

На правах рукописи



ШИГИНА АННА АЛЕКСАНДРОВНА

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
ПРОЦЕССОМ ШАРОШЕЧНОГО БУРЕНИЯ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами
(промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2017

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Ступина Алена Александровна

Официальные оппоненты: **Дулесов Александр Сергеевич**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет
им. Н.Ф. Катанова», г. Абакан
профессор кафедры информационных технологий и систем

Жуков Иван Алексеевич
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный
университет», г. Новокузнецк
доцент кафедры механики и машиностроения

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники», г. Томск

Защита состоится 22 декабря 2017 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.249.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» по адресу 660037, г. Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева и на сайте СибГУ им. академика М.Ф. Решетнева: <http://sibsau.ru>.

Автореферат разослан «___» ноября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Илья Александрович Панфилов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В контексте современного экономического развития России и зарубежных стран огромное значение имеет модернизация, повышение эффективности и наукоемкости промышленных технологий. Особое место в горнодобывающей, нефтегазовой и строительной промышленности занимают предприятия, широко использующие различные технологии бурения, поэтому проблема повышения эффективности управления процессом бурения актуальна для данной отрасли. Наибольшее распространение получил шарошечный способ бурения, которым выполняется до 85% всех объемов работ. Бурение является трудоемким и дорогостоящим технологическим процессом, поэтому задача повышения качества управления данным процессом неразрывно связана с оценкой его эффективности. В настоящее время управлению процессом бурения посвящено большое количество трудов как отечественных, так и зарубежных авторов. Исследованиям технологии шарошечного бурения и вопросу определения оптимальных значений режимных параметров процесса бурения посвящены работы В.Д. Буткина, В.А. Перетолчина, Б.А. Симкина, Н.Б. Ситникова, А.В. Орлова, Е.А. Козловского, Л.И. Кантовича, Н.В. Мельникова, Р.Ю. Подэрни, Г.Д. Бревдо, Б.Н. Кутузова, А.Ф. Суханова, И.Г. Шелковникова, Н.Я. Репина, Р.М. Эйгелеса, J.F. Brett, S. Salehi, X. Shi, C. Chapman, J. Sugiura и других ученых. Ими предложены аналитические зависимости, основанные на статистической информации, для расчета значений режимных параметров бурения.

При неустановившихся режимах эксплуатации техники повышаются требования к оптимальному управлению и эффективности технологического процесса. Процесс шарошечного бурения характеризуется высокой степенью неопределенности информации, связанной со случайным изменением свойств буримой породы, что значительно усложняет процесс выбора оптимальных решений при бурении и может привести к непредсказуемым результатам, например, преждевременному отказу бурового долота. В связи с этим возникает необходимость применения адекватных моделей и методов управления технологическим процессом, так как режимы работы машин в таких условиях находятся за пределами области оптимальных значений.

При моделировании и исследовании процесса шарошечного бурения важно учесть уровень априорной информации, правильно установить взаимосвязи параметров и влияние на исследуемую систему непрогнозируемых технологических параметров объектов воздействия природного характера. Управление параметрами таких систем затруднено ограничением или отсутствием информации об их количественном значении. Изменение значений одного или нескольких параметров может происходить в очень малые промежутки времени, поэтому информация об этих изменениях, полученная при помощи современных средств мониторинга, необходимая для управления процессом, существенно отличается от значений этих параметров в текущий момент времени. Существенный вклад в решение проблем, связанных с разработкой систем управления процессом бурения, внесли российские ученые А.А. Жуковский, Ю.А. Нанкин, Н.Б. Ситников, К.Н. Трубецкой, В.Д. Буткин, Е.А. Козловский, Б.А. Симкин, Р.И. Алимбеков, А.А. Погарский, К.А. Чевранов, А.А. Волков, Г.С. Бродов и зарубежные исследователи М.Е. Hossain, J. Thorogood, F. Iversen, C. Chapman, J. Sugiura и другие ученые. Проведенный анализ подходов к управлению процессом шарошечного бурения показал, что в условиях случайного изменения свойств породы при бурении основным методом является адаптивное управление. Разработке адаптивных методов управления и анализу информационных процессов, протекающих в системах управления технологическими процессами, посвящены работы российских ученых С.В. Емельянова, С.К. Коровина, Я.З. Цыпкина, Л.А. Бахвалова, Л.Д. Певзнера, Н.И. Федунец, зарубежных исследователей Л.С. Гольдфарба, А. Isidori, Н.К. Khalil, К.С. Narendra и других ученых.

Несмотря на большое количество исследований, в научной литературе проблемам оптимизации, регулирования параметров процесса шарошечного бурения и учету неконтролируемых факторов, связанных с информационной неопределенностью свойств пород,

уделено недостаточно внимания. В существующих разработках недостаточно глубоко проведены исследования по определению необходимых и достаточных условий экстремума основных показателей для математической модели процесса бурения, лежащей в основе интеллектуальной системы управления, что может привести к созданию неверных алгоритмов функционирования системы.

Особенно остро данная проблема стоит при бурении скважин различного назначения, когда нет возможности заранее предвидеть изменение структуры и прочности пород. При ежегодных эксплуатационных затратах на бурение, составляющих порядка 30 млрд. руб., до 50% приходится на расходы, связанные с неэффективными режимами эксплуатации машин. Решением данной проблемы является создание интеллектуальной автоматизированной системы управления (АСУ), оперирующей в постоянном режиме косвенной информацией о текущих изменениях свойств породы. Кроме того, в данных условиях необходимым становится применение адаптивного устройства в качестве регулятора, приспособляющего характеристики системы к происходящим изменениям в промежутки времени, сопоставимые со временем изменения значений параметров. Адаптивный элемент в системе позволяет оптимально использовать случайные возмущения, которые при отсутствии контроля приводят к неэффективным затратам энергии, негативно сказываются на функционировании системы и снижают ее ресурс. В связи с быстротечностью переходных процессов для своевременного получения информации о текущих изменениях значений параметров внешней среды необходимо использовать разработанное адаптивное устройство в интеллектуальной системе управления, способной контролировать в on-line режиме все изменения свойств породы, определять и назначать режимные параметры исполнительных механизмов.

Результаты исследований позволят сформировать объективную оценку эффективности управления процессом шарошечного бурения.

Целью диссертационной работы является повышение качества и эффективности управления процессом шарошечного бурения за счет оптимизации режимных параметров.

Задачи исследований:

1. Аналитический обзор существующих подходов к управлению процессом шарошечного бурения.
2. Разработка математической модели процесса шарошечного бурения.
3. Разработка метода оптимизации режимных параметров процесса шарошечного бурения.
4. Разработка математических зависимостей для расчета оптимальных значений режимных параметров процесса шарошечного бурения.
5. Разработка структуры интеллектуальной АСУ процессом шарошечного бурения, функционирующей в условиях случайного изменения свойств породы и оценка ее эффективности по результатам полученных значений режимных параметров и интегрального показателя.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы использовались основы теории автоматического управления, методы системного анализа, теории оптимизации, теории адаптивных систем, обработки и анализа данных.

Научная новизна результатов диссертационной работы состоит в следующем:

1. Впервые разработана математическая модель процесса шарошечного бурения, раскрывающая взаимосвязи режимных параметров с производительностью процесса бурения и ресурсом долота и отличающаяся от известных учетом долей от общего количества циклов нагружения тел качения шарошек, приходящиеся на бурение однородной, слоистой, трещиноватой породы, и позволяющая эффективно определять ресурс шарошечных долот при бурении сложноструктурных массивов.

2. Разработан метод оптимизации режимных параметров процесса шарошечного бурения, отличающийся от известных использованием корректирующих величин осевого усилия и частоты вращения, получаемых в регуляторе при помощи расчетных методик на основе критерия оптимизации, определяемого из соотношения энергетических и временных параметров

разрушения породы одним зубцом, и за счет этого превосходящий по эффективности другие методы оптимизации процесса бурения.

3. Предложены математические зависимости для расчета оптимальных значений режимных параметров, отличающиеся тем, что учитываются в явном виде все параметры процесса, включая энергетические, кинематические, конструктивные характеристики и изменение структурных и прочностных свойств породы и позволяющие определить условия оптимизации процесса шарошечного бурения, существенно повысить точность определения оптимального режима.

Теоретическая значимость результатов диссертационной работы состоит в разработке расчетных методик, учитывающих физику процесса шарошечного бурения при определении его оптимальных режимных параметров и использующихся для оценки эффективности технологического процесса. В работе учитываются особенности процесса разрушения породы при создании расчетных зависимостей для определения оптимальных значений режимных параметров. Выявлен универсальный критерий оптимизации процесса шарошечного бурения, отражающий соотношение времени контакта отдельных зубцов долота с породой и времени, необходимого для совершения работы разрушения породы соответствующими зубцами. Разработка математической модели процесса шарошечного бурения, оптимизационной модели управления параметрами и системы интеллектуального управления являются существенным вкладом в развитие методов интеллектуальной поддержки процессов управления технологическими процессами и методов оптимизации.

Практическая значимость. Результаты диссертационной работы предназначены для применения в системах управления процессом шарошечного бурения на предприятиях горнодобывающей, нефтегазовой и строительной промышленности.

Разработано программное обеспечение для расчета технологических показателей и оптимальных значений основных режимных параметров процесса шарошечного бурения в зависимости от изменения свойств породного массива, определения ресурса долота, производительности бурового агрегата и может быть использовано инженерным персоналом на действующих предприятиях горнодобывающей, нефтегазовой и строительной промышленности.

Результаты диссертационной работы используются на предприятиях ООО «Краспромавтоматика» (г. Красноярск), ООО «Тяжмашсервис» (г. Красноярск), ООО «Управление по буровзрывным работам» (Восточно-Бейский разрез Сибирской угольной энергетической компании (СУЭК)), Республика Хакасия, г. Черногорск), АО «Хакасвзрывпром» (Черногорский разрез СУЭК, Республика Хакасия, г. Черногорск), ООО «Центр содействия развитию научных исследований» (г. Новосибирск) в виде: адаптивной модели и алгоритма оптимального управления процессом шарошечного бурения в условиях высокой информационной неопределенности, вызванной случайным изменением свойств пород различной крепости в процессе бурения; расчетных методик и рекомендаций для определения рациональных режимов бурения, ресурса шарошечных долот и удельной стоимости технологического процесса.

Разработанная программа для ЭВМ «Система моделирования режимных параметров процесса бурения» используется в учебно-образовательной деятельности Института управления бизнес-процессами и экономики и Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета при подготовке студентов по направлениям 09.03.03 «Прикладная информатика» и 21.05.04 «Горное дело».

Результаты диссертационной работы реализованы:

– в Федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» № 16.740.11.0622, мероприятие № 1.3.1. в рамках проекта «Разработка адаптивных систем буровых станков для бурения сложноструктурных горных пород» (2011 – 2013 гг.);

– в гранте Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-2531.2014.8 (2014 – 2015 гг.);

– в грантах Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках конкурса по организации участия студентов, аспирантов и молодых ученых во всероссийских, международных конференциях, научных мероприятиях и стажировках (2013 г.) и конкурса научных проектов авторских коллективов студентов и аспирантов под руководством молодых ученых на реализацию проекта (2014 г.);

– в гранте Российского фонда фундаментальных исследований в рамках конкурса научных проектов, выполняемых молодыми учеными под руководством кандидатов и докторов наук в научных организациях Российской Федерации (2015 г.).

Результаты диссертационной работы отмечены стипендией Президента Российской Федерации на 2014/15 учебный год (Приказ Министерства образования и науки РФ № 1434 от 10.11.2014 г.), премией ОАО АКБ «Международный финансовый клуб» за вклад в развитие науки Сибири (2016 г.), премией Главы города Красноярска молодым талантам (2016 г.), государственной премией Красноярского края в сфере профессионального образования (2016 г.). Вручена Почетная грамота за особые достижения в научной и учебной деятельности (СибГАУ, 2017 г.).

Основные защищаемые положения:

1. Математическая модель процесса шарошечного бурения устанавливает закономерности между режимными параметрами, отдельными характеристиками породного массива, конструктивными параметрами долота и позволяет определить значения производительности процесса бурения и ресурса долота, учитывающие структурные и прочностные изменения свойств пород.

2. Разработанный метод оптимизации режимных параметров процесса шарошечного бурения основан на их установленных взаимосвязях, объединяет расчетные инструменты математической модели процесса бурения, оптимизационной модели и позволяет достичь максимальной эффективности за счет адаптивной корректировки значений режимных параметров.

3. Предложенные математические зависимости для расчета оптимальных значений режимных параметров позволяют установить, что минимизация себестоимости процесса шарошечного бурения, максимизация производительности и ресурса возможны путем оптимизации осевого усилия и частоты вращения.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 30 работ, включая 8 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, 7 статей в зарубежных изданиях, индексируемых международной базой цитирования Scopus, 11 статей в трудах всероссийских и международных конференций, симпозиумов. Имеются 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, 2 патента.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: X Международная научно-практическая конференция «Технические науки – от теории к практике» (Новосибирск, 2012); XLI Международная конференция молодых ученых «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе IT + SE'13» (Украина, Крым, Ялта-Гурзуф, 2013); I International Scientific Conference "Global Science and Innovation" (Чикаго, США, 2013); Международная научно-практическая конференция «Вопросы технических наук: новые подходы в решении актуальных проблем» (Казань, 2014); XV Международная научно-практическая конференция «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2014» (Кемерово, 2014); XIX Международная научно-практическая конференция «Системный анализ в проектировании и управлении» (Санкт-Петербург, 2015); Всероссийская научно-практическая конференция «Информационно-телекоммуникационные системы и технологии» (Кемерово, 2015); IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Bristol, UK, 2015, 2016); Modern informatization problems: Proceedings of the XXI-th International Open Science Conference (Yelm, USA, 2016); XXI Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР» (Томск, 2016).

Структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка

литературы, включающего 149 наименований, 1 приложения. Общий объем работы составляет 128 страниц, включая 28 рисунков и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, изложены основные защищаемые положения.

Первая глава посвящена исследованию современного состояния технологии и особенностей управления процессом шарошечного бурения. Определены базовые принципы построения автоматизированных систем управления процессом бурения. Подчеркивается необходимость применения средств адаптивного управления. Исследованы проблемы построения алгоритмов управления процессом бурения с использованием оптимальных значений режимных параметров. Выявлено, что для быстрого реагирования системы управления на критические непрогнозируемые ударные нагрузки и их устранения необходим беспоисковый метод адаптации, базирующийся на аналитических вычислениях условий экстремума функционала, без использования пробных воздействий на объект, а для оптимизации технологического процесса – поисковый, основанный на автоматическом поиске экстремума режимных параметров в условиях случайного изменения свойств породы. Установлено, что оптимальное управление процессом шарошечного бурения может быть выполнено после того, как будет известен перечень функций и алгоритмов обработки информации и управления, зависящий от параметров процесса.

Все известные системы управления процессом бурения построены на основе различных критериев. Однако ни одна из современных АСУ не решает комплекс задач по эффективному управлению данным процессом, так как он осуществляется в условиях неполноты информации об изменении свойств породы. Кроме того, в известных системах управления бурением отсутствуют критерии оптимизации режимов, непосредственно связанные с физическим процессом шарошечного бурения. Выявлено, что метод, основанный на использовании априорной модели бурения и поисков экстремума оптимизации (программное и экстремальное управление), является наиболее эффективным по сравнению с методами, основанными на автоматическом регулировании параметров бурения по априорной модели и активном многоканальном поиске локальных и глобального экстремумов критерия оптимизации.

В настоящее время недостаточно разработана концепция адаптивного управления процессом шарошечного бурения, характеризующегося кратковременностью и быстротечностью переходных процессов, что является препятствием для повышения его эффективности. Исследуемый технологический процесс характеризуется нелинейной динамической моделью с нелинейной параметризацией. Анализ подходов к решению задачи адаптивного управления процессом шарошечного бурения показал, что по сравнению с методом управления на основе анализа свойств локальных адаптивных регуляторов с линейной параметризацией, нелинейная постановка задачи позволяет проводить компоновку системы управления и анализ ее свойств одновременно. С целью решения задачи построения управляющей функции в динамическую модель процесса шарошечного бурения предлагается ввести адаптивный элемент, оптимально использующий случайные возмущения, которые при отсутствии контроля приводят к неэффективным затратам энергии на управление, и необходимый для повышения ресурса системы.

В главе сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена математическому моделированию процесса шарошечного бурения. Установлена взаимосвязь параметров модели данного процесса. Определены оптимальные значения режимных параметров бурения в условиях случайного изменения свойств породы. Предложена математическая формализация процесса шарошечного бурения, раскрывающая взаимосвязи режимных параметров с производительностью процесса бурения, ресурсом долота T и учитывающая доли от общего количества циклов нагружения тел качения

шарошек, приходящиеся на бурение однородной, слоистой и трещиноватой породы.

Особое влияние на эффективность процесса шарошечного бурения оказывают такие параметры, как осевое усилие, частота вращения, устройство и свойства материалов рабочего органа и другие режимные параметры, а также непрогнозируемые ударные нагрузки, возникающие вследствие изменения физико-механических свойств пород в процессе бурения. На эффективность процесса шарошечного бурения большое влияние оказывают структура породного массива и прочностные характеристики породы, которые могут выражаться через показатель буримости P_6 . Породный массив характеризуется такими свойствами, как трещиноватость, слоистость и другими нарушениями однородности. При осуществлении технологического процесса такие конструктивные элементы бурового агрегата, как буровой инструмент и буровой став, испытывают спектр нагрузок. В условиях неполной информации о свойствах породы при моделировании процессов необходимо использовать среднестатистические данные, включающие показатель буримости и его изменение, количество и размеры областей с изменяющимися физико-механическими свойствами на погонный метр скважины.

Процесс шарошечного бурения можно представить в виде связей входных и выходных параметров (рисунок 1). Для уменьшения величины, длительности и частоты переходных процессов при изменении значений режимных параметров автоматическое управление целесообразно применять для внесения существенных коррективов при длительных изменениях неконтролируемых случайных возмущений (свойств породы). При кратковременных непрогнозируемых случайных возмущениях необходимо применять безинерционные системы. Для своевременного реагирования на непрогнозируемые ударные нагрузки необходимо использовать адаптивный вращательно-подающий механизм (АВПМ), сглаживающий непрогнозируемые возмущения и выполняющий функции датчика в системе управления процессом шарошечного бурения.

Для формирования управляющего воздействия на объект управления, соответствующего алгоритму его работы, и получения оптимальных значений выходных параметров, в интеллектуальную систему управления процессом шарошечного бурения предлагается ввести регулятор (управляющее устройство), выполняющий функции без непосредственного участия человека. Регулятор интеллектуальной системы с адаптивным элементом включает датчик – АВПМ, датчики тока, скорости бурения, частоты вращения, которые формируют информационные сигналы, характеризующие изменение свойств пород, компьютер и блок контроллеров, определяющие корректирующие значения случайных возмущений.

Задающими параметрами для адаптивного элемента и датчиков является информация об изменениях физико-механических свойств породы, выраженных значениями скорости бурения v_6 , осевого усилия P_{oc} , частоты вращения $n_{вр}$ в текущий момент и изменением скорости бурения Δv_6 за дискретный период времени. Выходными сигналами адаптивного элемента и датчиков и входными сигналами компьютера и блока контроллеров являются ток I , скорость бурения v_6 , частота вращения $n_{вр}$, изменение тока ΔI и скорости бурения Δv_6 в данный дискретный период времени, косвенно отражающие показатель буримости и его изменение. Выходными параметрами регулятора и входным управляющим воздействием для объекта управления (ОУ) являются корректирующие значения режимных параметров – осевого усилия ΔP_{oc} , частоты вращения $\Delta n_{вр}$, информация о прочностных и структурных свойствах породного массива, выраженная в расчетных значениях показателя буримости P_6 и его изменении ΔP_6 в данный дискретный период времени. Исполнительный механизм в качестве АВПМ в режиме реального времени преобразует входное управляющее воздействие в физическое воздействие в виде скорректированного осевого усилия $P_{oc} + \Delta P_{oc}$ и частоты вращения $n_{вр} + \Delta n_{вр}$, в результате чего соответственно меняются значения выходных параметров.

Входные параметры, характеризующие технические возможности бурового агрегата и условия бурения, разделяются на:

- управляющие, которые являются оперативно регулируемые (осевое усилие P_{oc} , частота вращения $n_{вр}$);

- контролируемые машинистом: не зависящие от процесса бурения (конструктивные параметры $K_{ст}$ бурового агрегата: масса, габариты, типы приводов основных механизмов) и зависящие от режимов бурения (диаметр и глубина скважины $P_б$, параметры вибрации бурового агрегата: амплитуда, частота $V_{ст}$); контролируемые регулятором: ток I и его изменение ΔI , скорость бурения $v_б$ и ее изменение $\Delta v_б$;

К неконтролируемым случайным параметрам разрушаемой среды $P_{ср}$ относится комплекс показателей, характеризующих физико-механические свойства породы как объекта разрушения при бурении, имеющих вид случайных функций (предел прочности породы при одноосном сжатии, трещиноватость, слоистость и др.), шумы в каналах управления и контроля, не поддающихся, как правило, точным количественным измерениям. Косвенно $P_{ср}$ влияет на входные параметры процесса шарошечного бурения, но не используется в качестве входа.

Выходные параметры характеризуют физические результаты процесса шарошечного бурения и разделяются на:

- наблюдаемые: ресурс долота T , частота вращения $n_{вр}$, осевое усилие $P_{ос}$, скорость бурения $v_б$ (управляемые параметры);
- ненаблюдаемые оперативно вычисляемые: производительность бурового агрегата в смену $\Pi_{см}$, энергоёмкость процесса шарошечного бурения $E_б$, мощность, передаваемая для разрушения породы N , затраты на бурение одного погонного метра скважины S .

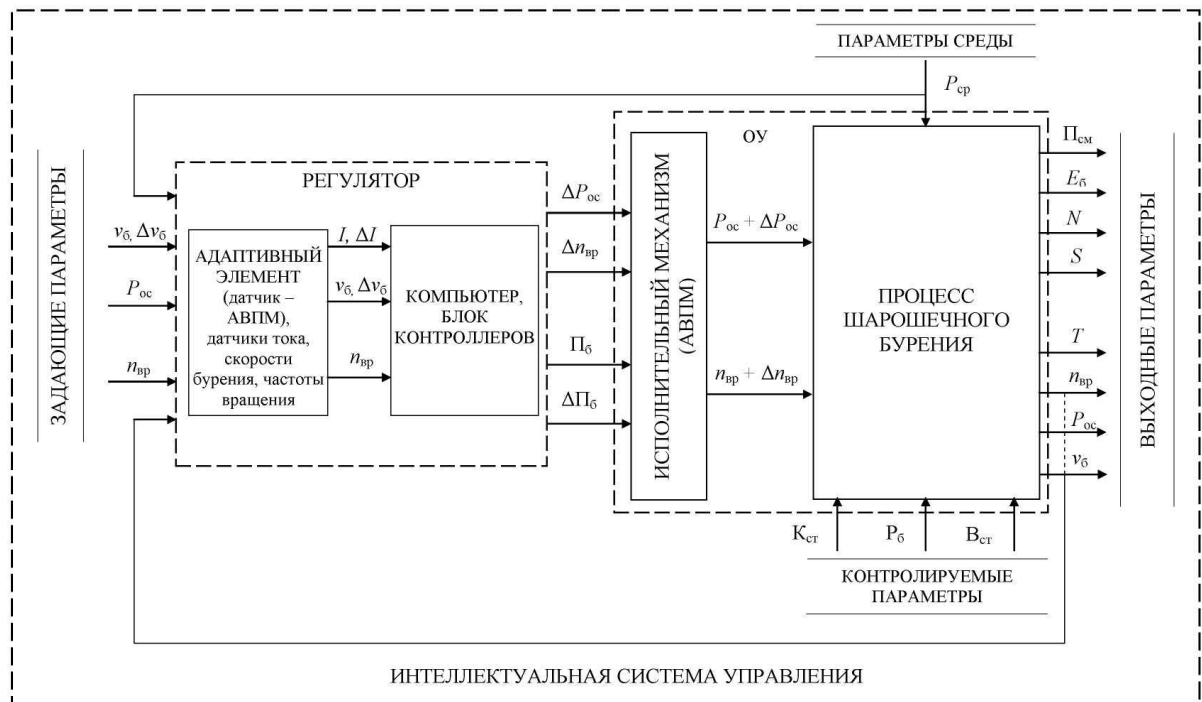


Рисунок 1 – Связь входных и выходных параметров процесса шарошечного бурения

Следует отметить, что энергоёмкость бурения $E_б$ может являться как функцией входных параметров ($P_{ос}$, $n_{вр}$), так и неконтролируемых случайных возмущений ($P_{ср}$) и иметь свои реальные значения для механизмов подачи и вращения бурового органа.

Из возможных связей между параметрами выделенных групп наибольшую ценность представляют функционалы вида:

$$Z_i = \varphi_i(U_i, P_{ср}, P_б, N, K_{ст}, v_б, V_{ст}), \quad (1)$$

$$U_i = \varphi_i(P_{ср}, P_б, N, K_{ст}, v_б, V_{ст}). \quad (2)$$

Функционалы вида (1) позволяют получить общее решение. Функционалы вида (2) выражают закономерность управления процессом шарошечного бурения. Если значения входных параметров U_i соответствуют экстремальным значениям критерия оптимизации Z_i , для каждого комплекса параметров, то уравнение (2) описывает оптимальное управление

процессом шарошечного бурения.

Для формализации процесса шарошечного бурения разработана математическая модель, учитывающая особенности физического процесса. Бурение породы с чередующимися слоями, имеющими разные показатели буримости (рисунок 2), характеризуется возникновением ударной нагрузки. Удар, как правило, вызывает повышение напряжения в подшипниковых узлах и соединительных элементах всего рабочего органа бурового агрегата. По сведениям В.А. Перетолчина, в 80% случаев шарошечное долото отказывает в работе по причине разрушения подшипниковых узлов.

Из выражения А.О. Шигина ресурс подшипника, выраженный в количестве циклов нагружения до разрушения, с учетом динамической циклической нагрузки определяется по формуле (3), содержащей выражение В.И. Анурьева для определения циклической стойкости подшипника качения и динамический коэффициент:

$$L = 10^6 \cdot \left(\frac{\sigma_b}{\sigma_{max}} \right)^{10/3} \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_b} \cdot \sigma_m}, \quad (3)$$

где L – количество циклов нагружения до разрушения подшипника; σ_b – предел прочности материала ролика подшипника, МПа; σ_{-1} – предел выносливости материала ролика подшипника, МПа; σ_a – амплитуда переменных напряжений цикла, $\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$, МПа; σ_m – среднее напряжение цикла, $\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$, МПа, σ_{max} , σ_{min} – максимальное и минимальное напряжения, возникающие при ударах вследствие увеличения крепости породы и перекатывания зубцов шарошки, МПа.

С учетом всех видов динамического воздействия, соответствующих бурению слоистых и трещиноватых пород, максимальное напряжение цикла нагружения $\sigma_{max} = \sigma_{p,уд}^\Sigma$ и определяется по формуле (4):

$$\sigma_{p,уд}^\Sigma = 600 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_r}{z \cdot D_p \cdot L_p} \cdot \frac{v_6 + 0,5v_s}{v_6 + 0,25v_s} \cdot \frac{\Pi_6^1 + \Delta\Pi_6}{\Pi_6^1 + 0,5\Delta\Pi_6} \cdot k_{инд}}; \quad (4)$$

где F_r – радиальное усилие, прилагаемое к подшипнику, Н; z – количество тел качения в подшипнике; D_p – диаметр ролика, мм; L_p – длина ролика, мм; v_6 – скорость бурения при имеющихся свойствах породы, осевом усилии и скорости вращения бурового органа, м/с; v_s – скорость опускания зубца на забой, м/с; Π_6 – показатель буримости; Π_6^1 – значение показателя буримости до изменения свойства породы; $k_{инд}$ – коэффициент формы индентора.

Расчетный ресурс шарошечных долот T предлагается определять с помощью выражения:

$$T = \frac{L_\Sigma}{2 \cdot n_{вр} \cdot 1,7} \cdot v_6, \text{ М}, \quad (5)$$

где $n_{вр}$ – частота вращения долота, об/с; v_6 – скорость бурения, м/с; L_Σ – суммарное количество циклов до разрушения тел качения при различных условиях нагружения, определяемое из выражения $L_\Sigma = L_{од} \cdot \eta_{од} + L_{сл} \cdot \eta_{сл} + L_{тр} \cdot \eta_{тр}$.

Здесь $L_{од}$ – количество циклов до разрушения тел качения при бурении однородной породы; $L_{сл}$ – количество циклов до разрушения тел качения при таких условиях бурения, когда каждый цикл нагружения будет характеризоваться нагрузками, соответствующими преодолению границ между слоями породы с различными физико-механическими свойствами; $L_{тр}$ – количество

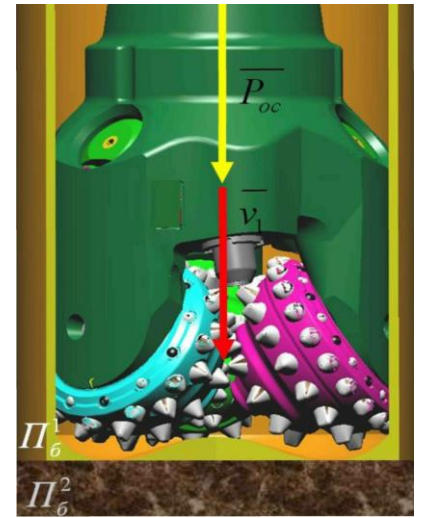


Рисунок 2 – Схема процесса шарошечного бурения при $\Pi_6^2 > \Pi_6^1$

циклов до разрушения тел качения при таких условиях бурения, когда каждый цикл нагружения будет характеризоваться нагрузками, соответствующими преодолению трещин или несплошностей в породном массиве; $\eta_{од}$, $\eta_{сл}$, $\eta_{тр}$ – доли от общего количества циклов нагружения тел качения шарошек, приходящиеся на бурение однородной, слоистой и трещиноватой породы соответственно.

Для определения ресурса шарошечного долота, работающего при бурении породного массива, характеризующегося тремя условиями нагружения, найдены выражения для определения долей от общего количества циклов нагружения тел качения шарошек, приходящихся на бурение однородной, слоистой и трещиноватой породы соответственно:

$$\eta_{од} = 1 - \eta_{сл} - \eta_{тр}; \quad \eta_{сл} = \frac{n_{сл} \cdot n_{об}^{сл}}{n_{вр} \cdot \frac{D_1}{D_{ш}^{max}}} \cdot v_б; \quad \eta_{тр} = \frac{n_{тр} \cdot n_{об}^{тр}}{n_{вр} \cdot \frac{D_1}{D_{ш}^{max}}} \cdot v_б;$$

где $n_{сл}$ – количество границ между слоями породы с разными физико-механическими свойствами на один погонный метр, $м^{-1}$; $n_{тр}$ – количество трещин в породе на один погонный метр, $м^{-1}$; $n_{об}^{сл}$ – число оборотов долота, необходимое для проходки границы между слоями породы; $n_{об}^{тр}$ – число оборотов долота, необходимое для проходки трещины в породном массиве; D_1 – диаметр шарошечного долота, м; $D_{ш}^{max}$ – максимальный диаметр шарошки, м.

Принимая во внимание выражение (3), соответствующие значения количества циклов до разрушения определяются из следующих выражений:

$$L_{од} = 10^6 \cdot \left(\frac{\sigma_в}{\sigma_{р.уд}^{max}} \right)^{10/3} \cdot \frac{2\sigma_{-1}}{\sigma_{р.уд}^{max} - \sigma_p^{max} + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_в} \cdot (\sigma_{р.уд}^{max} + \sigma_p^{max})},$$

$$L_{сл} = 10^6 \cdot \left(\frac{\sigma_в}{\sigma_{р.уд}^\Sigma} \right)^{10/3} \cdot \frac{2\sigma_{-1}}{\sigma_{р.уд}^\Sigma - \sigma_p^{max} + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_в} \cdot (\sigma_{р.уд}^\Sigma + \sigma_p^{max})},$$

где $\sigma_{р.уд}^{max}$ – максимальное напряжение цикла в ролике подшипника при бурении однородного массива, МПа; σ_p^{max} – максимальное напряжение цикла в ролике подшипника без учета ударных нагрузок, МПа.

Для условий бурения трещиноватой породы минимальное напряжение цикла $\sigma_{min} = 0$:

$$L_{тр} = 10^6 \cdot \left(\frac{\sigma_в}{\sigma_{р.уд}^\Sigma} \right)^{10/3} \cdot \frac{2\sigma_{-1}}{\sigma_{р.уд}^\Sigma + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_в} \cdot \sigma_{р.уд}^\Sigma}.$$

С помощью разработанной математической модели процесса шарошечного бурения построены зависимости ресурса шарошечного долота T от показателя буримости $\Pi_б$, представленные на рисунке 3.

С использованием экспериментальных значений ресурса долот T , полученных в условиях карьеров Олимпиадинского горно-обогатительного комбината АО «Полюс», построена кривая по средним значениям ресурса долот T (рисунок 4, кривая 1). Кривая 2 (рисунок 4) получена с использованием разработанной математической модели с учетом аналогичных

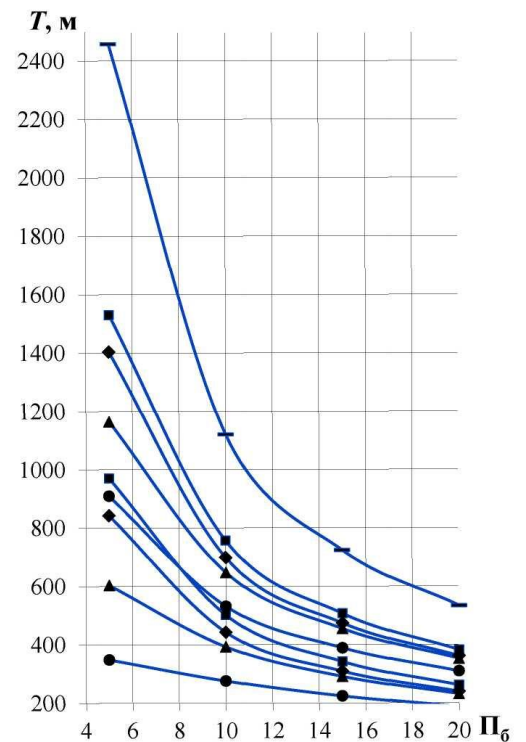


Рисунок 3 – Ресурс долот T в зависимости от показателя буримости $\Pi_б$. — зависимость для однородных пород. Зависимости для слоисто-трещиноватых пород обозначены маркерами, характеризующими параметры слоистости: ■ – при $n_{сл} = 10 м^{-1}$, $\Delta\Pi_б = 2$; ▲ – при $n_{сл} = 20 м^{-1}$, $\Delta\Pi_б = 2$; ◆ – при $n_{сл} = 10 м^{-1}$, $\Delta\Pi_б = 4$; ● – при $n_{сл} = 20 м^{-1}$, $\Delta\Pi_б = 4$. При каждой характеристике слоистости сверху вниз $n_{тр} = 10 м^{-1}$; $20 м^{-1}$.

свойств породного массива и значений режимных параметров.

Оценка адекватности математической модели произведена с учетом статистических данных по наработке на отказ шарошечных долот. Проверка на сходимость экспериментальных и расчетных значений показала высокую точность математической модели в области значений $\Pi_6 = 12-16$, наиболее часто встречающихся в условиях карьеров и при бурении нефтяных и газовых скважин. Таким образом, разработанная математическая модель процесса шарошечного бурения является достаточно точной и можно сделать вывод об адекватности разработанной модели реальному процессу и возможности ее практического применения.

Третья глава посвящена формированию и реализации модели управления шарошечным бурением в условиях неполной информации об изменении свойств породы.

Определена структура интеллектуальной автоматизированной системы управления шарошечным бурением с адаптивным элементом. Для формирования управляющего воздействия используется отклонение текущего значения управляемой величины от требуемого значения. В процессе управления имеется возможность измерять основные возмущающие воздействия. Для повышения точности управления интеллектуальная АСУ с нелинейными обратными связями построена на сочетании принципов управления по возмущению и отклонению (комбинированная система управления). Структурная схема интеллектуальной АСУ процессом шарошечного бурения представлена на рисунке 5.

На систему управления и объект управления, включающий процесс шарошечного бурения и исполнительный механизм (АВПМ), оказывают влияние внешние возмущающие воздействия – неконтролируемые параметры разрушаемой среды P_{cp} (свойства буримых пород и их случайное изменение). Данная система содержит регулятор, корректирующее устройство и исполнительный механизм (АВПМ). Регулятор включает: компьютер, содержащий разработанную математическую модель процесса шарошечного бурения, и блок контроллеров; программный блок, включающий разработанную оптимизационную модель; датчики: адаптивный элемент (датчик – АВПМ), измеритель тока; датчики скорости бурения v_6 , частоты вращения $n_{вр}$.

Входная информация об изменении свойств породы, получаемой с объекта управления, поступает в регулятор к датчикам посредством динамического воздействия. В компьютер с датчиков поступают информационные сигналы о значении тока I , его изменениях ΔI в статоре АВПМ и сигналы о значениях скорости бурения v_6 , его изменении Δv_6 и частоты вращения $n_{вр}$. Затем эти сигналы преобразуются в управляющие при помощи блока контроллеров, обнаруживающих и ликвидирующих отклонение (реализация процесса управления). Далее сигналы поступают в программный блок, в котором рассчитываются оптимальные значения режимных параметров $[P_{oc}]$ и $[n_{вр}]$, скорость бурения v_6 , прогнозируемый ресурс долота T (выходные наблюдаемые параметры). Программный блок содержит оптимизационную модель, использующую корректирующие значения осевого усилия ΔP_{oc} и частоты вращения $\Delta n_{вр}$. Для улучшения качественных характеристик системы действительные значения режимных параметров сравниваются с оптимальными и автоматически изменяются с помощью корректирующего устройства. На процесс шарошечного бурения воздействует исполнительный механизм в соответствии с получаемой командной информацией от регулятора. Далее процесс осуществляется с вновь заданными значениями режимных параметров P_{oc} и $n_{вр}$. В модуле визуализации отражаются оперативно вычисляемые на выходе

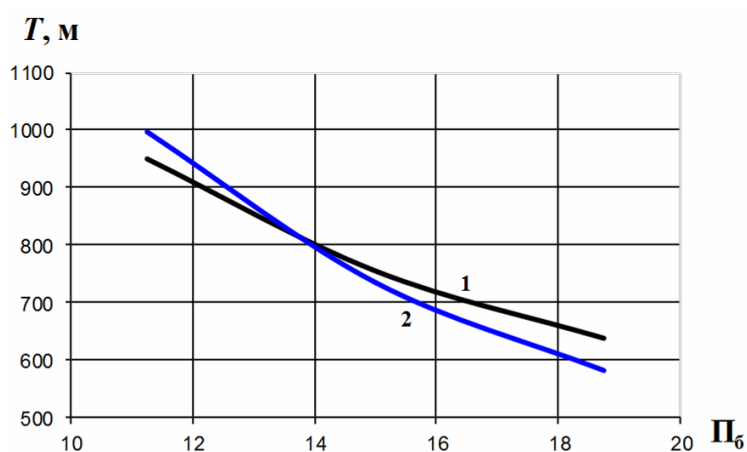


Рисунок 4 – Проверка адекватности математической модели

значения производительности бурового агрегата в смену $\Pi_{см}$, энергоемкости процесса шарошечного бурения E_b , мощности, передаваемой для разрушения породы N , удельных затрат на бурение S .

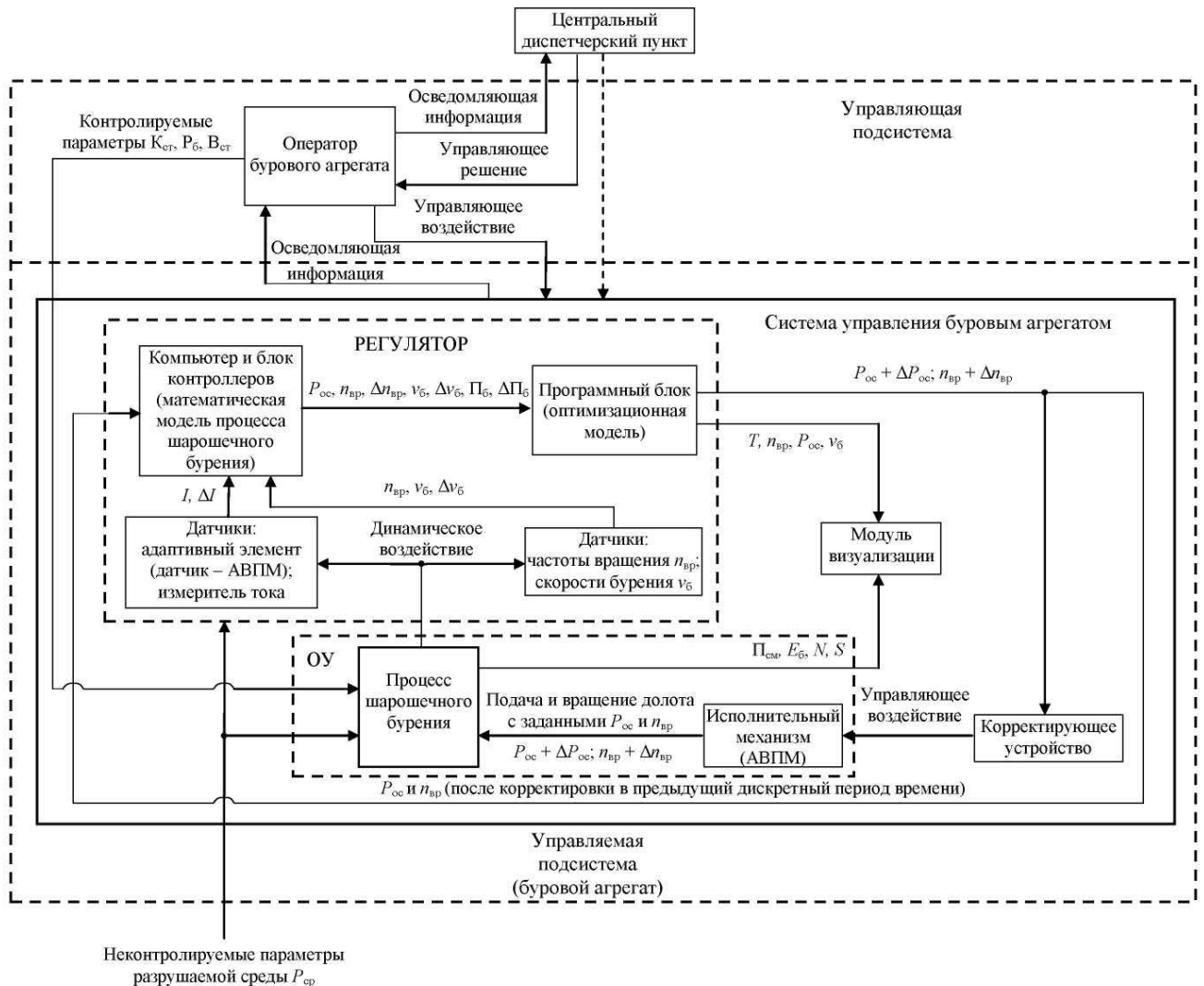


Рисунок 5 – Структурная схема интеллектуальной АСУ процессом шарошечного бурения

По обратной связи осуществляется передача информации о текущих значениях режимных параметров $P_{ос}$ и $n_{вр}$, установившихся после корректировки в предыдущий дискретный период времени. Расчетные значения всех выходных параметров выводятся на приборную панель через модуль визуализации для контроля. Осведомляющая информация о значениях этих параметров поступает от системы управления к оператору бурового агрегата и далее – в центральный диспетчерский пункт.

В качестве параметров, которые необходимо оптимизировать, предлагается выбрать: скорость бурения, ресурс (проходку) – наблюдаемые в процессе бурения параметры; мощность механизмов подачи и вращения, энергетические затраты (энергоемкость бурения) и затраты на бурение одного погонного метра скважины – не наблюдаемые параметры, но оперативно вычисляемые. Такие параметры, как производительность, скорость бурения, ресурс, необходимо максимизировать. В качестве интегрального показателя, объединяющего все указанные параметры, предлагается ввести удельную стоимость бурения (руб./пог. м), которую необходимо минимизировать.

Для повышения качества управления процессом шарошечного бурения в условиях непрогнозируемого изменения свойств породы предлагается оптимизационная модель, использующая корректирующие величины осевого усилия $\Delta P_{ос}$ и частоты вращения $\Delta n_{вр}$.

Задача оптимизации процесса шарошечного бурения сводится к нахождению экстремума целевой функции. При условии, что входными параметрами для процесса шарошечного бурения являются скорректированные значения $P_{oc.k}$ и $n_{вр.k}$, то многомерная функция будет выглядеть следующим образом:

$$R = f(P_{oc.k}, n_{вр.k}) = extr,$$

где $P_{oc.k}$ – скорректированное значение осевого усилия, $P_{oc.k} = P_{oc} + \Delta P_{oc}$; $n_{вр.k}$ – скорректированное значение частоты вращения, $n_{вр.k} = n_{вр} + \Delta n_{вр}$;

В процессе принятия решений по выбору оптимального режима бурения ставятся две цели:

- цель-ограничение $z_0 \leq z_i(t) \leq z_1, i = \overline{1, n}$ – требует нахождения в таких заданных границах целевых переменных, при которых процесс бурения оптимален $y(x) \rightarrow opt$, где $x \in X$ – произвольное множество параметров, описывающих состояние данного процесса. В данном случае ограничениями являются пределы прочности конструктивных элементов, ресурс долота, максимальная мощность приводов бурового агрегата.

- экстремальная цель сводится к поддержанию в экстремальном состоянии целевых переменных $y_i(x) \rightarrow extr, i = \overline{1, n}$. Данной целью является максимизация производительности при существующих условиях процесса шарошечного бурения (критерий оптимальности – производительность) и минимизация себестоимости при известной производительности (критерий оптимальности – себестоимость). Максимизация производительности возможна путем максимизации осевого усилия P_{oc} и оптимизации частоты вращения $n_{вр}$ в сочетании с максимизацией ресурса T .

Для разрушения некоторого объема породы буровой агрегат должен совершить механическую работу:

$$A_{раз} = N \cdot t_{раз},$$

где N – мощность, передаваемая для разрушения породы; $t_{раз}$ – время, необходимое для разрушения некоторого объема породы посредством одного зубца шарошки.

Из условия эффективного функционирования шарошечных долот время контакта отдельных зубцов с породой находится из выражения:

$$t_{к.з} = \frac{1}{1,7 \cdot n_{вр} \cdot k_3},$$

где k_3 – количество зубцов всех рядов шарошки.

Промежуток времени, необходимый для совершения работы разрушения породы одним зубцом шарошки:

$$t_{раз} = 7,2 \cdot 10^8 \cdot \frac{R_{ш} \cdot \Pi_6 \cdot V_{раз}}{v_6 \cdot P_{oc}},$$

где $R_{ш}$ – радиус шарошек долота, м; $V_{раз}$ – объем разрушенной породы одним зубцом, м³.

Максимальная эффективность разрушения соответствует равенству:

$$t_{к.з} = t_{раз} \quad (6)$$

Если $t_{к.з} > t_{раз}$, то неэффективно расходуется время работы бурового агрегата и необходимо повысить частоту вращения шарошечного долота. Если $t_{к.з} < t_{раз}$, то неэффективно используется ресурс долота и необходимо понизить частоту вращения. Таким образом, критерием оптимизации частоты вращения является равенство времени контакта и времени разрушения (6). Тогда оптимальная частота вращения:

$$[n_{вр}] = \frac{0,94 \cdot N}{10^8 \cdot \pi \cdot D_1^3 \cdot \Pi_6 \cdot h} \cdot \frac{\Pi_6^1 + \Delta \Pi_6}{\Pi_6^1 + 0,5 \Delta \Pi_6} \cdot k_{инд}, \quad (7)$$

где h – высота зубца, выступающая за профиль зубчатого венца, м.

Максимально допустимое осевое усилие рабочего органа бурового агрегата

определяется из допустимых нагрузок на тела качения шарошечных долот. С учетом выражения (4) допустимое максимальное осевое усилие при бурении:

$$[P_{oc}] = 6 \cdot z \cdot D_p \cdot L_p \cdot \left(\frac{[\sigma_{p.ш}]}{600 \cdot \frac{v_{\sigma} + 0,5v_s}{v_{\sigma} + 0,25v_s} \cdot \frac{\Pi_{\sigma}^1 + \Delta\Pi_{\sigma}}{\Pi_{\sigma}^1 + 0,5\Delta\Pi_{\sigma}} \cdot k_{инд}} \right)^3, \quad (8)$$

где $[\sigma_{p.ш}]$ – допустимое напряжение для материала тел качения подшипников шарошечных долот, МПа.

Максимальное значение осевого усилия как режимного параметра при любых условиях не должно превышать значение критерия по выражению (8). Минимизация себестоимости возможна при соблюдении критериев оптимизации – частоты вращения и осевого усилия по выражениям (7) и (8), что приведет к получению оптимального соотношения производительности и ресурса.

Для оценки эффективности управления процессом шарошечного бурения предложена оптимизационная модель управления параметрами процесса в условиях случайного изменения свойств породы, использующая корректирующие величины осевого усилия и частоты вращения, получаемых в регуляторе при помощи расчетных методик. Повышение эффективности управления процессом шарошечного бурения с использованием адаптивного элемента определяется с помощью выражений (9) и (10).

При управлении осевым усилием повышение производительности предлагается определять с помощью следующего выражения:

$$\frac{v_{\sigma.и}}{v_{\sigma.к}} = 4 \cdot \left(\frac{\Pi_{\sigma min}^1 + \Delta\Pi_{\sigma max}}{2\Pi_{\sigma min}^1 + \Delta\Pi_{\sigma max}} \right)^3, \quad (9)$$

где $v_{\sigma.и}$ – скорость бурения при оптимальном управлении с использованием интеллектуальной системы; $v_{\sigma.к}$ – скорость бурения при контроле неизменного значения режимного параметра; $\Pi_{\sigma min}^1$ – минимальное значение показателя буримости породы в массиве; $\Delta\Pi_{\sigma max}$ – максимальное изменение показателя буримости.

При управлении частотой вращения повышение производительности определяется:

$$\frac{v_{\sigma.и}}{v_{\sigma.к}} = \frac{\Pi_{\sigma min}^1 + \Delta\Pi_{\sigma max}}{2\Pi_{\sigma min}^1 + \Delta\Pi_{\sigma max}}. \quad (10)$$

Оценка производительности позволяет максимально эффективно использовать время работы бурового агрегата.

В качестве интегрального критерия оценки эффективности управления процессом шарошечного бурения (включая режимные параметры) принимаются эксплуатационные затраты S на бурение 1 м скважины с учетом повышения производительности и ресурса долота при оптимальном управлении:

$$S(v_{\sigma.и}, T) = \frac{A \cdot t_b}{t_c \cdot \eta} + \frac{A}{t_c \cdot \eta \cdot v_{\sigma.и}} + \frac{C_d}{T},$$

где S – удельные затраты на бурение, руб/м; A – стоимость машино-смены работы бурового агрегата без учета затрат на буровое долото, руб/см; t_b – удельные затраты времени на вспомогательные машинные операции, мин/м; t_c – время смены, мин; η – коэффициент эффективного использования бурового агрегата в течение смены (обычно составляет $\eta = 0,75 - 0,85$); C_d – стоимость долота, руб.

С помощью разработанной математической модели процесса шарошечного бурения получено выражение для расчета ресурса долота T (11), выведенное из выражения (5) с учетом количества циклов до разрушения подшипников, соответственно бурению однородной, слоистой и трещиноватой пород пропорционально долям от общего количества циклов нагружения тел качения шарошек.

$$T = 10^6 \cdot \left(\frac{\sigma_b}{600 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_r}{z \cdot D_p \cdot L_p} \cdot \frac{v_b + 0,5v_s}{v_b + 0,25v_s} \cdot k_{\text{инд}}}} \right)^{10/3} \cdot \frac{0,5 \cdot \sigma_b}{1,7 \cdot 600 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_r}{z \cdot D_p \cdot L_p} \cdot k_{\text{инд}}}} \times$$

$$\times \left(\frac{1 - \delta_{\text{сл}} - \delta_{\text{тр}}}{1,5 \cdot \frac{v_b + 0,5v_s}{v_b + 0,25v_s} - 0,5} + \frac{\delta_{\text{сл}}}{1,5 \cdot \frac{v_b + 0,5v_s}{v_b + 0,25v_s} \cdot \frac{\Pi_6^1 + \Delta\Pi_6}{\Pi_6^1 + 0,5\Delta\Pi_6} - 0,5} + \frac{\delta_{\text{тр}}}{\frac{2v_b + v_s}{v_b + 0,25v_s} \cdot \Pi_6^1} \right), \text{ м}, \quad (11)$$

где $\delta_{\text{сл}}$ – удельная толщина пограничного слоя породы, м/м; $\delta_{\text{тр}}$ – удельная толщина трещины в массиве, м/м; Π_6^1 – значение показателя буримости породы до его изменения.

Разработанные методики с учетом зависимостей (7) и (8) позволяют рассчитывать критерии оптимизации, скорость бурения и ресурс шарошечного долота для различных свойств породы. На рисунке 6 показаны расчетные зависимости ресурса долота T от скорости бурения v_b и осевого усилия $P_{\text{ос}}$. Точками показаны режимы при оптимальных значениях параметров $[P_{\text{ос}}]$ и $[n_{\text{вр}}]$. Характеристики породы для кривых обозначены различными цветами (рисунок 6): красным – $n_{\text{сл}} = 10$, $\Delta\Pi_6 = 2$, $n_{\text{тр}} = 0$; зеленым – $n_{\text{сл}} = 20$, $\Delta\Pi_6 = 2$, $n_{\text{тр}} = 10$; синим – $n_{\text{сл}} = 20$, $\Delta\Pi_6 = 4$, $n_{\text{тр}} = 20$. Соответствующими цветами обозначены точки оптимальных режимов для указанных характеристик пород. Для свойств породы, соответствующих красной и зеленой кривым, определены оптимальные значения режимных параметров: $[n_{\text{вр}}] = 1,79$ об/с, $[P_{\text{ос}}] = 185$ кН; ресурс долота T при этом для красной кривой $T = 692$ м, для зеленой кривой $T = 469$ м. Для свойств породы, соответствующих синей кривой, определены оптимальные значения режимных параметров: $[n_{\text{вр}}] = 1,88$ об/с, $[P_{\text{ос}}] = 158$ кН; ресурс долота при этом для синей кривой $T = 246$ м. Анализ показывает, что при оптимальном режиме наблюдается существенное увеличение скорости бурения и ресурса долота. При этом оптимальные режимы находятся в области допустимых значений, установленных заводом-изготовителем, что доказывает адекватность оптимизационной модели.

С учетом выражений для определения оптимальных значений режимных параметров (7) и (8) скорость бурения при оптимальном управлении с использованием адаптивного элемента:

$$v_{b,\text{оп}} = \frac{40 \cdot [P_{\text{ос}}] \cdot [n_{\text{вр}}]}{\Pi_6 \cdot D_1^2}.$$

На рисунке 7 показаны расчетные зависимости удельных затрат на бурение породы от различных значений режимных параметров. Расчетные зависимости с учетом выражений для определения оптимальных значений режимных параметров (7) и (8) позволяют определить минимальные удельные затраты при условии оптимального управления. На рисунке 7 показана точка, соответствующая оптимальным значениям режимных параметров $[P_{\text{ос}}]$, $[n_{\text{вр}}]$ и максимальной эффективности технологического процесса по интегральному показателю.

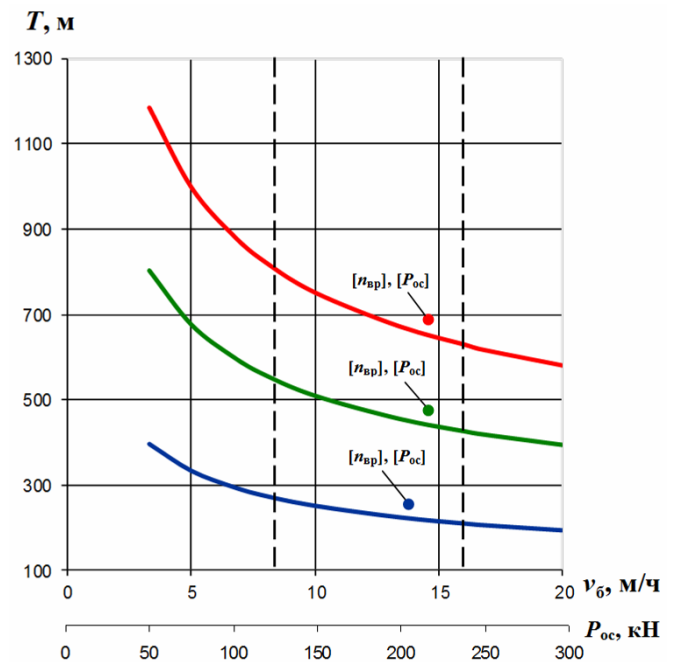


Рисунок 6 – Зависимости ресурса T шарошечных долот, скорости бурения v_b и осевого усилия $P_{\text{ос}}$ при $n_{\text{вр}} = 1,5$ об/с и $\Pi_6 = 15$.

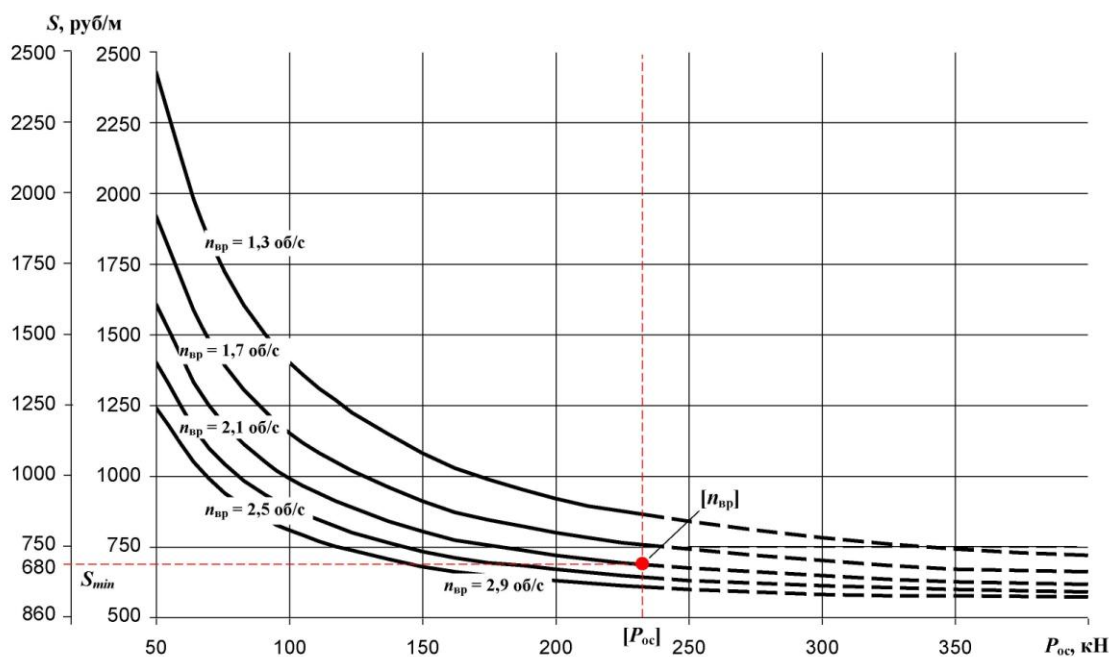


Рисунок 7 – Зависимости интегрального показателя эффективности S управления процессом шарошечного бурения от режимных параметров P_{oc} и $n_{вp}$ на примере АО «Хакасвзрывпром»

Классический метод оценки эффективности процесса шарошечного бурения не связан с оптимизацией режимных параметров в условиях случайного изменения свойств породы, а оперирует апостериорной информацией об имеющихся эксплуатационных показателях. Анализ полученной информации, достаточной для статистической обработки, в этом случае позволяет делать выводы о корректировке значений режимных параметров процесса бурения с целью улучшения показателей надежности, производительности и себестоимости.

Оценка эффективности управления шарошечным бурением по интегральному показателю с учетом критериев оптимизации при использовании интеллектуальной системы управления и адаптивного элемента позволяет определять минимальную себестоимость технологического процесса с условием поддержания оптимальных значений режимных параметров.

В Приложении А диссертационной работы представлены: акты о внедрении результатов на предприятиях ООО «Краспромавтоматика», ООО «Гяжмашсервис», ООО «Центр содействия развитию научных исследований»; акты проведения замеров режимных параметров буровых станков отечественного и зарубежного производства, используемых на предприятиях ООО «Управление по буровзрывным работам» (Восточно-Бейский разрез компании СУЭК), АО «Хакасвзрывпром» (Черногорский разрез компании СУЭК); справки о внедрении программы для ЭВМ «Система моделирования режимных параметров процесса бурения» в учебный процесс Института управления бизнес-процессами и экономики и Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Обоснована необходимость разработки нового подхода к управлению процессом шарошечного бурения. Проведен анализ современного состояния и особенностей технологии шарошечного бурения. Выявлены базовые принципы построения автоматизированных систем управления процессом бурения и необходимость применения средств адаптивного управления. Исследованы проблемы построения алгоритмов управления процессом бурения с использованием оптимальных значений режимных параметров.

2. Разработана математическая модель процесса шарошечного бурения, позволяющая оценить соотношение производительности процесса бурения и ресурса долота с учетом долей от общего количества циклов нагружения тел качения шарошек, приходящихся на бурение однородной, слоистой и трещиноватой породы.

3. Разработан метод оптимизации режимных параметров процесса шарошечного бурения, основанный на корректировке значений осевого усилия и частоты вращения в зависимости от технических характеристик бурового агрегата и физико-механических свойств породы и позволяющий определить максимальные значения ресурса долота и производительности.

4. Разработаны математические зависимости для расчета оптимальных значений режимных параметров процесса шарошечного бурения, соответствующих минимальным удельным затратам на технологический процесс.

5. Разработана структура интеллектуальной АСУ шарошечным бурением, осуществляющей корректировку режимов в условиях случайного изменения свойств породы. Адаптивный элемент в данной системе позволяет оптимально использовать случайные возмущения, в результате чего повышается эффективность использования энергии и ресурс долота. Для контроля изменения значений режимных параметров и повышения точности управления интеллектуальная АСУ с нелинейными обратными связями построена на сочетании принципов управления по возмущению, выраженному в значениях режимных параметров и отклонению в виде их изменения, которое обнаруживается системой и ликвидируется при помощи регулятора.

Своевременное регулирование значений режимных параметров процесса шарошечного бурения с использованием интеллектуальной АСУ обеспечивает повышение механической скорости бурения за счет оптимизации осевого усилия и частоты вращения шарошечного долота в условиях Черногорского угольного разреза компании СУЭК – в 2,3 раза и 1,8 раза соответственно и в 3,1 раза при их совместном регулировании.

Эффективность разработанной интеллектуальной АСУ процессом шарошечного бурения, осуществляющей корректировку режимов с использованием адаптивного элемента и оптимизационной модели, обоснована расчетом интегрального показателя, включающего оценку минимальных удельных затрат и производительности, показывающего снижение себестоимости процесса бурения до 17,5 %.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах, рекомендованных ВАК:

1. Шигина А.А. Сравнительная оценка методов анализа эффективности функционирования буровых станков / А.А. Шигина, А.О. Шигин, А.А. Ступина // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – Вып. 6 (44). – [Электронный ресурс] Режим доступа URL: <http://www.science-education.ru/106-7924> (дата обращения: 24.12.2012).

2. Шигина А.А. Анализ эффективности функционирования многопараметрической системы / А.А. Ступина, А.А. Шигина, А.О. Шигин // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2013. – Вып. 2 (48). – С. 94-100.

3. Шигина А.А. Напряжения и стойкость шарошечных долот при бурении сложноструктурных массивов горных пород / А.О. Шигин, А.В. Гилев, А.А. Шигина // Горный информационно–аналитический бюллетень. Mining informational and analytical bulletin. – 2013. – Вып. 4. – С. 325-333.

4. Шигина А.А. Прогнозируемый ресурс шарошечных долот при бурении сложноструктурных горных массивов / А.О. Шигин, А.А. Шигина // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – Вып. 2. – С. 29-33.

5. Шигина А.А. Анализ функционирования автоматизированной интеллектуальной системы с адаптивным элементом / А.А. Шигина, А.А. Ступина, А.О. Шигин // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – Вып. 2 (52). – [Электронный ресурс] Режим доступа URL: <http://www.science-education.ru/116-12783> (дата обращения: 17.04.2014).

6. Шигина А.А. Математическое моделирование процесса функционирования системы «буровой станок – шарошечное долото – горная порода» в условиях неопределенности / А.Г. Пимонов, А.А. Шигина // Вестник Кузбасского государственного

технического университета. – 2015. – Вып. 5. – С. 131-137.

7. Шигина А.А. Автоматизация шарошечного бурения взрывных скважин на карьерах / А.О. Шигин, А.В. Гилев, А.А. Шигина // Горный журнал. – 2017. – Вып. 2. – С. 82-86. DOI: 10.17580/gzh.2017.02.16.

8. Шигина А.А. Адаптивная модель управления технологическим процессом в условиях неопределенности / А.А. Шигина, А.А. Ступина // Современные наукоемкие технологии. – 2017. – Вып. 5. – [Электронный ресурс] Режим доступа URL: <https://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=36673> (дата обращения: 26.06.2017).

В других изданиях:

9. Шигина А.А. Техничко-экономическое обоснование вращательно–подающего механизма с электромагнитной подачей рабочего органа бурового станка / А.О. Шигин, А.В. Гилев, А.А. Шигина // Технические науки – от теории к практике: труды X международной научно–практической конференции. – Новосибирск, 2012. – С. 93-101.

10. Шигина А.А. Системный подход к моделированию и определению вероятности отказов бурового станка / А.А. Ступина, А.А. Шигина // Вестник Московского университета им. С.Ю. Витте, Серия 1: Экономика и управление: труды XLI международной конференции молодых ученых «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе IT + SE`13». – Ялта–Гурзуф, 2013. – С. 256-258.

11. Shigina A.A. System of indicators for estimating the efficiency of boring rigs / A.A. Shigina, A.O. Shigin, A.A. Stupina // Proceedings of the first international scientific conference “Global Science and Innovation”. – Chicago, 2013. – Vol. 2. – P. 471-480.

12. Shigina A.A. Control and management by resource of rolling cutter bits in drilling rock massif / A.A. Stupina, A.O. Shigin, A.A. Shigina, M.V. Karaseva, L.N. Korpacheva // Middle–East journal of scientific research. – 2014. – Vol. 21 (1). – P. 84-90.

13. Шигина А.А. Применение технологии экспертной системы при построении интеллектуальных систем поддержки принятия решений / А.А. Шигина // Концепт. Современные научные исследования. – 2014. – Вып. 2. – [Электронный ресурс] Режим доступа URL: <http://e-koncept.ru/2014/54977.htm> (дата обращения: 06.05.2014).

14. Shigina A.A. Automated intellectual system with the short-duration nature of feedback / A.A. Stupina, A.A. Shigina, A.O. Shigin, M.V. Karaseva, S.N. Ezhemanskaja // Life science journal. – 2014. – Vol. 11 (8s). – P. 302-306.

15. Шигина А.А. Математическое моделирование динамической системы / А.А. Шигина // Вопросы технических наук: новые подходы в решении актуальных проблем: труды международной научно-практической конференции. – Казань, 2014. – С. 54-58.

16. Обработка геологической информации с помощью спутниковых навигационных систем / А.А. Шигина // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2014: материалы XV Международной научно-практической конференции. – Кемерово, 2014 [Электронный ресурс] Режим доступа URL: http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/Sibresource/2014/materials/pages/Articles/gornye_mashiny_i_oborudovanie/shigina.pdf.

17. Шигина А.А. Математическая постановка задачи оптимизации технологических процессов / А.А. Ступина, А.А. Шигина // Системный анализ в проектировании и управлении: сборник научных трудов XIX международной научно-практической конференции. – СПб., 2015. – С. 172-179.

18. Shigina A.A. Development of automated closed-loop drive upon designing of roller bit drilling rig for open pits / A.O. Shigin, A.A. Shigina, A.V. Gilev, S.A. Vokhmin, G.S. Kurchin // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2015. – Vol. 80 (1). – P. 95-104.

19. Шигина А.А. Адаптивный алгоритм оптимального управления системой «буровой станок – шарошечное долото – горная порода» в условиях неопределенности / А.Г. Пимонов, А.А. Шигина // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. – Кемерово, 2015. –

[Электронный ресурс] Режим доступа URL: <http://sibscience.ru/page/ITSIT-2015/ITSIT/6-Matematicheskoe-modelirovanie/6041.pdf>.

20. Shigina A.A. Mathematical formulation of technological processes optimization problem / A.A. Stupina, A.A. Shigina, A.O. Shigin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. TIAA. – IOP Publishing. – 2015. – Vol. 94 (1). – P. 1-6, DOI:10.1088/1757-899X/94/1/012001.

21. Shigina A.A. Adaptive parametric identification algorithm of dynamic system's mathematical model / A.A. Stupina, A.A. Shigina // Modern informatization problems: Proceedings of the XXI-th International Open Science Conference. – Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House. – 2016. – P. 206-213.

22. Шигина А.А. Управление технологическими режимными параметрами с помощью автоматизированной интеллектуальной системы / А.А. Шигина // Science Time. – 2016. – № 2 (26). – С. 633-639.

23. Shigina A.A. Multicriteria optimization problem in technological processes control / A.A. Shigina // Science Time. – 2016. – Vol. 3 (27). – P. 561-567.

24. Шигина А.А. Формирование структуры интеллектуальной автоматизированной системы управления технологическими процессами / А.А. Шигина // Научная сессия ТУСУР–2016: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – В 6 частях. – Томск, 2016. – Ч. 3. – С. 142-145.

25. Shigina A.A. Model of rock drilling process in terms of roller cone bit remaining life / A.A. Shigina, A.O. Shigin, A.A. Stupina, G.S. Kurchin, A.K. Kirsanov // International Journal of Applied Engineering Research (IJAER). – 2016. – Vol. 11, № 19. – P. 9792-9799.

26. Shigina A.A. Control by technological mode parameters with an intellectual automated system / A.A. Stupina, A.A. Shigina, A.O. Shigin, M.V. Karaseva, L.N. Korpacheva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. – 2016. – Vol. 155 (1). – P. 1-5, DOI: 10.1088/1757-899X/155/1/012025.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, патенты:

27. Шигин А.О., Шигина А.А., Ступина А.А., Непомнящий С.А. Система моделирования режимных параметров процесса бурения. – М.: Роспатент. Свидетельство № 2014612158 от 20.02.2014.

28. Шигин А.О., Гилев А.В., Ларин А.В., Глазунов В.П., Шигина А.А. Станок шарошечного бурения. Патент № 2578684 РФ, МПК E21B7/02, E21B3/02. № 2014154491/03; заяв. 30.12.2014; опубл. 27.03.2016, Бюл. № 9.

29. Шигин А.О., Гилев А.В., Шигина А.А. Устройство для бурения скважин. Патент № 2580118 РФ, МПК H02K3/00, E21B7/00, E21B4/04. № 2014154493 от 30.12.2014; опубл. 10.04.2016, Бюл. № 10.

30. Ступина А.А., Шигина А.А., Непомнящий С.А. Программный комплекс для расчета и оптимизации режимных параметров шарошечного бурения. – М.: Роспатент. Свидетельство № 2017615058 от 03.05.2017.

Шигина Анна Александровна
Интеллектуальная автоматизированная система управления
процессом шарошечного бурения
Автореферат

Подписано к печати 20.10.2017. Формат 60x84/16
Уч. изд. л. 1.0 Тираж 100 экз. Заказ № ____
Отпечатано Библиотечно-издательским комплексом
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел. (391) 206-26-67; <http://bik.sfu-kras.ru>
E-mail: publishing_house@sfu-kras.ru