционирования.

- [1] Ilyushin Y.V. Development of a Process Control System for the Production of High-Paraffin Oil // *Energies* 2022, 15, 6462. <https://doi.org/10.3390/en15176462>
- [2] Sidorenko A.A., Dmitriev P.N., Alekseev V.Yu., Sidorenko S.A. Improvement of techno-logical schemes of mining of coal seams prone to spontaneous combustion and rockbumps // *Journal of Mining Institute*. 2023, p. 1-13. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.37>
- [3] Pershin I.M., Papush E.G., Kukharova T.V., Utkin V.A. Modeling of Distributed Control System for Network of Mineral Water Wells. // *Water* 2023, 15, 2289. <https://doi.org/10.3390/w15122289>
- [4] Kukharova T.V., Ilyushin Y.V., Asadulagi M.-A.M. Investigation of the OA-300M Electrolysis Cell Temperature Field of Metallurgical Production // *Energies* 2022, 15, 9001. <https://doi.org/10.3390/en15239001>
- [5] Polekhina V.S., Shestopalov M.Y., Ilyushin Y.Y. Identification of Magnetic Field Strength Realisation as a Necessary Solution for High-Quality Metal Synthesis // (2022) *Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2022*, pp. 831-833. DOI: 10.1109/EIConRus54750.2022.9755649
- [6] Olga Afanaseva, Oleg Bezyukov, Dmitry Pervukhin, Dmitry Tukeev. Experimental Study Results Processing Method for the Marine Diesel Engines Vibration Activity Caused by the Cylinder-Piston Group Operations // *Inventions* 2023, 8(3), 71; <https://doi.org/10.3390/inventions8030071>
- [7] Ilyushin Y.V., Kapostey E.I. Developing a Comprehensive Mathematical Model for Aluminium Production in a Soderberg Electrolyser // *Energies* 2023, 16, 6313. <https://doi.org/10.3390/en16176313>
- [8] Martirosyan A.V., Martirosyan K.V., Chernyshev A.B. Investigation of Popov's Lines' Limiting Position to Ensure the Process Control Systems' Absolute Stability // In *Proceedings of the 2023 XXVI International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*, Saint Petersburg, Russia, 24–26 May 2023; pp. 69–72. <https://doi.org/10.1109/SCM58628.2023.10159089>.
- [9] Martirosyan K.V., Chernyshev A.B., Martirosyan A.V. Application of Bayes Networks in the Design of the Information System "Mineral Water Deposit" // *Proceedings of the 2023 XXVI International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*, Saint Petersburg, Russia, 24–26 May 2023; pp. 236–239. <https://doi.org/10.1109/SCM58628.2023.10159085>.
- [10] Ereemeeva A.M., Ilyushin Y.V. Automation of the control system for drying grain crops of the technological process for obtaining biodiesel fuels // *Sci Rep* 13, 14956 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41962-0>
- [11] Marinina O., Nechitailo A., Stroykov G., Tsvetkova, A., Reshneva, E., Turovskaya, L. Technical and Economic Assessment of Energy Efficiency of Electrification of Hydrocarbon Production Facilities in Underdeveloped Areas // *Sustainability* 2023, 15, 9614. <https://doi.org/10.3390/su15129614>
- [12] Ereemeeva A.M., Kondrasheva N.K., Khasanov A.F., Oleynik I.L. Environmentally Friendly Diesel Fuel Obtained from Vegetable Raw Materials and Hydrocarbon Crude // *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 5. <https://doi.org/10.3390/en16052121>
- [13] Katysheva E. Analysis of the Interconnected Development Potential of the Oil, Gas and Transport Industries in the Russian Arctic // *Energies* 2023, 16, 3124. <https://doi.org/10.3390/en16073124>
- [14] Golovina E., Shchelkonogova O. Possibilities of Using the Unitization Model in the Development of Transboundary Groundwater Deposits // *Water (Switzerland)*, 2023, 15(2), 298. <https://doi.org/10.3390/w15020298>
- [15] Ilyushin Y.V., Novozhilov I.M. Methodology of inspection of absolute stability of pulse distributed control system // (2019). *Proceedings of 2019 22nd International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2019*, pp. 102-106. DOI: 10.1109/SCM.2019.8903839