

УДК 303.732.4

Обзорная статья

<https://doi.org/10.32603/2071-8985-2023-16-6-29-41>**Методологический анализ технических решений
повышения эффективности горного производства****И. М. Новожилов¹✉, Д. А. Первухин², Н. А. Таланов²**¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ novozhilovim@list.ru

Аннотация. Современные методики оценки технического состояния горных предприятий и подземных сооружений на данный момент не удовлетворяют при применении их на практике. Это обусловлено отсутствием инновационных методов проектирования и строительства, а также поддерживающих мер эксплуатации, которые предусматривают тщательный системный анализ при взаимодействии друг с другом отдельных элементов геотехнических систем. Цель статьи заключается в обзоре существующих достижений, ограничений и проблем в области разработки методов и моделей оценки технического состояния шахт и подземных сооружений, а также способов их решения, разрабатываемых в теории и реализуемых на практике. В статье решены следующие задачи: проведен анализ существующих методов и моделей оценки технического состояния шахт и подземных сооружений, выявлены ограничения и проблемы, как на теоретическом уровне, так и обнаруженные на практике, предложены пути их решения. В заключении приведены выводы исходя из методологического анализа.

Ключевые слова: математическая модель, система с распределенными параметрами, экономическая эффективность горных предприятий, горнотехнические системы, поликритериальные задачи

Для цитирования: Новожилов И. М., Первухин Д. А., Таланов Н. А. Методологический анализ технических решений повышения эффективности горного производства // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 6. С. 29–41. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-6-29-41.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

**Methodological Analysis of Technological Solutions Used
to Improve Mining Production Efficiency****I. M. Novozhilov¹✉, D. A. Pervukhin², N. A. Talanov²**¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia² Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

✉ novozhilovim@list.ru

Abstract. The methods currently used to assess the technical condition of mining enterprises and underground structures fail to meet the quality criteria in their practical application. This is related to a lack of innovative methods of design and construction, as well as supportive measures of operation, which could provide for a comprehensive analysis of interacting individual elements of geotechnical systems. In this work, we set out to

review the existing achievements and limitations in the field of development of methods and models for assessing the technical condition of mines and underground structures, including approaches to their practical implementation. To that end, we carried out an analysis of existing methods and models for estimating the technical condition of mines and underground constructions; identified limitations and problems in these methods, both theoretical and practical; and formulated possible solutions. Conclusions are presented based on the conducted methodological analysis.

Keywords: mathematical model, system with distributed parameters, economic efficiency of mining enterprises, mining systems, polycriteria problems

For citation: Novozhilov I. M., Pervukhin D. A., Talanov N. A. Methodological Analysis of Technical Solutions Used to Improve Mining Production Efficiency // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 6. P. 29–41. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-6-29-41.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. На протяжении последних лет научные разработки в таких сферах, как геотехнология и геомеханика, затрагивают проблему освоения подземного пространства. Данный вопрос тесно связан с размещением в природных и техногенных нишах различных объектов производства и жизнеобеспечения и является важной и неотъемлемой частью общемировой проблемы комплексного освоения подземных недр. Важное место в целом комплексе горных наук занимает строительная геотехнология. Она базируется на разработках в области химии, математики, теплотехники, экономики и др. Специфика этой области обуславливает тесное взаимодействие с инженерной геологией, гидрогеологией, со строительной механикой, экологией и правом. К ключевым направлениям исследований в строительной геотехнологии относятся строительство шахт и подземных сооружений, а также повторное освоение подземного пространства.

Научные исследования последних лет в сфере строительной геотехнологии направлены на повышение эффективности строительства и эксплуатации горных предприятий и подземных объектов. В силу указанного возникает тенденция внедрения более инновационных методов проектирования, строительства шахт, рудников и подземных сооружений. Однако помимо модернизации самого процесса строительства горных предприятий ключевое место занимает проблема их эксплуатации и поддержания, поэтому на сегодняшний день особенно важна разработка современных методов и моделей оценки технического состояния шахт и подземных сооружений.

Постановка задачи. Несмотря на развивающиеся современные технологии, горное производство по-прежнему остается одной из самых сложных и опасных отраслей. Внедрение в суще-

ствующую базу горнодобывающих предприятий инновационных проектных и технологических решений – задача особо трудная. Это связано с тем, что, несмотря на многие современные исследования, в отраслях, связанных с добычей полезных ископаемых, в большей степени преобладает традиционная методология комплексного освоения месторождений, т. е. максимальное использование ресурсных недр того или иного полезного ископаемого. Предпочтение отдается инновационным методам строительства и разработки, в то время как уже существующие горные предприятия нуждаются во внедрении современных поддерживающих мер эксплуатации, которые требуют тщательного системного анализа взаимодействующих друг с другом элементов горно-технологических систем.

Исходя из вышеперечисленного, необходимо более гибкое управление разработкой недр с моделированием этих систем и осуществлением непрерывного мониторинга изменений горно-геологических условий. Тогда с большей вероятностью будет можно прогнозировать изменения и корректировать различные технологические мероприятия по поддержанию объекта в течение всего срока его эксплуатации и отработки запасов. Однако разработку методики оценки технического состояния горных предприятий затрудняет недостаток выявленных комбинационных закономерностей изменений в долговечности подземных сооружений при взаимодействии в искусственно создаваемых системах (массив горных пород – подземное сооружение – человек). В то же время, многие исследования последних лет создали теоретические предпосылки для формирования вышеупомянутых методик. В данной статье ставится задача обзора существующих достижений, ограничений и проблем в области

разработки методов и моделей оценки технического состояния шахт и подземных сооружений, а также способов их решения, разрабатываемых в теории и реализуемых на практике. Данная задача актуальна по причине необходимости достижения позитивной динамики эксплуатации подземных объектов в условиях неопределенности и повышения экономической эффективности горнодобывающих предприятий.

Методология исследования. Ключевое место в повышении экономической эффективности шахт и подземных сооружений занимает разработка современных технологических решений по эксплуатации существующих предприятий. И один из шагов в решении вышеуказанных задач заключается в снижении затрат на крепление и поддержание горных выработок.

Сложность в том, что затраты на крепление и ремонт подземных объектов сами по себе достаточно велики и возрастают по мере увеличения глубины разработки. На поддержании выработок заняты более 15 % всех подземных рабочих. Следующим шагом становится уменьшение продолжительности крепления и ремонта подземных объектов. Однако проблема изначально обуславливалась не только сложными горно-геологическими и производственно-техническими условиями, но и применением дорогостоящих материалов в конструкциях крепей горных выработок.

С течением времени в сфере строительства горных предприятий и подземных сооружений произошел отказ от повсеместного применения дорогостоящих материалов при креплении выработок. Те же металлические арочные крепи стали выходить из повсеместного применения, уступив место конструкциям из более дешевых и в то же время эффективных материалов.

В настоящее время при строительстве горных выработок на шахтах и рудниках со значительным сроком эксплуатации применяется монолитная бетонная крепь. Ее применяют также при строительстве тоннелей метрополитена и других подземных сооружений.

Еще в середине XX в. достаточно остро встал вопрос о применении бетонных смесей при ведении подземных работ. На промышленных предприятиях в большинстве случаев просто не хватало необходимых мощностей, чтобы включить в их состав полноценные заводы по производству бетона, а некоторые из них, расположенные в горнолесистой местности или в условиях крайнего севе-

ра, просто не имели физической возможности разместить такие заводы на промплощадках.

Выход, казалось, был найден. У порталов шахт и рудников устраивались бетонорастворные узлы. Однако по мере углубления добычи полезных ископаемых, вскрытия новых добычных горизонтов увеличивалось плечо откатки и усложнялась логистика доставки бетонных смесей. Все это, в конечном счете, вело к увеличению продолжительности работ, экономическим затратам и снижению скорости проведения выработок.

На отдельных предприятиях были разработаны и реализованы проекты подземных заводов по производству бетона, которые достаточно успешно функционировали. Но после развала СССР содержание подобных объектов стало нерентабельно в связи со снижением объемов капитального строительства. А после появления различных подрядных организаций, которые полностью взяли на себя всю ответственность за производство и доставку бетона, подобная практика строительства практически перестала существовать. Но прежняя проблема по-прежнему остается актуальной.

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, 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, определяющее выбор времени, технологии при 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.

Исследователи тематики данного направления анализировали и конкретизировали опыты по данной проблематике, осуществляли теоретические исследования с использованием теорий надежности и случайных процессов при помощи методов математического моделирования, включая разработку самих моделей.

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 снижается их надежность. 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 чрезвычайно важна и актуальна не только в процессе их эксплуатации, но также и при проектировании строительства. Имеет большое значение и задача научной обоснованности стратегии по эксплуатации конструкций подземных сооружений, а также разработки технологий их ремонта, которые приспособлены к данным конкретным условиям [5]. На сегодняшний день поддержание конструкций подземных сооружений в необходимом уровне надежности, а также контроль затрат средств и ресурсов возможен только при разработке современных методов и моделей оценки.

Если рассматривать уже существующий современный подход к проблеме комплексного освоения недр, то 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, установленные опытным путем и описывающие распределение нагрузок на конструкции обделок тоннелей, сами по себе служат той основой, которая предопределяет создание принципиально новых нормативных документов, которые будут базой для проектов тоннелей, шахт и других подземных сооружений.

При проектировании и расчете инженерных конструкций подземных сооружений базой для современной методологии служат методы, которые основываются на строительной механике и механике твердо-деформированного тела [8]. Также следует помнить о сильных влияниях на напряженно-деформированное состояние (НДС) крепи различных сезонных колебаний температур, которые нередко возникают при строительстве и последующей эксплуатации горнодобывающих предприятий и подземных сооружений [9]. Наблюдения за взаимодействием крепи горных выработок с массивом окружающих пород стали базой для разработки новых методов расчета крепления и, в конечном счете, привели к появлению механики подземных сооружений как нового научного направления.

С помощью новых подходов появилась возможность при помощи математических моделей описать, как взаимодействуют различные виды и конструкции крепи подземных горных выработок с массивом горных пород, а также описать их НДС при всех различных нагрузках, которые испытывает система «крепь–массив» [10].

Внедрение различных новых материалов при осуществлении строительных работ необходимо для повышения такого критерия, как долговечность инженерных конструкций. Для этого требуется провести серию опытов, чтобы изучить кинетику комплекса процессов, протекающих при взаимодействии инженерной конструкции с массивом окружающих пород. В качестве примера подобных исследований изучался механизм переноса масс в бетоне конструкций подземных сооружений при диффузионном, капиллярном и фильтрационном потоках активных агрессивных веществ и кинетики коррозионных процессов [11].

Зарубежный опыт интеграции современных высоких технологий в производство говорит о том, что следует создавать и внедрять более современные способы производства работ, имеющие высокий уровень механизации, контролируемость и управление, а также повествует об органическом синтезе фундаментальных закономерностей горно-строительных процессов.

Если при креплении горной выработки сначала установить саму базовую крепь, а затем усилить ее различными вспомогательными элементами, то можно отследить разительное отличие в обеспечении устойчивости, поскольку необходимо привести в соответствие ее характеристики свойствам окружающего массива пород. Чтобы это осуществить, требуется определить сигнальные, минимальные и максимальные смещения кровли выработки, а уже затем установить базовую крепь, у которой несущая способность соответствует минимальным смещениям на всем протяжении кровли горной выработки.

После внедрения в горное производство крепи регулируемого сопротивления стало возможным исключить необоснованно большие запасы прочности крепи горной выработки там, где горно-геологические условия наиболее благоприятны, а в слишком неблагоприятных условиях, наоборот, увеличить несущую способность горной выработки, тем самым предотвратив разрушение и дальнейшее перекрепление кровли [12].

В итоге данная методика крепления стала той базой, при которой была создана более гибкая технология в строительстве горных предприятий и подземных сооружений, которая сберегает средства и ресурсы. А апробация данного разработанного метода непосредственно на производстве, в конечном счете, подтвердила его эффективность.

Исходя из множества научных изысканий, которые в течении всего времени были неотъемлемой частью строительства и эксплуатации горнодобывающих предприятий, выявлен целый перечень зависимостей. К ним можно отнести изменение температуры вмещающих пород на контурах подземных сооружений большого сечения; развитие горного давления в массиве горных пород, НДС железобетонных обделок стен камер и распорных ригелей [13].

Так как освоение подземного пространства крупных городов велось и ведется, то на свет вышла задача обосновать способы и схемы технологии реконструкции и восстановления подземных сооружений для увеличения срока их службы или повторного использования с новым функциональным назначением.

Поскольку подземные сооружения работают в различных горно-геологических условиях и при разных состояниях окружающей среды, то ключевую роль в осуществлении задуманного играет диагностика инженерных конструкций подземных сооружений.

В фундамент подхода к оцениванию состояния конструкций подземных сооружений заложены закономерности изменения качества строительных материалов и конструкций во времени при их непосредственном взаимодействии с окружающей средой, выявив качества, лежащие в основе взаимосвязи состояния окружающей среды и долговечности бетона и железобетона.

На основе вышеперечисленного была разработана методология регламентируемой системы измерений, осуществлен особый контроль технического состояния подземных сооружений. Он непосредственно учитывает влияние горного давления, геологического строения, физико-механических свойств вмещающих горных пород, температуры вмещающих пород, обделки и внутренних железобетонных конструкций, воздуха в камерах, их влажности. Это стало основами прогнозирования устойчивости и надежности подземных сооружений.

Однако уже существующие нормативные методики определения технического состояния кон-

струкций представляют собой своего рода методические указания, которые не учитывают характер реальной нагрузки элементов этих сооружений. Чаще всего место физического износа конструкции располагается в труднодоступном месте. Из-за этого порой очень трудно выявить аварийное состояние, а в ряде случаев это вообще невозможно [14].

Обследование подземных сооружений – это достаточно ответственная процедура диагностирования их технического состояния. На основании полученных в результате технического обследования фактических значений контролируемых параметров оценивается пригодность объекта для дальнейшей эксплуатации, а также необходимость восстановления, реконструкции, усиления или ремонта элементов несущих конструкций. Дефекты, которые не были выявлены вовремя, приводят к авариям в процессе их эксплуатации.

Существующий научный и производственный опыт, на котором базируется большинство методик определения фактического состояния конструктивных элементов объектов различных подземных сооружений, является весьма традиционным и гибким.

При этом разработка и внедрение новых методик и моделей, основанных на современных подходах к комплексному определению фактического состояния объектов, безусловно, продлит их безопасную эксплуатацию и поможет вовремя отследить критические изменения в их состоянии и не допустить их. 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. При постановке задач экономической направленности, как и основные показатели, которые характеризуют условия работы действующих подземных конструкций, так и показатели, характеризующие результат их работы, чаще всего помогают оценить относительную прогрессивность и экономическую целесообразность той или иной технологической схемы реконструкции, т. е. они по сути критериальны [15].

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

Отсутствие необходимых исследований в области оценки технического состояния горных предприятий подчеркивает необходимость и объективную нужду в попытке создать типы различных горно-геологических условий строительства и последующей эксплуатации подземных сооружений, методов подготовки и способов воздействия на массив горных пород. Все вышеперечисленное может послужить той самой основой процесса подготовки исходных данных для анализа и оценки проектирования строительства или реновации шахт и подземных сооружений.

Условия строительства горнодобывающих предприятий характеризуются множеством переменных. Сначала идут природные, затем антропогенные и их взаимодействие – техногенные факторы. Комбинации, которые получаются при их взаимодействии, показывают специфику требований к способам их строительства, эксплуатации или повторного использования. Обилие факторов, которые могут повлиять на данную систему, приводит к нарушению проектного технологического режима. В связи с этим выходит в свет новое направление технического проектирования – разработка и внедрение гибких управляемых технологических процессов при осуществлении строительства или реновации подземных сооружений [16].

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 [17]. Создание этой базы данных приведет к взаимодействию со многими отраслями при освоении ресурсного потенциала месторождений.

В этих условиях особенно важна задача 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 будет реализован эффект адаптивности горнотехнических систем, в том числе в реальном масштабе времени [18]. Но, к сожалению, возникают основания утверждать, что современная методологическая база проектирования горнотехнических систем далеко не всегда отвечает вышеизложенным требованиям.

Разрабатываемые методы проектирования и строительства горных предприятий сопрягаются с общей методологией освоения подземного пространства [19].

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

Метод обобщенного (интегрального) критерия функционала – это один из наиболее распространенных и применяемых методов решения поликритериальных задач.

Эта методика связывает результаты работы подземного сооружения с производственно-техническими, социальными и горно-геологическими условиями, техническим прогрессом, а их взаимосвязь выражается в количественной оценке при помощи интегральных функционалов.

Из-за этого наблюдается большая дифференциация природных, социальных и технических условий, а их динамичность в процессе производства работ приводит к различным конечным результатам в производственно-хозяйственной деятельности шахт и других подземных сооружений [20].

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 [21].

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 к 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, а также усовершенствовать методы существующей обследовательской деятельности, необходимо связать воедино в математический аппарат технической диагностики вероятностно-стати-

стические методы с включением в процедуру диагностирования элементов теории информации.

Для установления основных закономерностей физического износа могут быть использованы следующие методы [22]:

– факторный анализ в виде последовательных классификаций – для характерных эксплуатационных повреждений и зонирования конструкций;

– статистические методы обработки диагностических данных – для определения условных скоростей коррозионного и абразивного износа элементов конструкций;

– ускоренные натурные и лабораторные испытания – для определения скоростей коррозии в характерных точках;

– метод анализа разрушения упругопластических систем – для оценки влияния эксплуатационных повреждений.

Если откажет даже один элемент в сложной системе, то возможны серьезные последствия. Поэтому в первую очередь необходимо выбрать механические и конструктивные параметры системы, а также учесть следующие факторы: надежность, масса, стоимость и объем [23].

Чтобы решить эту задачу, в самом начале необходимо оценить надежность элементов на стадии проектирования.

Общепринятое проектирование, в основе которого лежит применение коэффициентов безопасности и запаса прочности, не дает возможности оценить вероятность отказа элемента. И даже если брать один и тот же коэффициент безопасности, то возможность отказа сильно колеблется в широких пределах.

Ну а дефекты конструктивных элементов часто представляют собой случайные величины, что полностью игнорируется при обычных методах проектирования. С учетом анализа надежности обычный подход к проектированию конструктивных параметров как к детерминированным величинам неудовлетворителен.

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, т. е. обратиться к методологии систем с распределенными параметрами.

Применение данных методик показало себя на деле при автоматизировании процесса нефтедобычи.

Технологический цикл нефтедобывающей отрасли характеризуется высокой сложностью и подлежит автоматизации и оптимизации. Применение методики синтеза систем с распределенными параметрами зарекомендовало себя при моделировании насосно-компрессорной трубы (НКТ) нефтяной скважины [24]. Предложенные наработки по управлению температурным полем НКТ при добыче высокопарафинистой нефти позволяют значительно снизить итоговую стоимость разработки нефтяных месторождений и последующие затраты на их эксплуатацию [25]–[27]. А применение модифицированного критерия Найквиста в исследованиях Ю. В. Ильюшина и М. Ю. Шестопалова при анализе импульсно-распределенных систем привело к созданию термобура с импульсными секционными нагревателями, что позволило снизить стоимость добычи высокопарафинистой нефти на 5 % [28].

Внедрение методов синтеза систем с распределенными параметрами показало эффективность не только в добыче полезных ископаемых, но и в бурении. Техническая реализация бортовой параллельной системы неуправляемого подводного аппарата, а также предложенный алгоритм, который обеспечивает распараллеливание навигационной задачи, и разработанная для этого микросхема существенно сократили время расчета координат подхода подводной буровой установки к месту залегания разрабатываемого пласта [29]. Разработанное же программное обеспечение для моделирования поведения теплового поля в колонковом буре при бурении сделало возможным анализ скорости прохождения бура через сложные геологические условия [30]. Также разработка синтезированной системы импульсного управления температурным полем буровых шнеков при получении горячей минеральной воды Кисловодского месторождения исключила снижение качества получаемого продукта в процессе добычи [31].

Для того чтобы оценить техническое состояние шахты, в самом начале необходимо определить надежность конструктивных элементов на стадии проектирования.

Общепринятое проектирование, в основе которого лежит применение коэффициентов безопасности и запаса прочности, не дает возможности оценить вероятность отказа элемента. И даже если брать один и тот же коэффициент безопасности, то возможность отказа сильно колеблется в широких пределах [32].

Ну а дефекты конструктивных элементов – это часто случайные величины, что полностью игнорируется при обычных методах проектирования. Обычный подход к проектированию конструктивных параметров как к детерминированным величинам не удовлетворителен с точки зрения анализа надежности.

Управляемая ресурсосберегающая технология крепления горной выработки заключается в предварительном определении качественной и количественной оценки реализации механических процессов по ее длине в процессе строительства, эксплуатации и повторного использования; последовательном выборе параметров базовой крепи и крепи усиления для каждого конкретного участка, а также непрекращающемся геомониторинге, который обеспечивает обратную связь в системе «массив – технология – подземное сооружение».

Проконтролировать устойчивость подземного сооружения в процессе его срока службы можно инструментально по сигнальным смещениям. Данный критерий получается в результате анализа деформационных процессов вокруг выработки и учитывает различные параметры установленного базового крепления.

Чтобы проконтролировать различные опасные проявления, можно пользоваться методологией применения нейронных сетей и нейронечеткой модели.

Вследствие всего вышеуказанного возникает необходимость создания новой методики оценки технического состояния подземных объектов, в основе которой заложены поддержание оптимального режима производственного процесса в системе «массив – технология – подземное сооружение», а также гибкое реагирование на поведение окружающей среды, основанное на оперативном регулировании различных параметров по данным непрерывного контроля. Данная методика могла бы учесть вероятностный характер поведения конструктивных параметров во времени с тем, чтобы надежность элементов можно было прогнозировать еще на этапе проектирования.

Обсуждение. В последние годы научные изыскания в сфере геотехнологии и геомеханики ясно дают понять, что настоятельно необходимо повысить эффективность строительства и эксплуатации шахт и подземных сооружений.

Несмотря на развитие современных технологий, применение инновационных методов проектирования и строительства, а также высокий уро-

вень механизации работ, горное производство остается по-прежнему одной из самых опасных сфер промышленности. Однако горные предприятия характеризуются не только возникновением опасных природных и техногенных явлений, но и огромными экономическими затратами в периоде их существования.

Только на поддержание существующих мощностей уходит до 50 % капиталовложений. На работах по реконструкции и поддержанию тех же крепей горных выработок заняты 15 % рабочего состава горнодобывающего предприятия. Да, происходит переход на более дешевые материалы для крепления. С внедрением крепи регулируемого сопротивления появилась возможность отказаться от применения дорогостоящих металлических конструкций крепей горных выработок и внедрить аналоги из более дешевого материала, например бетона. В настоящее время применение бетонных смесей носит массовый характер, но с увеличением глубины разработки месторождения усложняется логистика доставки бетонной смеси к месту ведения строительных работ.

Более того, с распадом СССР большинство горнодобывающих предприятий отказалось от собственного производства бетона – строить, а затем содержать собственные бетонные заводы стало нерентабельно. Поэтому за производство и доставку бетонной смеси к местам ведения работ взялись различные подрядные организации. При этом процент капиталовложений если и снизился, то незначительно, поскольку стоимость услуг данных компаний колеблется в зависимости от ситуации на мировом рынке.

Не стоит забывать и об устаревших технологиях и методиках управления горными предприятиями в процессе их эксплуатации. Существующие методы показали невозможность с определенной вероятностью предсказать проявление различных факторов во время эксплуатации предприятия.

Поэтому на сегодняшний день набирает актуальность создание методик, позволяющих предусмотреть возникновение различных производственных ситуаций не только на стадии эксплуатации, но и в процессе проектирования самого горного предприятия. Иными словами, необходима разработка более современных методов и моделей оценки технического состояния шахт и подземных сооружений.

Данное явление наблюдается только при условии применения инновационных методов проектирования и строительства, а после их осу-

ществления необходимо разработать поддерживающие меры эксплуатации, которые предусматривают тщательный системный анализ при взаимодействии друг с другом отдельных элементов геотехнических систем, а также активное внедрение передовых конструктивных и технологических решений, основанных на современных методиках упрочнения массива, эффективных материалов шахтной крепи, а также передовых схем проведения горных выработок.

Современные методики анализа технического состояния горных предприятий и подземных сооружений на данный момент не удовлетворяют требованиям при применении их на практике.

В связи с разработкой и апробацией новых методов и моделей оценки технического состояния различных подземных сооружений и шахт можно говорить о том, что открывается возможность объединить традиционные наработки с более современными для выявления и установления комбинационных закономерностей изменений в долговечности подземных сооружениях при взаимодействии.

Научные изыскания в данной области помогли выявить пути развития в методологии анализа технического состояния действующих подземных сооружений и сооружений, которая еще только проектируется.

Необходимо добиться того, чтобы ресурсные возможности могли удовлетворять запросам современного потребителя и включали в себя потенциальную возможность оптимизации решений, начиная с анализа исходных данных, закладываемых в проект, и заканчивая функциональными характеристиками подземного сооружения и способами строительства и реконструкции с учетом последних достижений науки и техники.

Несмотря на то, что направления для решения указанных проблем уже намечены и постепенно приносят положительные результаты, данная область исследований остается актуальной и требует к себе повышенного внимания.

Желаемые наработки по комбинации и рекомбинации закономерностей для улучшения методов анализа еще не достигнуты и исследования в данной области следует продолжать. Существующие направления анализа методологии оценки проектных решений строительства новых и обновления действующих подземных сооружений представляются верными, но не выработанными до конца.

Видятся целесообразными дальнейшие наработки по созданию усовершенствованных мето-

дов и моделей оценки технического состояния с целью повышения точности оценки прочности, долговечности и устойчивости подземных инженерных конструкций.

Потребность в высокоточных методах оценки технического состояния подземных сооружений остается велика еще и в связи с экономической значимостью. Разработка на основе создания новых моделей и методов и их комбинационного взаимодействия с уже известными методами в этом отношении представляется наиболее перспективным направлением исследований. Таким образом, тема статьи остается актуальной.

Заключение. На основе результатов исследования существующих методов и моделей оценки технического состояния шахт и подземных сооружений можно сделать следующие выводы:

1. Научная проблема, которая имеет немаловажное значение для отрасли горного производства, на сегодняшний день – это создание научно-обоснованной методологии анализа действующих различных подземных сооружений и проектирования строительства новых, которое позволяет с единых позиций реализовывать их видоизменяемое функциональное назначение применительно к различным горно-геологическим условиям, технологическим и техническим требованиям, а также экологическим, экономическим и социальным факторам.

2. Поддержание оптимального режима производственного процесса в системе «массив – технология – подземное сооружение», а также ос-

новные конструктивные и технологические параметры управляемых благодаря аналитическим методам технологий, в том числе при креплении и перекреплении горных выработок как наиболее сложном технологическом процессе, основываются на гибком реагировании к поведению окружающей среды посредством оперативного регулирования различных параметров по данным непрерывного контроля.

3. По результатам анализа различных научных публикаций был сделан вывод о том, что традиционные методы и модели по оценке технического состояния вариативных подземных сооружений нуждаются в доработке, так как не дают полного системного представления в отношении периодов, объемов и сроков выполнения строительных или ремонтных работ.

4. Необходим переход на качественно новый уровень развития разработки по результатам исследований моделей оценки технического состояния, базирующихся на сведениях воедино в математическую модель процедур диагностирования по средствам вероятностно-статистических методов и элементов теории информации.

5. В связи с изменениями экономических взаимоотношений технические параметры, связанные с производством работ во все более усложняющихся геологических условиях, должны помогать определять объективную необходимость формирования новых методологических подходов к проектированию строительства, эксплуатации и реновации подземных сооружений.

Список литературы

1. Анализ и идентификация электромагнитных полей пространственно распределенных систем управления / И. М. Новожилов, О. А. Беляевский, Ю. В. Ильюшин, Т. В. Кухарова, Е. М. Михайлова // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 2. С. 41–50. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-2-41-50.

2. Спиридонова О. А., Толкачева А. С. Основные направления и тенденции совершенствования технических решений по прогнозу устойчивости откосных сооружений и бортов карьеров // Россия молодая: сб. докл. III Всерос., 56 науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава ун-та. Кемерово: Кузбас. ГТУ им. Т. Ф. Горбачева. 2011. С. 134–136.

3. Антонов М. А., Оганесян Н. К., Агафонов В. В. Адаптация методов оптимизации многофакторных задач и специальных методов оптимизации сложных систем к технологическим схемам угольных шахт // ГИАБ. Горный информ.-аналит. бюл. 2014. № 11. С. 367–371.

4. Боркин В. С. Особенности системного анализа и моделирования потенциально опасных операций технологических процессов // Горный информ.-аналит. бюл. (науч.-техн. журн.). 2014. № 1. С. 370–374.

5. Дуарте А. Т., Мануэль Ф. Системный анализ и управление рисками горно-геологических программ изучения и освоения алмазоносных месторождений // Горный информ.-аналит. бюл. (науч.-техн. журн.). 2014. № 5. С. 417–423.

6. Айнбиндер И. И., Овчаренко О. В. Особенности геомеханического состояния массива горных пород на глубоких горизонтах рудников «Интернациональный» и «Мир» // Горный информ.-аналит. бюл. (науч.-техн. журн.). 2020. № 11. С. 57–69. doi: 10.25018/0236-1493-2020-11-0-57-69.

7. Простов С. М., Никулин Н. Ю. Исследование рациональной области применения георадиолокационного мониторинга // Вестн. Кузбасского гос. техн. ун-та. 2012. № 3. С. 15–18.

8. Соколов М. В., Простов С. М. Моделирование геомеханических процессов при неравномерном оседании оснований сооружений // Вестн. Кузбасского гос. техн. ун-та. 2017. № 1. С. 15–25.
9. Биргер И. А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
10. Andreev B. M., Brovko D. V., Khvorost V. V. Prediction and ensuring the reliability of buildings elements and structures of surface complex at reconstruction // Metallurgical and Mining Industry. 2016. № 9. С. 54–57.
11. Алексеева Л. Б., Уваров В. П. Виртуальное моделирование непрерывных технологических процессов при решении задач управления // Горный информ.-аналит. бюл. (науч.-техн. журн.). 2014. № 4. С. 298–302.
12. Бахвалов Л. А., Цацорин Е. А. Управление потоками данных в кластерных информационных системах // Горный информ.-аналит. бюл. (науч.-техн. журн.). 2014. № 6. С. 331–335.
13. Lein J. The design of rack shafts in clay formulations without friction with consideration of time // Purchase research booklets. 1980. Т. 41. № 2. С. 51–56.
14. Капутин Ю. Е. Горные компьютерные технологии и геостатистика. М.: Недра, 2002. 424 с.
15. Малюк В. И., Радаев А. Е., Силкина Г. Ю. Методика обоснования характеристик процесса развития промышленных предприятий с использованием средств оптимизационного моделирования // Науч.-техн. ведомости Санкт-Петербургского гос. политехнич. ун-та. Экономические науки. 2018. Т. 11. № 6. С. 195–211.
16. Гаврилова Т. А., Червинская К. Р. Извлечение и структурирование знаний для экспертных систем. М.: Радио и связь, 1992. 200 с.
17. Барон Л. Н., Глотман Л. Б., Меньшиков А. Н. Методика определения контактной прочности горных пород. М.: ИГД им. Скопинского, 1967. 24 с.
18. Основные принципы и методические подходы к инженерно-геологическому и геомеханическому районированию в целях оптимизации работ по закреплению/стабилизации уступов карьера на примере массива пород рудника «Железный» ОАО «Ковдорский ГОК» / Д. В. Жиров, В. А. Сохарев, В. В. Рыбин, С. А. Климов, Г. С. Мелихова // ГИАБ. Горный информ.-аналит. бюл. 2014. № 8. С. 45–57.
19. Ильюшин А. А. Механика сплошной среды. М.: МГУ, 1971. 248 с.
20. Петренко Е. В. Освоение подземного пространства. М.: Недра, 1988. 148 с.
21. Савин И. И., Свиридкин И. И., Лукашин С. Б. Диагностика крепи эксплуатируемых и законсервированных вертикальных шахтных стволов // Изв. Тульского гос. ун-та. Науки о Земле. 2012. № 1. С. 177–181.
22. Казикаев Д. М., Сергеев С. В. Диагностика и мониторинг напряженного состояния крепи вертикальных стволов. М.: Горная книга, 2011. 244 с.
23. Ильюшин Ю. В. Методы импульсного управления объектами с распределенными параметрами: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. Пензенский гос. ун-т, 2012. 170 с.
24. Анализ и идентификация тепловых полей пространственно распределенных систем управления / М. Ю. Шестопалов, И. М. Новожилов, А. Н. Ильюшина, Ю. В. Ильюшин // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. № 9. С. 61–71.
25. Ильюшин Ю. В. Анализ пространственно-распределенных температурных полей импульсной системы управления добычей высокопарафиновой нефти // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2018. № 5(199). С. 174–186. doi: 10.23683/2311-3103-2018-5-174-186.
26. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2018663073 РФ. Расчет температурного поля, создаваемого импульсными нагревательными элементами в колонне насосно-компрессорной трубы нефтедобывающей скважины / Ю. В. Ильюшин, О. В. Афанасьева; заявитель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». Заявл. 25.09.201; опубл. 19.10.2018.
27. Ильюшин Ю. В., Шестопалов М. Ю. Применение модифицированного критерия Найквиста для анализа импульсных распределенных систем // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. № 3. С. 42–46.
28. Ильюшин Ю. В., Новожилов И. М., Шестопалов М. Ю. Методика и система управления позиционированием геологоразведочного подводного аппарата // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. № 7. С. 57–61.
29. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2017663220 РФ. Расчет температурных характеристик колонкового бура / Ю. В. Ильюшин, О. В. Афанасьева; заявитель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». Заявл. 06.10.2017; опубл. 27.11.2017.
30. Ильюшин Ю. В., Трушников В. Е. Разработка импульсного управления температурным полем буровых шнеков добычи горячей минеральной воды кисловодского месторождения нарзана // Горный информ.-аналит. бюл. (науч.-техн. журн.). 2014. № 2. С. 172–181.
31. Демин В. Ф., Демина Т. В. Оценка параметров дефектности подготовительных выработок в зависимости от горно-технологических условий эксплуатации // Горный информ.-аналит. бюл. (науч.-техн. журн.). 2014. № 1. С. 5–11.
32. Влияние напряжений на устойчивость при сопряжении выработок в зависимости от горно-технологических параметров разработки / В. Ф. Демин, А. Е. Судариков, Т. В. Демина, Ю. Ю. Стефлюк, В. В. Демин // ГИАБ. Горный информ.-аналит. бюл. 2014. № 8. С. 5–14.

Информация об авторах

Новожилов Игорь Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: novozhilovim@list.ru

Первухин Дмитрий Анатольевич – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой системного анализа и управления Санкт-Петербургского горного университета, 21-я линия, д. 2, ВО, Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: pervukhin_da@pers.spmi.ru

Таланов Николай Александрович – аспирант кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского горного университета, 21-я линия, д. 2, ВО, Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: s225027@srud.spmi.ru

References

1. Analiz i identifikacija jelektromagnitnyh polej prostranstvenno raspredelennyh sistem upravlenija / I. M. Novozhilov, O. A. Beljaevskij, Ju. V. Il'jushin, T. V. Kuharova, E. M. Mihajlova // *Izv. SPbGETU «LET»*. 2022. T. 15, № 2. S. 41–50. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-2-41-50. (In Russ.).
2. Spiridonova O. A., Tolkacheva A. S. Osnovnye napravlenija i tendencii sovershenstvovanija tehniceskikh reshenij po prognozu ustojchivosti otkosnyh sooruzhenij i bortov kar'erov // *Rossija molodaja: sb. Dokl. III Vseros., 56 nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i professorsko-prepodavatel'skogo sostava un-ta. Kemerovo: Kuzbas. GTU im. T. F. Gorbacheva*. 2011. S. 134–136. (In Russ.).
3. Antonov M. A., Oganessian N. K., Agafonov V. V. Adaptacija metodov optimizacii mnogofaktornyh zadach i special'nyh metodov optimizacii slozhnyh sistem k tehnologicheskim shemam ugol'nyh shaht // *GIAB. Gornyj inform.-analit. bjul.* 2014. № 11. S. 367–371. (In Russ.).
4. Borkin V. S. Osobennosti sistemnogo analiza i modelirovanija potencial'no opasnyh operacij tehnologicheskikh processov // *Gornyj inform.-analit. bjul. (nauch.-tehn. zhurn.)*. 2014. № 1. S. 370–374. (In Russ.).
5. Duarte A. T., Manujel' F. Sistemnyj analiz i upravlenie riskami gorno-geologicheskikh programm izuchenija i osvoenija almazonosnyh mestorozhdenij // *Gornyj inform.-analit. bjul. (nauch.-tehn. zhurn.)*. 2014. № 5. S. 417–423. (In Russ.).
6. Ajnbinder I. I., Ovcharenko O. V. Osobennosti geometricheskogo sostojanija massiva gornyh porod na glubokih gorizontah rudnikov «Internacional'nyj» i «Mir» // *Gornyj inform.-analit. bjul. (nauch.-tehn. zh.)*. 2020. № 11. S. 57–69. doi: 10.25018/0236-1493-2020-11-0-57-69. (In Russ.).
7. Prostov S. M., Nikulin N. Ju. Issledovanie racional'noj oblasti primenenija georadiolokacionnogo monitoringa // *Vestn. Kuzbasskogo gos. tehn. un-ta*. 2012. № 3. S. 15–18. (In Russ.).
8. Sokolov M. V., Prostov S. M. Modelirovanie geometricheskikh processov pri neravnomernom osedanii osnovanij sooruzhenij // *Vestn. Kuzbasskogo gos. tehn. un-ta*. 2017. № 1. S. 15–25. (In Russ.).
9. Birger I. A. *Tehnicheskaja diagnostika*. M.: Mashinostroenie, 1978. 240 s. (In Russ.).
10. Andreev B. M., Brovko D. V., Khvorost V. V. Prediction and ensuring the reliability of buildings elements and structures of surface complex at reconstruction // *Metallurgical and Mining Industry*. 2016. № 9. S. 54–57.
11. Alekseeva L. B., Uvarov V. P. Virtual'noe modelirovanie nepreryvnyh tehnologicheskikh processov pri reshenii zadach upravlenija // *Gornyj inform.-analit. bjul. (nauch.-tehn. zhurn.)*. 2014. № 4. S. 298–302. (In Russ.).
12. Bahvalov L. A., Cacorin E. A. Upravlenie potokami dannyh v klasternyh informacionnyh sistemah // *Gornyj inform.-analit. bjul. (nauch.-tehn. zhurn.)*. 2014. № 6. S. 331–335. (In Russ.).
13. Lein J. The design of rack shafts in clay formulations without friction with consideration of time // *Purchase research booklets*. 1980. T. 41. № 2. S. 51–56.
14. Kaputin Ju. E. *Gornye komp'juternye tehnologii i geostatistika*. M.: Nedra, 2002. 424 s. (In Russ.).
15. Maljuk V. I., Radaev A. E., Silkina G. Ju. Metodika obosnovanija harakteristik processa razvitija promyshlennyh predpriyatij s ispol'zovaniem sredstv optimizacionnogo modelirovanija // *Nauch.-tehn. vedomosti Sankt-Peterburgskogo gos. politechn. un-ta. Jekonomicheskie nauki*. 2018. T. 11. № 6. S. 195–211. (In Russ.).
16. Gavrilova T. A., Chervinskaja K. R. *Iz vlechenie i strukturirovanie znaniy dlja jekspertnyh sistem*. M.: Radio i svjaz', 1992. 200 s. (In Russ.).
17. Baron L. N., Glotman L. B., Men'shikov A. N. *Metodika opredelenija kontaktnoj prochnosti gornyh porod*. M.: IGD im. Skochinskogo, 1967. 24 s. (In Russ.).
18. Osnovnye principy i metodicheskie podhody k inzhenerno-geologicheskomu i geometricheskomu rajonirovaniju v celjah optimizacii rabot po zakrepleniju/stabilizacii ustupov kar'era na primere massiva porod rudnika «Zheleznyj» OAO «Kovdorskij GOK» / D. V. Zhirov, V. A. Soharev, V. V. Rybin, S. A. Klimov, G. S. Melihova // *GIAB. Gornyj inform.-analit. bjul.* 2014. № 8. S. 45–57. (In Russ.).
19. Il'jushin A. A. *Mehanika sploshnoj sredy*. M.: MGU, 1971. 248 s. (In Russ.).
20. Petrenko E. V. *Osvoenie podzemnogo prostranstva*. M.: Nedra, 1988. 148 s. (In Russ.).
21. Savin I. I., Sviridkin I. I., Lukashin S. B. *Diagnostika krepki jeksploatiruemyh i zakonservirovannyh vertikal'nyh shahtnyh stvolov* // *Izv. Tul'skogo gos. un-ta. Nauki o Zemle*. 2012. № 1. S. 177–181. (In Russ.).
22. Kazikaev D. M., Sergeev S. V. *Diagnostika i monitoring naprjazhennogo sostojanija krepki vertikal'nyh stvolov*. M.: Gornaja kniga, 2011. 244 s. (In Russ.).
23. Il'jushin Ju. V. *Metody impul'snogo upravlenija objektami s raspredelennymi parametrami: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.13.01. Pjatigorsk. Juzhnyj feder. un-t*, 2012. 170 s. (In Russ.).

24. Analiz i identifikacija teplovyh polej prostranstvenno raspredelennyh sistem upravlenija / M. Ju. Shestopalov, I. M. Novozhilov, A. N. Il'jushina, Ju. V. Il'jushin // Izv. SPbGETU «LETI». 2021. № 9. С. 61–71. (In Russ.).

25. Il'jushin Ju. V. Analiz prostranstvenno-raspredelennyh temperaturnyh polej impul'snoj sistemy upravlenija dobychej vysokoparafinovoj nefti // Izv. JuFU. Tehnicheskie nauki. 2018. № 5(199). S. 174–186. doi: 10.23683/2311-3103-2018-5-174-186. (In Russ.).

26. Svid. o gos. registracii programmy dlja JeVM № 2018663073 RF. Raschet temperaturnogo polja, sozdavaemogo impul'snymi nagrevatel'nymi jelementami v kolonne nasosno-kompressornoj trubny neftedobyvajušej skvazhiny / Ju. V. Il'jushin, O. V. Afanas'eva; zjavitel' FGBOU VO «Sankt-Peterburgskij gornyj universitet». Zajavl. 25.09.201; opubl. 19.10.2018. (In Russ.).

27. Il'jushin Ju. V., Shestopalov M. Ju. Primenenie modifirovannogo kriterija Najkvista dlja analiza impul'snyh raspredelennyh sistem // Izv. SPbGETU «LETI». 2019. № 3. S. 42–46. (In Russ.).

28. Il'jushin Ju. V., Novozhilov I. M., Shestopalov M. Ju. Metodika i sistema upravlenija pozicionirovaniem ge-

ologorazvedochnogo podvodnogo apparata // Izv. SPbGETU «LETI». 2019. № 7. S. 57–61. (In Russ.).

29. Svid. o gos. registracii programmy dlja JeVM № 2017663220 RF. Raschet temperaturnyh harakteristik kolonkovogo bura / Ju. V. Il'jushin, O. V. Afanas'eva; zjavitel' FGBOU VO «Sankt-Peterburgskij gornyj universitet». Zajavl. 06.10.2017; opubl. 27.11.2017. (In Russ.).

30. Il'jushin Ju. V., Trushnikov V. E. Razrabotka impul'snogo upravlenija temperaturnym polem burovnyh shnekov dobychi gorjachej mineral'noj vody kislovodskogo mestorozhdenija narzana // Gornyj inform.-analit. bjul. (nauch.-tehn. zhurnal). 2014. № 2. S. 172–181. (In Russ.).

31. Demin V. F., Demina T. V. Ocenka parametrov defektnosti podgotovitel'nyh vyrabotok v zavisimosti ot gorno-tehnologicheskij uslovij jekspluatcii // Gornyj inform.-analit. bjul. (nauch.-tehn. zhurn.). 2014. № 1. S. 5–11. (In Russ.).

32. Vlijanie naprjazhenij na ustojchivost' pri sprjazhenii vyrabotok v zavisimosti ot gorno-tehnologicheskij parametrov razrabotki / V. F. Demin, A. E. Sudarikov, T. V. Demina, Ju. Ju. Stefljuk, V. V. Demin // GIAB. Gornyj inform.-analit. bjul. 2014. № 8. S. 5–14. (In Russ.).

Information about the authors

Igor M. Novozhilov – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor of the Department of Automation and Control Processes of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: novozhilovim@list.ru

Dmitry A. Pervukhin – Dr Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of System Analysis and Management of Saint Petersburg Mining University, 21st line, 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: pervukhin_da@pers.spmi.ru

Nikolay A. Talanov – postgraduate student of the Department of System Analysis and Management of Saint Petersburg Mining University, 21st line, 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: s225027@srud.spmi.ru

Статья поступила в редакцию 03.04.2023; принята к публикации после рецензирования 20.04.2023; опубликована онлайн 23.06.2023.

Submitted 03.04.2023; accepted 20.04.2023; published online 23.06.2023.