

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский федеральный университет»

На правах рукописи

ШИГИНА АННА АЛЕКСАНДРОВНА

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА
УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ШАРОШЕЧНОГО БУРЕНИЯ**

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
А.А. Ступина

Красноярск – 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. Исследование подходов к управлению процессом шарошечного бурения	12
1.1 Современное состояние техники и технологии бурения на карьерах ...	12
1.2 Особенности технологии бурения нефтяных и газовых скважин.....	18
1.3 Базовые принципы построения автоматизированных систем управления процессом бурения	20
1.4 Особенности управления процессом шарошечного бурения.....	31
Выводы.....	37
Глава 2. Математическое моделирование процесса шарошечного бурения.....	40
2.1 Управление процессом шарошечного бурения	40
2.2 Взаимосвязь параметров модели процесса шарошечного бурения.....	45
2.3 Математическая формализация процесса шарошечного бурения.....	52
Выводы	67
Глава 3. Формирование и реализация модели управления шарошечным бурением в условиях неполной информации об изменении свойств породы.....	69
3.1 Структура интеллектуальной автоматизированной системы управления процессом шарошечного бурения с адаптивным элементом.....	69
3.2 Оптимизационная модель управления параметрами процесса шарошечного бурения	75
3.3 Моделирование процесса управления режимами бурения с учетом критериев оптимизации.....	84
3.4 Оценка эффективности управления шарошечным бурением по режимным параметрам.....	89

3.5 Оценка эффективности управления шарошечным бурением по интегральному показателю.....	96
Выводы	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	103
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	105
Приложение А. Акты об использовании результатов диссертационного исследования	120

ВВЕДЕНИЕ

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. Чефранов, А.А. Волков, Г.С. Бродов и зарубежные исследователи М.Е. Hossain, J. Thorogood, F. Iversen, С. 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, K.S. 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 используемых 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.

ГЛАВА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ ПРОЦЕССОМ ШАРОШЕЧНОГО БУРЕНИЯ

1.1 Современное состояние техники и технологии бурения на карьерах

В настоящее время наибольшая доля полезных ископаемых в России и за рубежом добывается при помощи буро-взрывного метода. Для бурения скважин применяются буровые агрегаты – буровые станки и установки. Основным объемом бурения скважин (более 85%) осуществляется вращательным способом с использованием шарошечных долот (бурового инструмента), так как они наиболее универсальны и могут использоваться в разнообразных геологических условиях. Существует множество конструктивных решений по созданию различных видов буровой техники [77, 95, 129], однако основное применение для бурения взрывных скважин на карьерах получили станки шарошечного бурения (СБШ).

Исследованиям технологии шарошечного бурения на карьерах и вопросу определения оптимальных значений режимных параметров бурения посвящены работы В.Д. Буткина, В.А. Перетолчина, Б.А. Симкина, Л.И. Кантовича, Н.В. Мельникова, Р.Ю. Подэрни, Г.Д. Бревдо, Б.Н. Кутузова, А.Ф. Суханова, Н.Я. Репина, Р.М. Эйгелеса и других ученых [15, 18, 19, 36, 69, 86, 94, 95, 121]. Ими предложены аналитические зависимости, основанные на статистической информации, для расчета значений режимных параметров бурения горных пород.

Несмотря на значимость многочисленных исследований, посвященных развитию технологии бурения, в них недостаточно внимания уделено вопросам оптимального и своевременного регулирования режимных параметров при шарошечном бурении сложноструктурных горных пород применительно к проблеме повышения ресурса бурового инструмента и производительности станков. При этом требуют проведения специальных исследований вопросы управления шарошечным бурением.

Основные направления развития буровой техники связаны с увеличением

энерговооруженности, повышением надежности и ремонтпригодности всех систем, разработкой средств снижения динамических критических нагрузок, автоматизацией управления процессами, рационализацией режимных параметров, совершенствованием конструкции бурового инструмента, повышением энергоэффективности и автономности станков.

На карьерах России применяют буровые станки типа СБШ (станок буровой шарошечный), СБР (станок бурения резанием), СБУ (станок буровой ударно-вращательного действия) и комбинированные (в типаже обозначенные СБУШ), рассчитанные на использование шарошечных, режущих, пневмоударных и других буровых инструментов.

Основные зарубежные фирмы-поставщики буровой техники:

- “Caterpillar”, включившая в 2011 году корпорацию “Bucyrus”, уже присоединившую корпорацию “Terex” и фирму “Reeddrill”;
- “Atlas Copco”, которая расширила ассортимент своих станков, присоединив к себе американскую компанию “Ingersoll-Rand”;
- “Sandvik”, производящая буровые станки фирмы “Driltech”;
- “P&H Mining Equipment”, входящая в корпорацию “Joy Global”.

В России основными производителями буровых станков для карьеров являются:

- ООО «УГМК РУДГОРМАШ-Воронеж»;
- Бузулукский завод тяжелого машиностроения, г. Бузулук;
- «ИЗ-КАРТЭКС» (Объединённые машиностроительные заводы), г. Колпино.

Краткая характеристика бурового оборудования зарубежного и отечественного производства приведена в таблицах 1.1 и 1.2. Все зарубежные производители изготавливают легкие станки с диаметром бурения менее 200 мм и массой 30 – 40 т и мощные станки для скважин более 380 мм и массой от 140 т (кроме P&H Mining Equipment, выпускающего только мощное оборудование). Зарубежную технику отличает возможность комплектации станков оборудованием как для шарошечного, так и для пневмоударного бурения.

Таблица 1.1 – Техническая характеристика буровых станков зарубежного производства

Фирма-производитель, модель	Диаметр бурения, мм	Глубина бурения, м	Бурение за один проход, м	Осевое усилие, кН	Тип привода	Масса станка, т
Caterpillar (Bucyrus – Terex – Reedrill)						
MD 6240 Series	152 – 270	до 55,5	12,8 – 15,8	222	дизель	62,7
MD 6290 Series	152 – 270	до 52,7	8,6 – 11	277	дизель	54,6
MD 6420 Series	229 – 311	до 74	10,3 – 16,5	382	дизель	95,6
MD 6540 Series	229 – 381	до 85	16,5 – 20	382	электрический	131,1
MD 6640 Series	251 – 406	до 85,3	19,81	627	электрический	154
MD 6750 Series	273 – 444	39,6	18,3	733	электрический	183,7
Atlas Copco (Ingersoll-Rand)						
DM25-SP	102 – 178	15,2	12,2	111	дизель	28
DM30	127 – 171	45	7,9	133	дизель	28
T4BH	143 – 251	54	6,8 – 8,4	133	дизель	26
DM45	149 – 229	53,3	8,5	200	дизель	41
DML-SP	152 – 251	18,3	15,2 – 18,3	240	дизель	45
DML	149 – 270	62,5	8,5; 9,1	267	дизель	50
PV235	152 – 251	73; 64; 54,9	12,2; 10,7; 9,15	267	дизель	58
DM – M3	251 – 311	73,2	11,3	400	дизель	104
PV271	171 – 270	32	16,8	311	дизель	84
PV275	171 – 270	59,4	11,3	311	дизель	79,4
PV351	270 – 406	41,1	19,8	534	дизель; электрический	188
Sandvik – Tamrock – Driltech						
D25KS	127 – 172	27	8,7	124	дизель	32,7
D245S	127 – 203	45	8,7	178	дизель	35
D45KS	152 – 229	63	8,7	200	дизель	47,6
D50KS	152 – 229	45	8,7	222	дизель	47,6
D55KS	172 – 254	17	17	200	дизель	61,2
D75KS	229 – 279	53	10,7	334	дизель	63,5
D90KS	229 – 381	85	12,2	400	дизель	140,6
1190E	229 – 381	85	12,2	400	дизель; электрический	145,2
DR460	251 – 311	75	12,3	356	дизель	93,4
P&H Mining Equipment						
P&H 250XP-DL	204 – 349	85	12	422	дизель	113,4
P&H 250XP-ST	204 – 349	60	19,8	422	дизель	113,4
P&H 250 hard rock	204 – 349	60	19,8	490	дизель	145
P&H320XPC	до 559	60	19,8	667	электрический	165

Продолжение таблицы 1.1

Фирма-производитель, модель	Диаметр бурения, мм	Глубина бурения, м	Бурение за один проход, м	Осевое усилие, кН	Тип привода	Масса станка, т
Shramm						
T450BH	до 165	38	7,6	78	дизель	19,5
T450WS	165	91,5	6,1	100	дизель	22,7
T555	165	53	6,1 или 7,6	133	дизель	23,1
T685WS	165	53	6,1 или 7,6	156	дизель	25,9

Зарубежные станки отличаются наличием гидравлического привода основных механизмов (вращатель, механизм подачи, хода и т. д.) и информационно-диагностической системы, имеющей функции контроля заданного давления в гидросистеме и поиска неисправностей [74].

Современные станки для карьеров как зарубежные, так и отечественные (таблица 1.2), имеют компьютерную систему, отслеживающую показания приборов с выводом на центральную панель [98, 147]. Любые станки шарошечного бурения дополнительно могут оснащаться системой спутникового позиционирования GPS/ГЛОНАСС. Однако все существующие системы автоматики не позволяют эффективно управлять режимами бурения в зависимости от изменяющихся свойств горных пород.

Таблица 1.2 – Техническая характеристика буровых станков российского производства

Модель	Диаметр скважины, мм	Глубина бурения, м	Осевое усилие, кН	Скорость передвижения, км/ч	Компрессор	Привод	Масса станка, т
«РУДГОРМАШ»							
СБШ-160 / 200-40Д	160 – 215	40	235	0 – 1,3	ВНИИ Компрессормаш Atlas Copco 25 700	дизель Cummins QSK19, 485 кВт	50
СБШ-250 / 270-60	250; 270	60	350	0 – 1,3	ВНИИ Компрессормаш Atlas Copco 32 680	электрический	90
СБШ-250МНА-32	250; 270	32; 47	350	0 – 1,8	ВНИИ Компрессормаш Atlas Copco 32 680	электрический, 430 – 500 кВт	85 – 90

Продолжение таблицы 1.2

Модель	Диаметр скважины, мм	Глубина бурения, м	Осевое усилие, кН	Скорость передвижения, км/ч	Компрессор	Привод	Масса станка, т
«РУДГОРМАШ»							
СБШ-250МНА-32 КП	250; 270; 311	32	350	0 – 1,8	ВНИИ Компрессормаш Atlas Сорсо 50 680	электрический, 600 кВт	120
СБШ-160 / 200-40Д	160 - 215	40	235	0 – 1,3	ВНИИ Компрессормаш Atlas Сорсо 25 700	дизель Cummins QSK19, 485 кВт	50
Бузулукский ЗТМ							
ЗСБШ-200-60	200; 250	60	300	0,75	ВНИИ Компрессормаш	32	700
6СБШ-200-32	200; 250	40	300	0,75	ВНИИ Компрессормаш	25	700
ИЗ-КАРТЭКС (ОМЗ)							
СБШ-270ИЗ	250; 270	32	450	0 – 1,47	Пензакомпрессормаш	38	500
СБШ-270 34	250; 270	34	350	0 – 1,47	Пензакомпрессормаш	38	500

Анализ данных таблиц 1.1 и 1.2 показывает большой ассортимент выпускаемого бурового оборудования зарубежных производителей в сравнении с российскими. В планах развития производителей отечественной буровой техники предусматривается: создание станков шарошечного бурения с диаметром долота до 320 – 350 мм; осуществление бурения скважин глубиной до 20 – 25 м; освоение новых типов шарошечных долот и применение многоцелевых станков, использующих различные принципы бурения; совершенствование автоматизации управления станками.

Зарубежные производители предлагают заказчику широкий диапазон диаметров и глубин бурения, мощностей первичного привода и т. д. Наиболее популярными производителями универсальных буровых станков легкого и среднего класса являются фирмы “Atlas Copco”, выпускающая девять моделей гидрофицированных станков и “Sandvik-Tamrock-Driltech” [86]. В станках этих компаний используется единый первичный дизельный двигатель, приводящий в действие компрессор и насосную станцию, которая обеспечивает работу всех приводов и агрегатов станка.

Анализ эксплуатации отечественного парка тяжёлых станков вращательного бурения шарошечными долотами показывает, что на крепких породах лучше других показал себя станок СБШ-250МНА-32 производства ООО «УГМК РУДГОРМАШ-Воронеж», который проектируется специально для рудных карьеров. Станок СБШ-270ИЗ Ижорского завода обеспечивает весьма высокопроизводительную работу при бурении относительно слабых пород за счёт лучшего выноса бурового шлама, сокращения времени вспомогательных операций в связи с наличием более длинных штанг (11 м).

Станок шарошечного бурения СБШ-250МНА-32 (рисунок 1.1) перемещается на гусеничном ходу 5. На платформе станка расположено машинное отделение 4, являющееся силовой конструкцией станка. В передней части станка по продольной оси установлен рабочий орган 1 на специальных опорах, закрепленных на силовых элементах машинного отделения. Он устанавливается в рабочее и транспортное положения двумя гидроцилиндрами 2, шарнирно соединенными с опорами мачты. Для бурения станок поднимается и горизонтируется на трех гидродомкратах: двух передних 7 и заднем 6. Управление станком осуществляется из кабины машиниста 3.

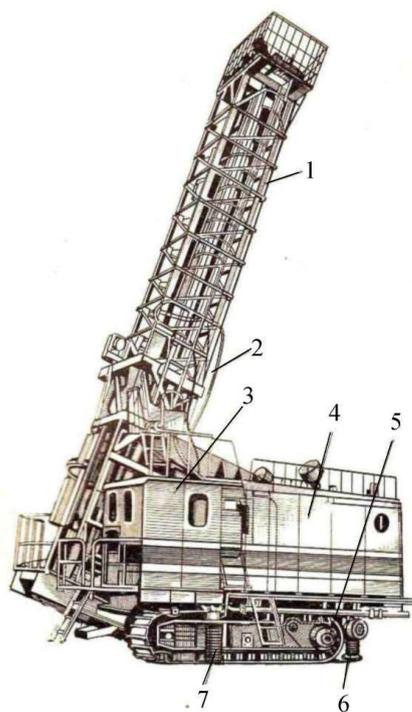


Рисунок 1.1 – Конструктивная схема станка шарошечного бурения СБШ-250МНА-32

Механическая скорость бурения (интенсивность разрушения породы на забое) зависит как от типа используемого долота, так и от режимных параметров процесса бурения: осевого усилия $P_{ос}$, с которым вращательно-подающий механизм (ВПМ), посредством бурового става и бурового инструмента воздействует на породу; частоты вращения $n_{вр}$, с которой вращается буровой инструмент, что характеризует определенное время контакта зубцов шарошек с породой. Также на процесс бурения влияет количество подаваемого в скважину сжатого воздуха, обеспечивающего удаление бурового шлама. Однако, изменение этого параметра связано с увеличением или уменьшением объема образующегося шлама, что происходит при существенном изменении производительности. Изменение объема шламообразования, как правило, возможно при существенном и длительном изменении свойств породы, скорости бурения и не требует быстрого автоматического регулирования производительности компрессора.

1.2 Особенности технологии бурения нефтяных и газовых скважин

Исследованиям технологии шарошечного бурения нефтяных и газовых скважин и оптимизации процесса бурения посвящены работы российских ученых Н.Б. Ситникова, А.В. Орлова, Е.А. Козловского, Г.С. Бродова, И.Г. Шелковникова, Н.Г. Серeda, Г.А. Кулябина, М.Р. Мавлютова, зарубежных исследователей J.F. Brett, S. Salehi, X. Shi, C. Chapman, J. Sugiura и других ученых [16, 41, 45, 51, 65, 85, 88, 125, 126, 134, 141]. Для исследования влияния режимных параметров на процесс бурения и определения наиболее значимых контролируемых факторов зарубежные авторы предлагают использовать методы дисперсионного анализа, нейросетевые методы [148], алгоритмы оптимизации скорости проходки [126].

Согласно современному состоянию исследований по данной научной проблеме, не учтено влияние многих режимных параметров и неконтролируемых факторов на технологический процесс. Нерациональный и несвоевременный выбор режимных параметров бурения, не адаптирующихся к оптимальным

значениям, является причиной низкого ресурса, непредвиденного отказа долот и существенно заниженной производительности.

Схематично современный способ бурения ствола скважины можно представить следующим образом (рисунок 1.2). Породоразрушающее устройство – шарошечное долото, оснащенное зубьями, вращается в горизонтальной плоскости либо ротором при помощи колонны труб (бурильной колонны), либо глубинным двигателем (турбобуром, электробуром, винтовым двигателем), режущими элементами внедряется в породу на забое под действием осевого усилия, создаваемого частью бурильной колонны, за счет вращательного движения скалывает частицы породы и тем самым обеспечивает углубление забоя и ствола скважины. Разрушенная порода удаляется с забоя промывочным агентом (воздух, вода, аэрированная жидкость, пена, буровой раствор, нефть, эмульсия и т.д.), непрерывно подаваемым буровым насосом на колонне бурильных труб.

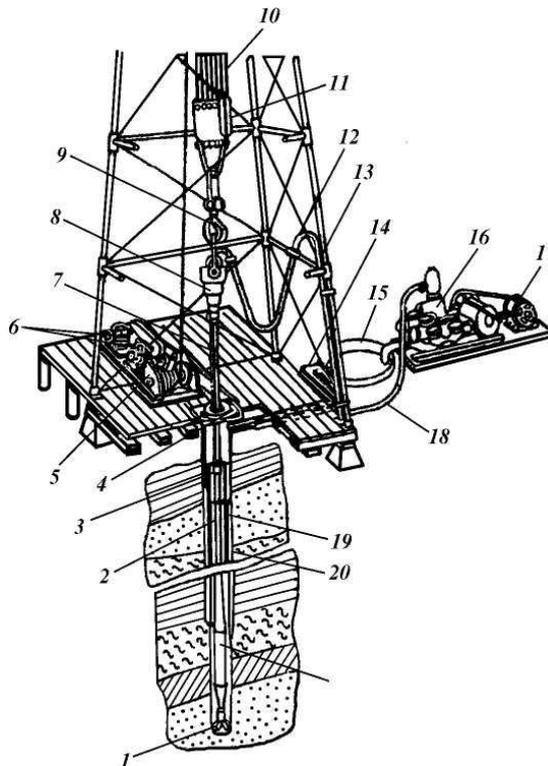


Рисунок 1.2 – Схема бурения скважины:

1 – долото; 2 – бурильные трубы; 3 – переводник; 4 – ротор; 5 – лебедка; 6 – двигатели привода лебедки и ротора; 7 – ведущая труба; 8 – вертлюг; 9 – крюк; 10 – талевого канат; 11 – талевого блок; 12 – буровой шланг; 13 – вышка; 14 – желоба; 15 – емкость циркуляционной системы; 16 – буровой насос; 17 – двигатель насоса; 18 – нагнетательный трубопровод; 19 – обсадная колонна; 20 – тампонажный цемент; 21 – забойный двигатель

Осевое усилие создается в основном частью веса находящихся над долотом утяжеленных бурильных труб и забойного двигателя. Используются гидравлические, гидроударные и другие способы передачи нагрузки. На долото диаметром 215,9 мм создается нагрузка около 150-250 кН. Крутящий момент в процессе бурения в зависимости от типа долота (шарошечное, алмазное и т. д.) и свойств пород (твердые, мягкие, пластичные) при диаметре скважины 216 мм составляет от 1000 до 3000 Н-м. Частота вращения долота при роторном бурении 20-1200 об/мин, при бурении винтовыми двигателями 150-250 об/мин, при турбинном и электробурении без редуцирования 250-800 об/мин, с редукторами 200-300 об/мин [51].

При общей установленной мощности буровых установок 1000-1500 кВт для бурения на глубину до 4500 м на долото передается от 200 до 500 кВт. Несмотря на низкий коэффициент передачи мощности на забой в среднем мощность на долоте в несколько раз больше, чем при ударном бурении, что обеспечивает более высокие скорости проходки, достигающие 100 м/ч при бурении пород средней твердости и мягких.

Реализация идей автоматизации управления процессом бурения является совокупностью сложных задач анализа, моделирования и оптимизации. Высокая сложность решения данных задач связана с недостатком информации о физико-механических свойствах породы в процессе бурения и отсутствием средств точного прогнозирования этих свойств для применения полученных сведений в расчете и корректировке режимных параметров с целью оптимизации. Решить такие задачи можно только на основе применения современных методов и средств автоматики и компьютерной техники.

1.3 Базовые принципы построения автоматизированных систем управления процессом бурения

Важную роль в управлении технологическими процессами и автоматизации в объектах горнодобывающей, нефтегазовой и строительной промышленности

играют системы управления. 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. Чефранов, А.А. Волков, Г.С. Бродов и зарубежные исследователи М.Е. Hossain, J. Thorogood, F. Iversen, С.Д. Chapman, J. Sugiura и другие ученые [16, 18, 21, 31, 73, 98, 126, 131, 133, 146].

В настоящее время проблема построения таких систем достаточно актуальна, так как повышение эффективности управления процессом бурения невозможно без использования автоматизированных систем управления (АСУ), основанных на применении информационных технологий и прогрессивных математических моделей управления [143]. Отечественные системы контроля и управления процессом бурения («Леуза 1,2», «Узбекистан 2», «Уралмаш 125А», «Зоя 1,2» и др.) реализуют алгоритмы оптимизации процесса только по одному параметру – осевому усилию для каждого интервала процесса бурения, причём определяется не точное значение, а рациональный интервал изменения этого параметра. Зарубежные АСУ процессом бурения (“CDC”, “DAT” и др.) рассчитывают по математической модели только два оптимальных параметра – осевое усилие и скорость вращения долота, смена породы учитывается в модели изменением параметрических коэффициентов модели для каждого слоя пород с помощью обработки массива статистической информации, что является достаточно длительным процессом.

Режим работы бурового агрегата характеризуется значениями технологических параметров процесса бурения, который проводится в условиях высокой информационной неопределенности, вызванной случайным изменением свойств пород различной крепости (буримости) [10, 117, 138], вследствие чего при ручном управлении процессом бурения невозможно обеспечить оптимальность режима бурения. В зоне оптимальных режимов буровой агрегат работает примерно 5-10% рабочего времени, на поиск которых при ручном управлении машинист расходует до 15-20% времени [30], время простоев

вследствие принятия неправильных технологических решений в процессе бурения составляет 5-7% от общего рабочего времени, а при оценке оптимальности назначаемых режимов бурения его ошибки достигают около 90-100%. Но современные АСУ процессом бурения не позволяют своевременно реагировать на случайное изменение свойств породы, подстраивать режимы работы и компенсировать возмущения в процессе бурения [92, 116]. Основопологающим условием повышения качества управления процессом бурения является обеспечение требований по оперативности, своевременности, точности передачи информации, достижению оптимальных значений режимных параметров процесса бурения при минимальных затратах на их поиск.

Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) образована автоматизированными высокопроизводительными машинами и агрегатами, оснащенными соответствующими средствами управления. АСУ ТП является первичным уровнем АСУ, т. е. представляет собой очередную ступень развития широко используемых средств и методов управления технологическими объектами. Современное буровое оборудование оснащено системами автоматики, контролирующими некоторые параметры и их простейшие соотношения, не учитывая быстро изменяющихся свойств пород. При этом процесс бурения не полностью автоматизирован.

АСУ процессом бурения является комплексной человеко-машинной системой, которая основана на использовании современных автоматических средств получения, передачи, обработки данных и применении экономико-математических методов решения основных задач управления. Обеспечение высоких технико-экономических показателей осуществляется с помощью входящих в структуру АСУ устройств управления процессом бурения, автоматизации вспомогательных операций, регулируемых приводов основных механизмов агрегата [89].

На рисунке 1.3 представлена в общем виде блок-схема функционирования АСУ ТП.

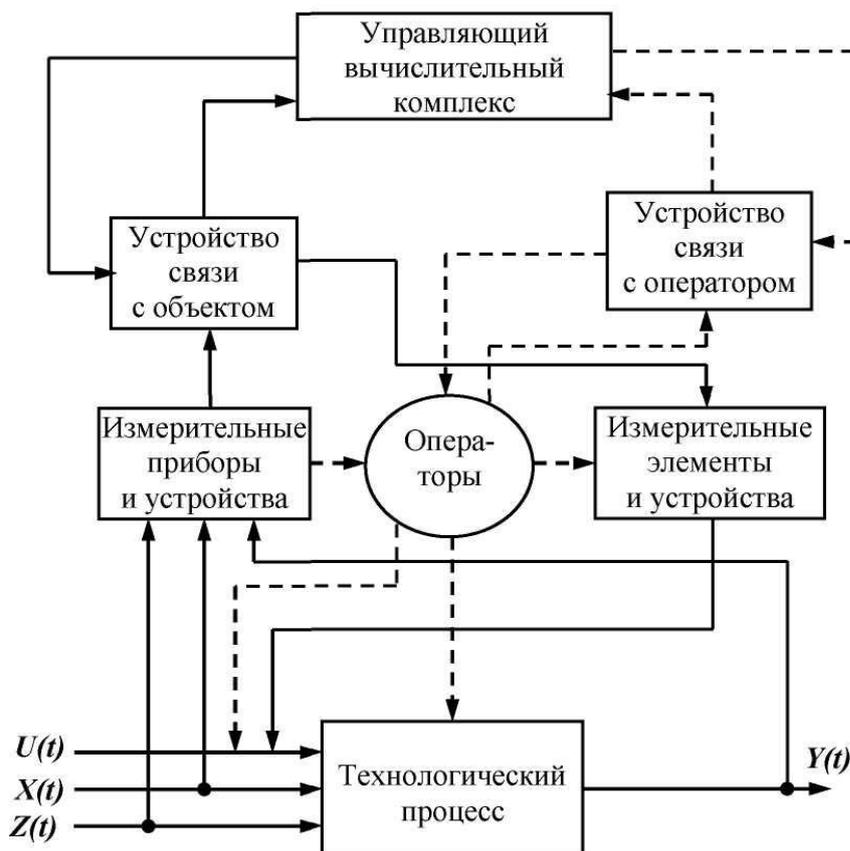


Рисунок 1.3 – Обобщенная блок-схема функционирования АСУ ТП

Информация о входах в АСУ ТП (рисунок 1.3): управляющих $U(t)$; контролируемых, но неуправляемых $X(t)$; неконтролируемых $Z(t)$, а также о выходных параметрах $Y(t)$ технологического процесса и о режимах функционирования оборудования с измерительных приборов и устройств по каналам связи поступает в управляющий вычислительный комплекс (УВК), где обрабатывается в определенной последовательности по заданным алгоритмам. Через устройства связи УВК выдает управляющие команды операторам, исполнительным элементам и устройствам, реализующим управление технологическим процессом и изменяющим режимы функционирования оборудования.

АСУ процессом бурения имеет функциональную структуру [61, 89]. Это обусловлено объективными закономерностями, действующими в процессе выработки информации, которая обеспечивает управляемое протекание технологического процесса в зависимости от особенностей процесса.

Следовательно, АСУ ТП как человеко-машинная система должна иметь алгоритм функционирования, т. е. общую и текущую информацию об объекте управления. Данный алгоритм позволяет прогнозировать и направлять ход технологического процесса путем передачи управляющих воздействий объекту управления. Процесс выработки управляющей информации определяется алгоритмом, который формируется, исходя из конкретной задачи, с учетом физических особенностей процесса. Разработка алгоритма функционирования и формирование алгоритма управления – важнейшие элементы процесса проектирования АСУ ТП [23, 82, 83, 119].

Алгоритм управления формируется с учетом выбранных критериев и наложенных ограничений. В общем случае аналитически алгоритм записывается в виде: $A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 \dots \uparrow A_n$, т. е. управление последовательно передается от оператора A_1 к оператору A_2 и далее к оператору A_4 . После этого оператор A_5 проверяет выполнение критериев и ограничений, сравнивая их с заданной величиной. При невыполнении критериев и ограничений знаком \uparrow управление передается снова на оператор A_1 . В случае выполнения критериев и ограничений знаком \downarrow управление следует к оператору A_6 и т. д.

При решении задач АСУ ТП применяются логические алгоритмы управления [23, 98, 108, 118], с помощью которых обеспечивается контроль отдельных операций на предмет их возможности или недопустимости их ведения. На основе данных алгоритмов реализуются различные технологические блокировки, контроль режима работы бурового оборудования, включение и отключение резервных систем и т. д.

Современная тенденция разработки алгоритмов управления технологическими процессами базируется на выборе оптимального режима работ бурового оборудования и сохранении его, несмотря на наличие внешних случайных воздействий. Алгоритмы оптимального управления обеспечивают максимальную эффективность ведения технологических процессов по заданным критериям и наложенным ограничениям.

Выбор принципа управления режимами бурения – сложнейшая задача, возникающая при автоматизации процесса бурения. Известны различные принципы управления и оптимизации режимов бурения [16, 107]: с использованием модели бурения; с идентификацией пород; с использованием модели бурения и поиском экстремума; с поиском экстремума; с беспойсковой экстремальной настройкой; с управлением по параметрам вибрации и др.

Принцип управления режимными параметрами процесса бурения на основе исходной модели бурения [50, 61] основан на допущении, что вид модели бурения остается неизменным, а изменяются только ее параметры. Исходная модель формируется путем статистической обработки данных, полученных в процессе исследования работы бурового агрегата. К преимуществам принципа относятся: простота аппаратной реализации и обеспечения устойчивости управляющих систем, высокое быстродействие реализованных систем. Недостатки обусловлены жесткостью алгоритма управления, отсутствием учета ряда факторов (изменения крепости, трещиноватости пород, вибраций), необходимостью значительного объема предварительных исследований.

Принцип регулирования режимных параметров процесса бурения в функции крепости пород используют при управлении процессом шарошечного бурения. Параметры бурения – осевая нагрузка $P_{ос}$, частота вращения $n_{вр}$ и скорость бурения $v_б$ изменяются согласно уравнениям [83]:

$$P_{ос} = P_{ос.0} + af; \quad (1.1)$$

$$n_{вр} = n_{вр.0} + b/f; \quad (1.2)$$

$$v_б = v_{б.0} + c/f, \quad (1.3)$$

где $P_{ос.0}$, $n_{вр.0}$, $v_{б.0}$, – начальные осевая нагрузка, частота вращения, скорость бурения; a , b , c – постоянные коэффициенты, зависящие от буримых пород, типа долота и т. д.; f – коэффициент крепости пород по шкале проф. М.М. Протождяконова.

На рисунке 1.4 показаны графики уравнений (1.1) – (1.3). Задача оптимизации решается косвенным методом путем выбора значений $P_{ос.0}$, $n_{вр.0}$, a , b , соответствующих минимальной себестоимости 1 м скважины.

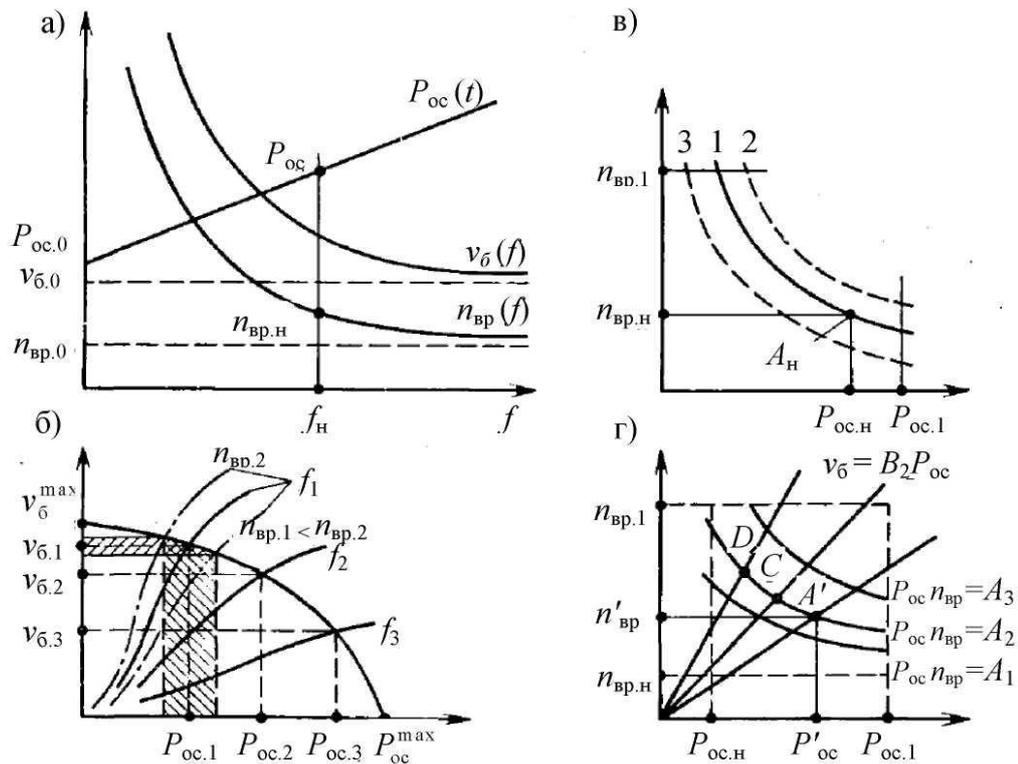


Рисунок 1.4 – Графики, иллюстрирующие принципы управления режимами бурения:

- а) в функции крепости пород; б) с использованием внешней характеристики системы подачи; в) путем анализа на плоскости управляющих воздействий; г) $P_{ос} n_{вр} = const$.

Исходный режим бурения выбирается путем изменения первичных настроек управляющей системы в соответствии с технологической картой оптимальных режимов бурения. Например, если задана начальная крепость пород f_H , то задаются оптимальные значения $P_{ос.н}$ и $n_{вр.н}$ начального режима бурения путем подбора параметров $P_{ос.0}$ и $n_{вр.0}$. Затем настраиваются параметры a и b в двух-трех различных породах путем настройки органов, влияющих на эти параметры.

Поскольку крепость породы не поддается прямому измерению, предложены модификации рассматриваемого принципа [83], согласно которым крепость оценивается по устанавливающимся осевым усилиям или скоростям подачи бурового долота. Осевая нагрузка устанавливается обратно пропорционально скорости бурения, а частота вращения бурового става – обратно пропорционально осевой нагрузке.

Связь между P_{oc} и v_6 практически реализуется (рисунок 1.4, б) путём формирования требуемой скоростной характеристики системы подачи. Тогда каждой породе будет соответствовать соотношение осевого усилия и скорости подачи, а частота вращения устанавливается с помощью нелинейного функционального преобразователя. В одной и той же породе при различных частотах вращения, например, в диапазоне $n_{вр.1} - n_{вр.2}$ (рисунок 1.4, б), скорость бурения меняется (заштрихованная область), что ведет к изменению осевого усилия.

Если система точно реализует алгоритмы (1.1) – (1.2), то траектория изображающей точки имеет вид гипербол 1, 2, 3 (рисунок 1.4, в). Выбор конкретной траектории зависит от настроек системы в исходной породе. Например, если выбрана точка A_n , то при изменениях крепости породы изображающая точка будет описывать траекторию 1, форма которой зависит от настройки системы в различных породах. Изображающая точка остается неподвижной, если крепость пород или скорость бурения не изменяются. После настройки системы выбор исходного и оптимального режимов бурения выполняется автоматически.

В США для управления процессом шарошечного бурения широко применяется принцип, при котором произведение $P_{oc}n_{вр}$ постоянно. Исходная точка A' (рисунок 1.4, г) выбирается для конкретных пород, типа долота, глубины бурения и других показателей по критерию минимума стоимости 1 м скважины. Данная точка определяется [83] пересечением кривой $P_{oc}n_{вр} = A$ и прямой $v_6 = BP_{oc}$, где A – постоянное число, кН·об/мин (например, 25000, 20000, 15000 и т. д.); B – коэффициент, характеризующий зависимость скорости бурения от осевого усилия. Коэффициент B можно считать определенным, если порода известна. Тогда задача сводится к выбору кривой $P_{oc}n_{вр} = A_i$. Этот выбор, как правило, осуществляется по опыту бурения аналогичных соседних скважин.

Принцип регулирования режимов бурения в функции крепости пород широко применяется в зарубежной технике. Однако, он подразумевает поддержание постоянного значения некоторого сочетания осевого усилия и

других параметров. Поддержание постоянного значения параметров или их сочетания делает невозможной оптимизацию режимов по причине ограниченного учета возмущающих воздействий. В частности, такой принцип не учитывает влияние ударных нагрузок и динамических процессов при прохождении долотом структурных элементов породы, таких как трещины, зоны изменения крепости и др.

Принципы управления режимными параметрами процесса бурения на основе исходной модели и поиска (принципы активно-пассивного типа) [61] используют элементы активного поиска экстремума двух типов: поиск методом стандартных режимов (проб) и экстремальный поиск по одному из переменных режимов бурения. При поиске методом стандартных режимов выбираются стандартные значения технологических параметров процесса бурения, который исследуется на этих режимах в породах различной крепости. Методом статистического усреднения находится зависимость между крепостью и скоростью бурения и строится график (рисунок 1.5), позволяющий быстро определить категорию породы по скорости бурения на стандартных режимах. После этого вручную или автоматически устанавливают оптимальные для данной породы по критерию себестоимости режимные параметры процесса бурения.

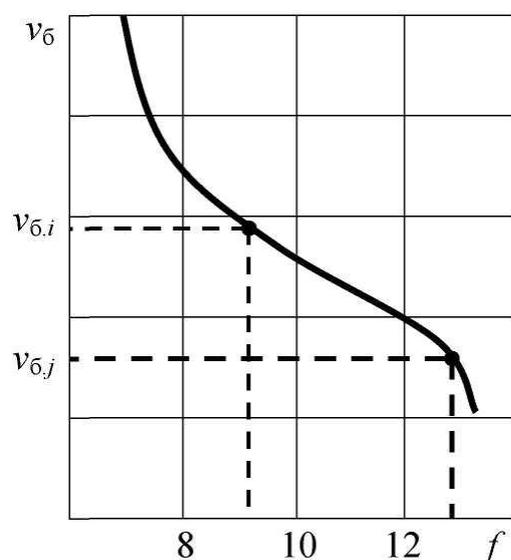


Рисунок 1.5 – График для определения крепости пород по скорости бурения

Указанный принцип реализуют в виде метода релейных, программных переключений \leftarrow , функциональных задатчиков \leftarrow и вручную с помощью графиков функций $P_{oc}(v_б)$, $n_{вр}(v_б)$ или специальных шкал и указывающих приборов [83]. При экстремальном поиске режимов бурения используются априорная модель процесса бурения с целью реализации некоторой оптимальной функциональной зависимости между режимными параметрами бурения и специальный поиск частного экстремума скорости бурения, удельных энергозатрат или условного износа долота.

Принципы управления режимными параметрами процесса бурения на основе поиска экстремума (принципы активного типа) [16, 61] не требуют построения исходной модели процесса бурения и выполняют его независимую оптимизацию. Они подразделяются на принципы прямой и косвенной оптимизации режимных параметров процесса бурения. Принцип прямой оптимизации заключается в поиске естественного экстремума скорости бурения, удельных энергозатрат и других параметров в области допустимых значений режимных параметров с применением известных методов многоканального экстремального поиска. Принцип косвенной оптимизации заключается в поисках искусственного или условного экстремума измеряемого показателя процесса бурения, с заданной точностью совпадающего с естественным экстремумом неизмеряемого показателя, который является обобщающим критерием типа себестоимости и производительности.

Беспоисковые принципы экстремальной настройки режимных параметров процесса бурения позволяют определять экстремумы критериев оптимальности без поиска. К ним относятся дифференциальные принципы настройки, применение использования корреляторов, эталонных, самонастраивающихся моделей и т. д. [82, 83, 119].

Принцип управления режимными параметрами процесса бурения по параметрам вибрации [46, 83] заключается в создании максимального давления на долото и регулировании частоты вращения по уровню вибрации. Если уровень вибрации превышает допустимый предел, то автоматически поступает

команда на снижение частоты вращения. На рисунке 1.6 показана зависимость осевого усилия на долото от частоты вращения.

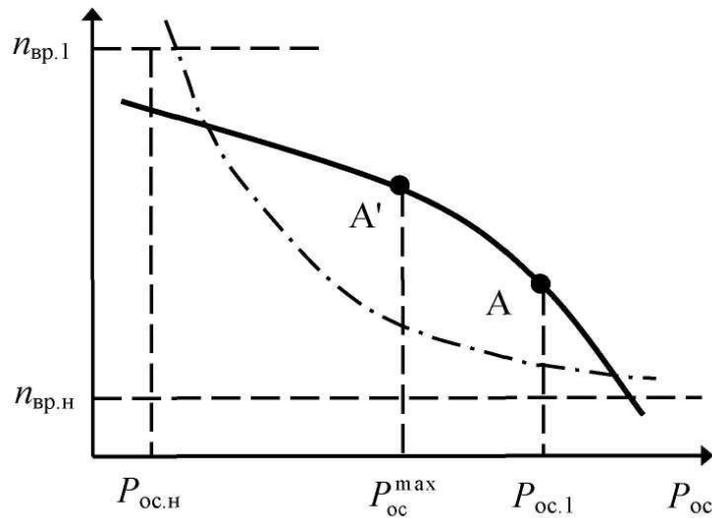


Рисунок 1.6 – Графики управления режимными параметрами процесса бурения по уровню вибрации

При изменении частоты вращения изображающая точка на плоскости управляющих воздействий перемещается в точку A (на границу допустимых вибраций). Если долото воспринимает максимальное осевое усилие $P_{ос}^{max}$, то изображающая точка займет положение A' . При этом конкретный вид границы допустимых вибраций заранее не известен и зависит от крепости пород и других факторов, при изменении которых она будет перемещаться на плоскости управляющих воздействий. Принцип управления по параметрам вибрации должен присутствовать в автоматизированной системе как вспомогательный или аварийный для обеспечения безопасности и экстренных действий с целью предотвращения или снижения количества поломок бурового долота и других высоконагруженных узлов и механизмов.

Принципы программного управления режимными параметрами процесса бурения [31] основаны на учете изменяющихся значений параметров и корректировке на этой основе выбираемых режимов. Важное значение указанные принципы имеют для повышения эффективности беспоисковых принципов

управления, которые используют априорную модель процесса бурения. Но в связи с трудностью предсказания (определения) свойств пород возможность применения принципа программного управления для выбора значений режимных параметров процесса бурения ограничивается.

Принципы одноканального управления режимными параметрами процесса бурения [61] применяются в тех случаях, когда имеется возможность воздействовать только на один режимный параметр. На плоскости управляющих воздействий траектория изображающей точки одноканальной системы имеет вид прямой, параллельной оси нагрузок или частоты вращения (рисунок 1.6).

Вследствие случайного изменения свойств породы в процессе шарошечного бурения для его автоматизации целесообразно применение принципа управления на основе исходной модели и метода экстремального поиска. При этом метод, сочетающий использование априорной модели и поиск экстремума оптимизации (программное и экстремальное управление), является более эффективным по сравнению с отдельными методами, основанными на автоматическом регулировании параметров процесса бурения по априорной модели и активном многоканальном поиске локальных и глобального экстремумов критерия оптимизации. В связи с отсутствием непосредственной информации о текущих и оптимальных значениях оптимизируемых параметров необходимо применение принципа косвенной оптимизации, который заключается в поисках искусственного или условного экстремума, измеряемого показателя бурения, соответствующего некоторому сочетанию осевого усилия и частоты вращения, который с заданной точностью совпадает с естественным экстремумом не измеряемого показателя бурения, определяющего эффективность процесса, который представляет собой интегральный критерий себестоимости.

1.4 Особенности управления процессом шарошечного бурения

Управление процессом шарошечного бурения представляет собой сложный технологический процесс нестационарного характера со случайным чередованием

возмущающих воздействий. Известные системы управления процессом шарошечного 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 неполной информации об изменении свойств породы. Кроме того, в известных системах управления существует несоответствие критериев оптимизации режимных параметров реальному процессу бурения.

Первая система автоматического управления процессом бурения была создана институтом Гипроуглеавтоматизация в 1959 – 1961 гг. В основу построения данной системы положен критерий стабилизации момента вращателя [50]. Принципиальная схема системы содержит два контура управления: замкнутый контур стабилизации тока нагрузки двигателя вращателя и разомкнутый контур управления частотой вращения. Но данная система не затрагивает весь ВПМ, а стабилизирует только ток нагрузки двигателя вращателя, а также при уменьшении момента сопротивления в результате прохождения трещиноватых пород регулятор резко увеличивает значение осевого усилия, что отрицательно сказывается на эффективности процесса бурения и ресурсе долота. Кроме того, при бурении более прочных пород система устанавливает низкое значение осевого усилия. Определенный период система выпускалась серийно, но широкого применения не нашла.

В 1961 году Челябинским политехническим институтом и научно-исследовательским институтом эффективности и безопасности горного производства (НИИОГР) предложена система, в которой инвариантность экстремального значения критерия оптимальности относительно изменений свойств пород обеспечивается за счет компенсации основного возмущения – случайного изменения сопротивляемости пород. Оценка сопротивляемости буримой породы разрушению получается в результате наблюдения текущих значений скорости бурения.

Система управления процессом бурения нефтяных и газовых скважин (рисунок 1.7) [49] включает контур, содержащий модель зависимости скорости

бурения, построенную на основе нечетких множеств и алгоритм оптимизации для определения оптимальных значений управляющих воздействий P_{oc} , $n_{вр}$ и момента смены долота. Объектом управления (ОУ) в данной системе выступают технологический процесс бурения и геологические данные о разрезе. Блок оптимизации получает данные от информационно-измерительной системы (ИИС), снимающей показания с датчиков, и данные из лаборатории по анализу породы.

При принятии неправильного решения возникает риск появления осложнений в процессе бурения, поэтому окончательный выбор управляющих воздействий оставлен за бурильщиком. С датчиков отражаются основные параметры процесса бурения с помощью подсистемы мониторинга. Модули реализуют предварительную подготовку данных для обучения модели и алгоритм выбора оптимальных управляющих воздействий.

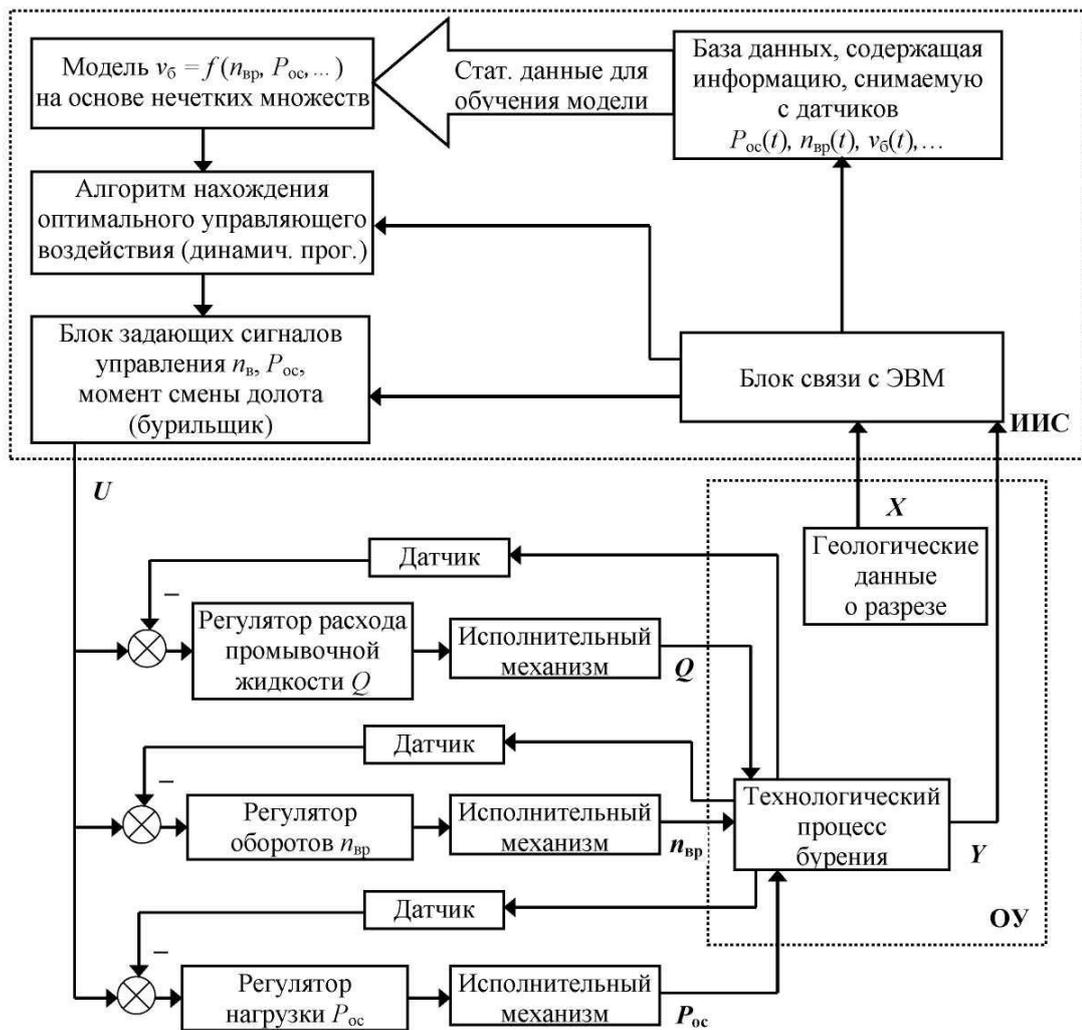


Рисунок 1.7 – Структурная схема системы управления процессом бурения

Данная система имеет низкую эффективность для бурения скважин по причине отсутствия взаимосвязи режимных параметров со структурными свойствами породы. Указанная система не позволяет быстро изменять значения режимных параметров по причине длительности процесса обучения заложенной нечеткой модели на основе обработки статистических данных. Значения устанавливаемых режимных параметров в данной системе существенно отличаются от оптимальных вследствие использования длительно накапливаемого массива статистической информации и несоответствия расчетных значений реальным процессам.

Существующая система управления буровым станком в структуре АСУ ТП участка буро-взрывных работ (БВР) (рисунок 1.8) [6] для бурения взрывных скважин на карьерах имеет одноуровневую структуру и основана на модели функциональных связей параметров ВПМ и выработке паспортного ресурса долота.



Рисунок 1.8 – Система управления буровым станком в структуре АСУ ТП участка БВР

При этом используемые модели не включают экстремумы значений режимных параметров, основанные на оптимальном процессе разрушения породы. Система включает дополнительный поток информации и средств ее отображения. Однако ее аппаратная часть и алгоритм функционирования не учитывают быстротечность и кратковременность ударных нагрузок при изменении прочностных и структурных свойств породы.

Проведенный анализ подходов к управлению процессом шарошечного бурения показал, что в условиях случайного изменения свойств породы при бурении основным методом является адаптивное управление. 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. Анализ подходов к решению задачи адаптивного управления процессом шарошечного бурения показывает, что по сравнению с методом управления на основе анализа свойств линейных адаптивных регуляторов, нелинейная постановка задачи позволяет проводить компоновку системы управления и анализ ее свойств одновременно.

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 [11, 35, 68, 100, 105, 132, 135, 139].

При управлении процессом шарошечного бурения следует учитывать его особенности. Разрушение породы происходит зубьями долота, которые вдавливаются в породу при вращении его шарошек и под действием значительного осевого усилия. При разрушении породы шарошечным долотом, кроме одноосного сжатия, присутствуют сдвиговые напряжения. На процесс бурения значительное

влияние оказывают физико-механические свойства пород. В связи с этим сопротивление пород разрушению отражает показатель буримости [75]. Бурение породы с чередующимися слоями, имеющими разную крепость, характеризуется возникновением ударной нагрузки. Удар, как правило, вызывает повышение напряжения в зонах контакта долота с породой, в подшипниковых узлах и соединительных элементах всего рабочего органа бурового агрегата. Шарошечное долото выходит из строя при разрушении различных его элементов, однако в 80% случаев оно отказывает в работе по причине разрушения подшипниковых узлов [27].

Как показывает практика, средние нагрузки с достаточной точностью соответствуют расчетным значениям осевого усилия и потребляемой мощности приводов бурового агрегата. Однако, для его эффективной эксплуатации необходимо определить зависимость мгновенной нагрузки от определяющих факторов. Неравномерность мгновенной нагрузки определяется как случайная функция времени. Предвидеть колебания нагрузки полностью невозможно даже при наличии подробного анализа структуры породы. В любом случае возникают случайные включения породы различной крепости, которые незначительно влияют на теоретическую скорость проходки, но оказывают значительное влияние на напряженное состояние шарошечного долота. В частности, периодические удары создают циклическую нагрузку, что приводит к усталостному разрушению его элементов.

Для оценки опасности ударных нагрузок необходимо определить уровень напряжения, возникающего при ударе. Ударная нагрузка характеризуется уровнем энергии, обеспечивающей продвижение долота через породу и изменением физико-механических свойств породы. Согласно исследованиям, представленным в работе [72], критические напряжения в опорах шарошечных долот определяются с учетом ударных нагрузок. Для роликовых тел качения напряжение определяется с помощью известного выражения [72]:

$$\sigma_{p,уд}^{max} = 600 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_r}{z \cdot D_p \cdot L_p} \cdot \frac{2\Pi'_6 + 2\Delta\Pi_6}{2\Pi'_6 + \Delta\Pi_6}}, \quad (1.4)$$

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; Π_6 – показатель буримости.

При бурении трехшарошечными долотами основную нагрузку воспринимают роликовые подшипники. Тела качения в долотах данного типа изготовлены из высокопрочных конструкционных сталей, предел прочности которых находится в диапазоне 1900 – 2300 МПа. Уровень нагрузок существенно зависит от изменения свойств породы в процессе бурения. Согласно работе [72], допустимое изменение физико-механических свойств породы выражается в изменении показателя буримости.

Таким образом, для построения системы управления процессом шарошечного бурения наиболее важным является поддержание режимных параметров в области значений, не выходящих за допустимые границы, соответствующие предельным прочностным характеристикам материалов тел качения шарошечных долот при изменяющихся свойствах породы.

Для своевременного реагирования системы управления на критические непрогнозируемые ударные нагрузки и их устранения необходим беспойсковый метод адаптации, базирующийся на аналитических вычислениях условий экстремума функционала, без использования пробных воздействий на объект, а для оптимизации технологического процесса бурения – поисковый, основанный на автоматическом поиске экстремума режимных параметров в условиях случайного изменения свойств породы. Выполнение приведенных условий необходимо для оптимального управления процессом бурения пород.

Выводы

В главе проведен анализ современного состояния технологии бурения и дана краткая характеристика бурового оборудования зарубежного и отечественного производства.

Выявлены базовые принципы построения автоматизированных систем

управления процессом бурения и необходимость применения средств адаптивного управления. Вследствие случайного изменения свойств породы в процессе шарошечного бурения для его автоматизации целесообразно применение принципа управления режимными параметрами на основе исходной модели процесса бурения и метода экстремального поиска, при этом важно определить расчетные зависимости оптимальных значений режимных параметров данного процесса.

Исследованы проблемы построения алгоритмов управления процессом бурения с использованием оптимальных значений режимных параметров. В связи с отсутствием непосредственной информации о текущих и оптимальных значениях оптимизируемых параметров, необходимо применение принципа косвенной оптимизации, который заключается в поисках искусственного или условного экстремума, измеряемого показателя бурения, соответствующего некоторому сочетанию осевого усилия и частоты вращения, который с заданной точностью совпадает с естественным экстремумом не измеряемого показателя эффективности бурения, который представляет собой интегральный критерий себестоимости.

При создании системы управления процессом шарошечного бурения необходимо учитывать его особенности:

- физические процессы, направленные на разрушение породы посредством шарошечных долот;
- факт и количественное значение изменений физико-механических свойств пород;
- наличие критических напряжений в опорах буровых долот при ударных нагрузках в результате изменения свойств породы, приводящих к преждевременному выходу из строя долота и вынужденному занижению производительности бурового агрегата.

Анализ процесса бурения и элементов бурового агрегата показал, что для осуществления управления технологическим процессом необходимо оперировать основными режимными параметрами: осевым усилием и частотой вращения. Для построения системы управления процессом шарошечного бурения важным является поддержание режимных параметров в области значений, не выходящих за

допустимые границы, соответствующие предельным прочностным характеристикам материалов тел качения шарошечных долот при изменяющихся свойствах породы. Максимально допустимое осевое усилие рабочего органа бурового агрегата становится величиной переменной соответственно изменению показателя буримости и структуры массива по мере углубления долота.

Выявлено, что для своевременного реагирования системы управления процессом шарошечного бурения на критические непрогнозируемые ударные нагрузки и их устранения необходим беспойсковый метод адаптации, а для оптимизации режимных параметров технологического процесса – поисковый. Выполнение приведенных условий необходимо для оптимального управления процессом шарошечного бурения.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШАРОШЕЧНОГО БУРЕНИЯ

2.1 Управление процессом шарошечного бурения

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 бурения большое влияние оказывают структура породного массива и его прочностные характеристики, которые могут выражаться через показатель буримости P_6 . Породный массив характеризуется такими свойствами, как трещиноватость, слоистость и другими нарушениями однородности. При осуществлении технологического процесса бурения такие конструктивные элементы бурового агрегата, как шарошечное долото и буровой став, испытывают спектр нагрузок. При моделировании процесса шарошечного бурения в условиях неполной информации об изменении свойств породы необходимо использовать текущие данные, включающие показатель буримости и его изменение, количество и размеры областей с изменяющимися физико-механическими свойствами, а также их среднестатистические значения на погонный метр скважины.

Для получения качественной объективной оценки эффективности процесса шарошечного бурения необходимо его математическое описание, на основе которого можно проявить зависимости показателей эффективности от параметров процесса бурения и их взаимосвязи. Выбор модели, описывающей изменение показателей эффективности процесса шарошечного бурения на основе исследуемых особенностей и характера взаимосвязей его параметров, является наиболее ответственным и сложным этапом моделирования [14, 22, 130, 148].

Управление режимными параметрами процесса бурения характеризуется большим количеством входных и выходных величин. На входы объекта поступают:

- входные управляющие воздействия U_1, U_2, \dots, U_n ;
- контролируемые возмущения K_1, K_2, \dots, K_m ;
- неконтролируемые случайные возмущения (окружающая среда) F_1, F_2, \dots, F_l .

Задающими параметрами X_1, X_2, \dots, X_i является информация об изменениях свойств породы, нагрузки на буровое долото и значений режимных параметров, отраженная в сигналах датчиков и других измерительных устройств и приборов.

На рисунке 2.1 представлена схема входных и выходных параметров объекта управления.



Рисунок 2.1 - Входные и выходные параметры объекта управления

За управляющие воздействия (U_n) принимаются только оперативно регулируемые входные переменные. Они должны удовлетворять требованиям линейности, возможности оперативного измерения (наблюдаемости) и иметь необходимый диапазон изменений.

Входными управляющими воздействиями для объекта управления являются корректирующие значения режимных параметров – осевого усилия $P_{ос}$, частоты вращения $n_{вр}$. Для формирования управляющего воздействия на объект управления,

соответствующего алгоритму его работы, необходим регулятор (управляющее устройство), выполняющий функции без непосредственного участия человека.

Задающими параметрами X_1, X_2, \dots, X_i является информация об изменениях физико-механических свойств породы, отраженная в сигналах датчиков и других измерительных устройств и приборов. Для получения оптимальных значений выходных параметров процесса бурения предлагается использовать адаптивный электромагнитный вращательно-подающий механизм (АВПМ), в котором без существенных задержек во времени происходит компенсация кратковременных случайных возмущений и получение сигнала об изменении свойств породы. Тогда задающим параметром может быть информация о величине и изменениях тока в обмотке электродвигателя, механической скорости бурения, расчетном значении осевого усилия и частоты вращения бурового долота. При этом к объекту управления (исполнительный механизм (АВПМ), процесс шарошечного бурения) постоянно поступают скорректированные входные управляющие воздействия, в частности, значения режимных параметров, в результате чего соответственно меняются значения выходных параметров. Реакцией объекта на эти воздействия и возмущения является установление на его выходе некоторых (определенных) значений выходных параметров Y_1, Y_2, \dots, Y_k , из которых управляемыми могут являться все или часть из них.

Контролируемыми возмущениями (K_m) являются устройство и свойства материалов бурового агрегата, диаметр и глубина скважины. Особенность процесса шарошечного бурения состоит в том, что он осуществляется в условиях недостаточного количества информации об изменении физико-механических свойств пород. Неконтролируемыми случайными возмущениями (F_i) являются непрогнозируемые изменения физико-механических свойств буримых пород, которые невозможно устранить. Входным переменным сопутствуют различные внутренние и внешние возмущения в виде помех и случайных нагрузок. Выходные параметры (Y_k) характеризуют физические результаты процесса разрушения породы и технико-экономические показатели бурения и могут быть

как наблюдаемыми и управляемыми, так и ненаблюдаемыми (но оперативно вычисляемыми) и неуправляемыми.

Основной особенностью управления является выбор совокупности воздействий. При регулировании поддерживается постоянной или изменяется по некоторому закону какая-либо величина, характеризующая процесс. Регулирование не в состоянии в общем случае обеспечить оптимальность режимных параметров процесса бурения, поскольку его оптимизация требует выбора оптимальных задающих воздействий в изменяющихся условиях. Этот выбор должен осуществляться постоянно в темпе с изменениями условий бурения.

Для любого инерционного объекта управления оказывается невозможным мгновенное изменение выходной переменной вслед за управляющим воздействием. При изменении управляющего воздействия на объект возникает переходный процесс [117]. В течение этого процесса вектор выходного состояния объекта управления не будет соответствовать требуемому значению. Характер переходного процесса определяется динамическими свойствами объекта управления и законом изменения управляющего воздействия (рисунок 2.2).

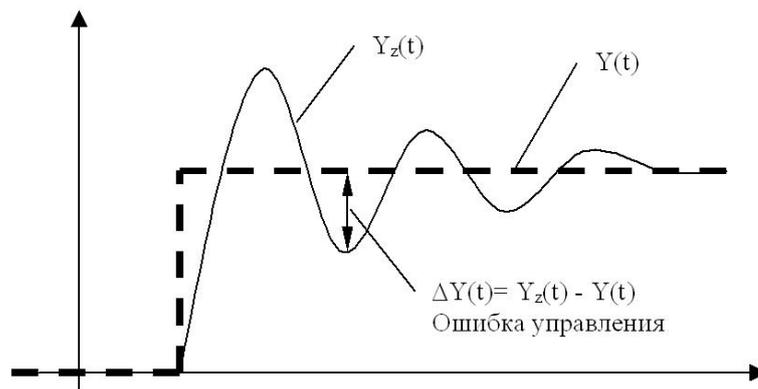


Рисунок 2.2 - Переходный процесс в объекте управления

Действие любого возмущающего фактора на объект управления приводит к отклонению значения вектора выходного состояния объекта управления от требуемого значения (ошибка управления объектом). То есть имеет место соотношение:

$$\Delta Y(t) = Y_z(t) - Y(t),$$

где $Y_z(t)$ – вектор выходного состояния, $Y(t)$ – требуемое значение вектора выходного состояния.

Одной из основных задач теории автоматического управления является определение такого алгоритма управления, который обеспечивает минимальное или не превышающего необходимого отклонение вектора выходного состояния объект управления от требуемого значения.

Процедура решения задачи оптимизации обязательно включает, кроме выбора управляющих параметров, еще и установление ограничений на эти параметры. Задача выбора ограничений является одной из самых важных, часто определяющей успех оптимизации. Проблема выбора оптимальных режимов бурения заключается в необходимости выбора совместно с ограничениями значения управляющих воздействий, приводящих к экстремуму (максимуму или минимуму) некоторой переменной, принятой за критерий оптимизации (эффективности) [90], т.е. обеспечить:

$$Y_i = \varphi(U_1, U_2, \dots, U_n) \rightarrow \text{extr} \quad (2.1)$$

при ограничениях

$$\begin{aligned} U_{\epsilon 1} &\geq U_1 \geq U_{\eta 1} \\ U_{\epsilon 2} &\geq U_2 \geq U_{\eta 2} \\ &\dots\dots\dots \\ U_{\epsilon n} &\geq U_n \geq U_{\eta n}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где Y_i – многомерная функция.

Сложность выбора критерия оптимизации состоит в том, что в задачах оптимизации и управления имеют дело со многими критериями, которые зачастую взаимно противоречивы. В частных задачах оптимизации, когда объект является частью технологического процесса, не всегда целесообразно выделять прямой экономический показатель эффективности работы исследуемого объекта.

Часто один критерий не обеспечивает оптимальности по другим критериям, поэтому ставится задача многокритериальной оптимизации:

$$I = \varphi_I(Y) = \varphi_I(y_1, y_2, \dots, y_m) \rightarrow \text{extr} \quad (2.3)$$

при ограничениях (2.2) и на компоненты функции Y :

$$y_i \in Y_i, i = 1, 2, \dots, m. \quad (2.4)$$

Значения $U_{10}, U_{20}, \dots, U_{n0}$ управляющих воздействий, доставляющие экстремум (2.1) и (2.3), называются оптимальными. При наличии неконтролируемых случайных возмущений важно не только обеспечить попадание в оптимум, т.е. определить $U_{10}, U_{20}, \dots, U_{n0}$, но и отслеживать все их изменения при случайном изменении экстремума критерия оптимизации.

Ограничениями для процесса шарошечного бурения являются пределы прочности конструктивных элементов, ресурс долота, максимальная мощность приводов бурового агрегата. Экстремальной целью является максимизация производительности при существующих условиях процесса шарошечного бурения (критерий оптимизации – производительность) и минимизация себестоимости при известной производительности (критерий оптимизации – себестоимость). Максимизация производительности возможна путем максимизации осевого усилия и оптимизации частоты вращения в сочетании с максимизацией ресурса.

2.2 Взаимосвязь параметров модели процесса шарошечного бурения

Высокая информационная неопределенность свойств породного массива в процессе бурения предопределяет необходимость формирования интеллектуальной системы управления процессом шарошечного бурения, включающей регулятор на основе адаптивного элемента. При этом для эффективного управления данным процессом необходимо поддерживать значения режимных параметров соответственно актуальным свойствам породы. В связи с этим, кроме алгоритма функционирования, интеллектуальная система управления должна включать входы, основанные на постоянном мониторинге всех необходимых характеристик объекта управления. Другими словами,

интеллектуальная система – это система с программным обеспечением, имеющее возможность с помощью вычислительных средств настраивать свои параметры в зависимости от состояния внешней среды [96]. Такие системы относятся к интеллектуальным АСУ. В интеллектуальных АСУ реализуются методы и алгоритмы сбора и обработки данных, за счет которых обеспечивается выполнение следующих задач [91]:

- выявление объективных данных и закономерностей на фоне разнородной информации;
- выработка решений в условиях неопределенности;
- воспроизведение неформализованных экспертных практик управления;
- автоматическое пополнение и сохранение базы знаний по эксплуатации системы;
- обучение операторов наиболее эффективным практикам управления.

Интеллектуальная система должна обладать хотя бы одним из следующих признаков: развитые коммуникативные способности; умение решать сложные плохо формализуемые задачи; способность к самообучению; адаптивность [66]. Ядром адаптивной информационной системы является постоянно развиваемая модель проблемной области. Таким образом, проектирование и адаптация АСУ сводится, прежде всего, к построению модели проблемной области и ее своевременной корректировке. В настоящее время отсутствует четкая единая классификация интеллектуальных систем, так как не существует общепринятого определения.

Актуальность исследований в области интеллектуальных АСУ состоит в том, что в условиях возрастания требований к характеристикам информационного обмена в АСУ резко возрастают требования к качеству функционирования систем передачи информации [52, 84, 128]. Для обобщенной интеллектуальной системы обычно используют структуру, которая взаимодействует с внешней средой и в процессе получения от нее необходимой информации формирует цель действия и анализирует воздействия на систему (физические и информационные). Определяющими элементами системы управления в этом случае являются

интеллектуальный преобразователь и базовая система управления [80].

В случае использования в системе управления искусственного интеллекта в качестве интеллектуального преобразователя реализуются [80] экспертные системы, ситуационное управление, управление структурной динамикой сложных технологических [67] и других интеллектуальных систем и их элементов. Математическая модель интеллектуальной системы управления состоит из трех частей: интеллектуального преобразователя, объекта управления и управляющего устройства системы (вычислительных и преобразующих и исполнительных устройств). Интеллектуальный преобразователь изменяет информацию о внешней среде и объекте управления и трансформирует в сигналы воздействия на управляющие устройства системы [80]. Для формирования воздействий на систему управления объектом в этом преобразователе используется блок принятия решения.

Важнейшим качеством элементов и среды в целом является способность к адаптивным изменениям своего состояния. В достижении адаптивного состояния необходимо иметь в виду, что в случае движения системы под прямым воздействием движущих внешних сил (сигнального воздействия) направление адаптивного движения системы predetermined, а при движении системы под опосредованным влиянием внешних сил требуется периодическое прерывание адаптивного движения для определения направления корректирующего действия.

С целью решения задачи построения управляющей функции в динамическую модель процесса шарошечного бурения вводится АВПМ [114, 116], работающий в качестве датчика и исполнительного механизма. АВПМ предназначен для: своевременного реагирования на кратковременные случайные возмущения в виде ударных нагрузок в процессе бурения, приводящих при отсутствии контроля к неэффективным затратам энергии на управление; корректировки, сглаживания ударных нагрузок и получения быстрого обратного сигнала о времени и величине удара [143, 144]. Данный элемент должен содержаться в аппаратном комплексе системы управления в виде датчика – АВПМ для осуществления на базе бурового агрегата интеллектуального

автоматизированного управления и повышения эффективности процесса бурения.

Управление режимными параметрами процесса бурения характеризуется большим количеством входных и выходных величин. Взаимосвязь параметров процесса шарошечного бурения можно представить в виде схемы (рисунок 2.3). 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_b , осевого усилия $P_{ос}$, частоты вращения $n_{вр}$ в текущий момент и изменением скорости бурения Δv_b за дискретный период времени. Выходными сигналами адаптивного элемента и датчиков и входными

сигналами компьютера и блока контроллеров являются ток I , скорость бурения $v_б$, частота вращения $n_{вр}$, изменение тока ΔI и скорости бурения $\Delta v_б$ 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 $\Delta P_{ос}$, частоты вращения $\Delta n_{вр}$, информация о прочностных и структурных свойствах породного массива, выраженная в расчетных значениях показателя буримости $\Pi_б$ и его изменении $\Delta \Pi_б$ 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 $P_{ос} + \Delta P_{ос}$ и частоты вращения $n_{вр} + \Delta n_{вр}$, в результате чего соответственно меняются значения выходных параметров.

Входные параметры (рисунок 2.3), характеризующие технические возможности бурового агрегата и условия бурения, разделяются на:

- управляющие, которые являются оперативно регулируемыми (осевое усилие $P_{ос}$, 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 управлений 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.

В группу неконтролируемых случайных параметров следует отнести ряд воздействий на процесс бурения, включая шумы в каналах управлений и контроля, носящих случайный характер и неподдающихся, как правило, точным количественным измерениям.

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 $\Pi_{см}$, энергоемкость процесса шарошечного бурения $E_б$, мощность, передаваемая для разрушения породы N , затраты на бурение одного погонного метра скважины S .

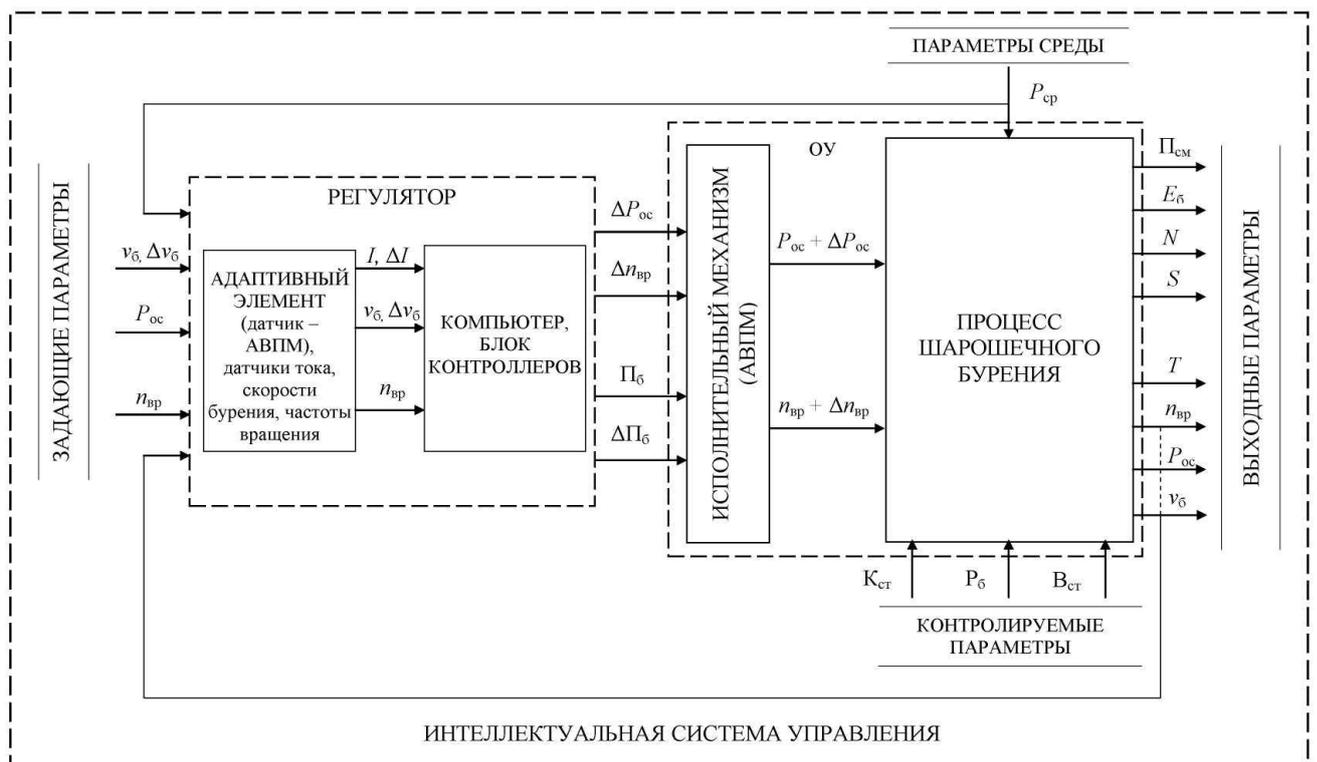


Рисунок 2.3 – Связь входных и выходных параметров процесса шарошечного бурения

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

бурового органа.

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

$$Z_i = \varphi_i(U_i, P_{cp}, P_{\delta}, N, K_{ct}, v_{\delta}, B_{ct}), \quad (2.5)$$

$$U_i = \varphi_i(P_{cp}, P_{\delta}, N, K_{ct}, v_{\delta}, B_{ct}). \quad (2.6)$$

Функционалы вида (2.5) позволяют получить общее решение. Функционалы вида (2.6) выражают закономерность управления процессом шарошечного бурения. Если входные параметры U_i соответствуют экстремальным значениям критерия оптимизации Z_i , для каждого комплекса параметров, то уравнение (2.6) описывает оптимальное управление процессом бурения.

Результаты анализа и выбора параметров управления процессом шарошечного бурения приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Параметры управления процессом шарошечного бурения

ВХОДНЫЕ			Неконтролируемые
Управляемые	Контролируемые		
$P_{oc}, n_{вр}$	регулятором	машинистом	P_{cp}
	$I, \Delta I, v_{\delta}, \Delta v_{\delta}$	$K_{ct}, P_{\delta}, B_{ct}$	
ВЫХОДНЫЕ			
Наблюдаемые	Ненаблюдаемые оперативно вычисляемые		
$T, n_{вр}, P_{oc}, v_{\delta}$	P_{cm}, E_{δ}, N, S		

Об эффективности процесса шарошечного бурения можно судить по выходным наблюдаемым параметрам, а объективную оценку технико-экономических показателей дают выходные ненаблюдаемые оперативно вычисляемые параметры. Обработка входной информации в интеллектуальной системе управления бурением осуществляется на основе расчета характеристик породы, текущих и оптимальных значений режимных параметров с помощью математической модели процесса шарошечного бурения.

2.3 Математическая формализация процесса шарошечного бурения

В настоящее время существует большое количество методик для определения скорости шарошечного бурения [39, 60, 126, 146]. При этом известные методики не достаточно формализовано показывают нелинейную зависимость скорости бурения от осевого усилия и частоты вращения бурового става. Экспериментальные и опытные данные наглядно показывают, что скорость бурения возрастает до некоторых пор почти линейно, но постепенно она перестает увеличиваться [18]. Это объясняется тем, что шарошечное долото в принципе своей работы имеет механизм циклического воздействия отдельных зубцов на забой скважины. Породный массив характеризуется рядом физико-механических свойств, которые, с точки зрения механики разрушения, можно объединить в две группы: структурные и прочностные. Породный массив в конкретной точке имеет определенный набор свойств, которые определяют некоторое количество механической работы, которую необходимо совершить буровому агрегату, посредством очередного зубца шарошки, чтобы разрушить некоторый объем этой породы [137]. В настоящее время отсутствуют методики построения, анализа и оценки модели процесса шарошечного бурения по выработке ресурса долот с учетом адаптивного элемента в условиях недостаточного количества информации об изменении физико-механических свойств пород, что является важной научной проблемой, имеющей большое значение для горнодобывающей, нефтегазовой и строительной промышленности.

Разработка методики расчёта, исследование особенностей и установление взаимосвязей параметров модели процесса шарошечного бурения с учетом адаптивного элемента позволяют существенно сократить время определения статических и динамических характеристик объекта, комплексно оценить область их применения и будущие состояния исследуемого технологического процесса, увеличить точность определения и поддержания оптимальных значений режимных параметров в условиях случайного изменения свойств буримой породы [144]. Таким образом, решение указанных задач будет

способствовать повышению эффективности процесса бурения. Для формализации процесса шарошечного бурения разработана математическая модель, учитывающая его особенности. Бурение породного массива с чередующимися слоями, имеющими разные показатели буримости (рисунок 2.4), 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 [95], в 80% случаев шарошечное долото отказывает в работе по причине разрушения подшипниковых узлов. В процессе работы буровое долото сталкивается с пластами породы, имеющими разные мощность и физико-механические свойства, характеризующиеся крепостью и структурой.

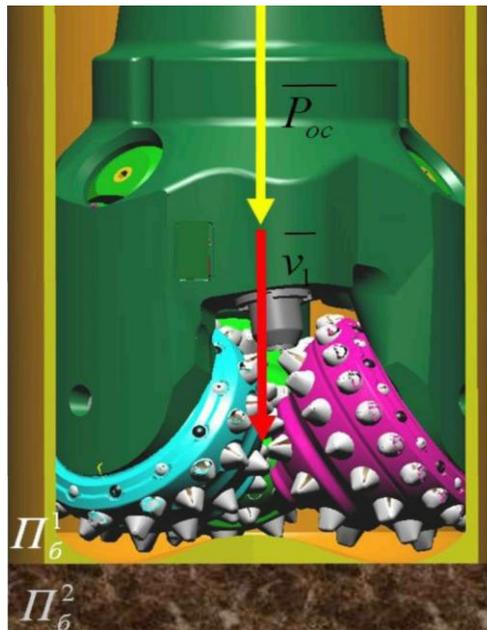


Рисунок 2.4 – Схема процесса шарошечного бурения при $\Pi_6^2 > \Pi_6^1$

Крепость породы находится в прямой зависимости от предела ее прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$ [97]:

$$f = \frac{\sigma_{сж}}{100},$$

где f – коэффициент крепости по шкале М.М. Протодьяконова; $\sigma_{сж}$ – предел прочности породы при одноосном сжатии, МПа.

Ресурс шарошечных долот в среднем на 90% зависит от количества циклов до разрушения подшипников качения [110]. При анализе актов наработки на отказ за 2012-2013 гг. шарошечных долот типа МПГВ, ТЗПГВ, ОКПВ, SA-SM635 диаметрами 215,9 производителей «ГОРМАШ», «УРАЛБУРМАШ», JUNJIN (Южная Корея) в условиях Восточно-Бейского разреза компании СУЭК в качестве характера поломки почти в 100 % случаев отмечен износ подшипников. При анализе наработки на отказ шарошечных долот типа ТКЗ и ТЗ диаметрами 215,9 и 244,5 мм производителей «ГОРМАШ», «УРАЛБУРМАШ», «ATLAS COPCO» и «GLUBUR» за 2014-2015 гг. в условиях Мазульского известнякового рудника компании «РУСАЛ» в качестве характера поломки почти в 100 % случаев отмечен износ подшипников. При анализе наработки на отказ за 2006-2010 гг. шарошечных долот типа ТКЗ диаметрами 215,9 и 244,5 мм производителей «ГОРМАШ», «УРАЛБУРМАШ», «ATLAS COPCO» в условиях ЗАО «Полюс» в качестве характера поломки долота более чем в 95 % случаев отмечен износ подшипников. Отсюда следует сделать вывод, что ресурс шарошечных долот T в математической модели процесса шарошечного бурения нужно рассчитывать исходя из ресурса подшипников качения.

Подшипники качения шарошек испытывают сложную циклическую нагрузку:

- циклическую нагрузку на тело качения подшипника при качении шарошки по забою;
- циклическую нагрузку при перекатывании шарошки с зубца на зубец;
- циклическую нагрузку, характеризующуюся изменением физико-механических свойств породы.

Циклическая нагрузка на тело качения подшипника при качении шарошки по забою описывается уравнениями расчетного ресурса подшипника [5]:

$$L = 10^6 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \left(\frac{C}{P} \right)^k, \quad (2.7)$$

где L – расчетный ресурс подшипника, об.; a_1 – коэффициент, корректирующий ресурс в зависимости от надежности; a_2 – коэффициент, корректирующий ресурс

в зависимости от особых свойств подшипника; a_3 – коэффициент, корректирующий ресурс в зависимости от условий работы подшипника; C – грузоподъемность подшипника, Н; P – нагрузка, Н; k – показатель степени, равный в соответствии с результатами экспериментов $k = 3$ для шариковых и $k = 10/3$ для роликовых подшипников.

Для подшипника шарошки расчетный ресурс следует измерять числом циклов нагружения. В связи с особенностями конструкции опор качения шарошки типа «ролик–шарик–ролик» (Р–Ш–Р) роликовые подшипники несут основную нагрузку, а шариковый подшипник служит замковым механизмом. Поэтому при учете осевых нагрузок особое внимание следует уделять расчету ресурса роликовых подшипников.

Указанное уравнение учитывает только циклическую нагрузку на тела качения подшипника за счет изменения геометрического положения тел качения. Ресурс опоры качения (2.7) не учитывает ударные нагрузки, возникающие при перекачивании зубцов шарошки по забою, и нагрузки, возникающие при переходе на породы с более высоким показателем буримости. Периодически возникающая ударная нагрузка требует оценки усталостной прочности. Количественной характеристикой усталостной прочности деталей машин является коэффициент запаса усталостной прочности n_r [20]. Эта величина также характеризует уменьшение количества циклов опоры качения в зависимости от дополнительной циклической нагрузки. Отсюда ресурс подшипника с учетом дополнительной циклической нагрузки [110]:

$$L = 10^6 \cdot \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{max}} \right)^{10/3} \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \cdot \sigma_m}, \quad (2.9)$$

где L – количество циклов нагружения до разрушения подшипника; σ_B – предел прочности материала ролика подшипника, МПа; σ_{-1} – предел прочности материала ролика подшипника, МПа; σ_{-1} – предел выносливости материала ролика подшипника, МПа; σ_a – амплитуда переменных напряжений цикла,

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}, \text{ МПа}; \quad \sigma_m - \text{ среднее напряжение цикла}, \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2},$$

МПа; σ_{max} , σ_{min} – максимальное и минимальное напряжения, возникающие при ударах вследствие увеличения крепости породы и перекатывания зубцов шарошки, МПа.

Циклическая нагрузка при перекатывании шарошки с зубца на зубец характеризуется ударными нагрузками, возникающими при ударе очередного зубца о поверхность забоя. Данный процесс характеризуется изменениями кинетической энергии и переходом последней в энергию механического удара. Изменения кинетической энергии бурового органа характеризуется изменением скорости. Средняя скорость движения бурового долота равна скорости бурения. Но при перекатывании шарошки о поверхность забоя поочередно ударяются зубцы А, Б и В и шарошка вращается согласно направлению стрелки (рисунок 2.5).

При перекатывании с зубца А на зубец Б в первый полупериод высота h_1 растёт от 0 до $x/2$, а высота h_2 убывает от x до $x/2$. В данный полупериод долото и буровой став относительно поверхности забоя перемещаются вверх и нагрузка на все узлы является пиковой. Во второй полупериод высота h_1 растёт от $x/2$ до x , а высота h_2 убывает от $x/2$ до 0. В данный полупериод нагрузка снижается и мощность подающего привода преобразуется в кинетическую энергию. В конце второго полупериода кинетическая энергия преобразуется в энергию удара и нагрузка также является пиковой. В первый полупериод пиковая нагрузка передается плавно в течение всего полупериода. В конце второго полупериода кинетическая энергия преобразуется в энергию удара и время передачи энергии равняется времени внедрения зубца в поверхность забоя. Отсюда нагрузка, возникающая в конце второго полупериода, является максимальной за весь период перекатывания с одного зубца на другой.

Ударное напряжение, возникающее при перекатывании зубцов шарошки по забою, характеризуется уровнем энергии, которая обеспечивает поочередное опускание зубцов шарошки на забой.

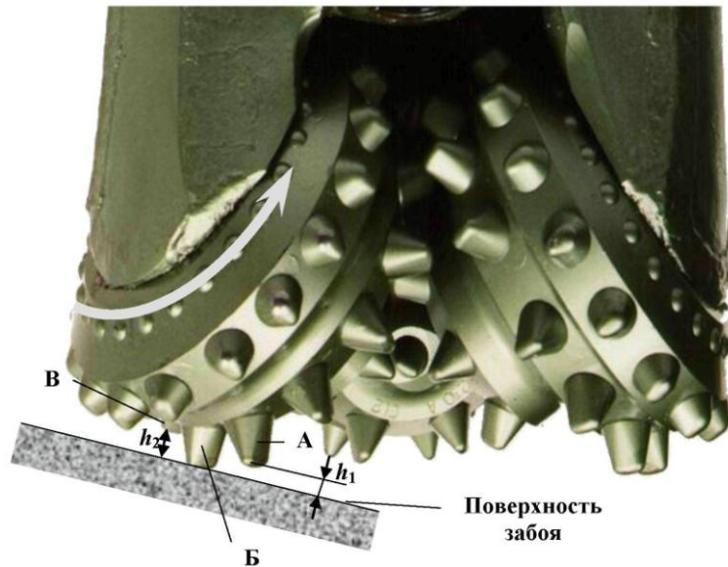


Рисунок 2.5 - Схема перекатывания шарошки по забою

Ударное напряжение, возникающее при увеличении крепости породы, характеризуется уровнем энергии, которая обеспечивает продвижение бурового долота через породу. А также ударная нагрузка характеризуется изменением физико-механических свойств породы.

Уровень энергии, которая обеспечивает продвижение бурового долота через породу, характеризуется мощностью, передаваемой от привода подачи к рабочему органу и долоту. Уровень энергии, с которой зубцы шарошки опускаются на забой, характеризуется мощностью N , передаваемой от привода подачи и привода вращения к долоту. В случае с перекатыванием зубцов шарошки v_1 – скорость отдельного зубца шарошки при $h_2 = x/2$, а $v_2 = 0$.

При оценке максимального напряжения, возникающего при опускании зубцов шарошки на забой, необходимо определить максимальную линейную скорость зубца, развиваемую при вращении шарошки. Данная скорость зависит от скорости вращения бурового долота, от соотношения его диаметра и диаметра окружности шарошки, на которой располагается i -й зубец. Сущность процесса движения шарошки в момент перекатывания заключается во вращении шарошки вокруг мгновенного центра вращения O (рисунок 2.6).

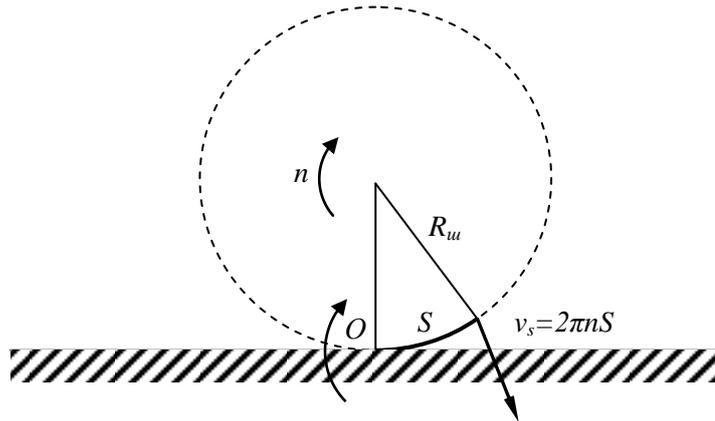


Рисунок 2.6 – Схема определения скорости опускания зубца шарошки на забой
 (точка O – мгновенный центр вращения; n – частота вращения шарошки, об/с;
 v_s – скорость опускания зубца шарошки на забой, м/с; S – расстояние между зубцами, м;
 R_m – средний радиус шарошки до конца зубцов, м)

Точкой O является крайняя точка зубца, на который опирается в данный момент шарошка и вокруг которой осуществляется вращение. Скорость вращения вокруг точки O , согласно теоретической механике, равна скорости вращения шарошки относительно центра шарошки n .

Конечная скорость зубца в момент удара о поверхность забоя равна нулю. Максимальное изменение скорости перемещения подшипника шарошки, вызванное перекачиванием с зубца на зубец равно половине окружной скорости зубца v_s . Поэтому величина $\Delta v = v_s / 2$. Тогда напряжение в роликах опор качения с учетом ударных нагрузок, возникающих при перекачивании зубцов шарошки по забюю, определяется согласно формуле (2.10):

$$\sigma_{\text{п.уд}}^{\text{max}} = 600 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_r}{z \cdot D_p \cdot L_p}} \cdot \frac{v_{\text{б}} + 0,5v_s}{v_{\text{б}} + 0,25v_s} \quad (2.10)$$

Циклическая нагрузка, характеризующаяся изменением физико-механических свойств породы, имеет схожий механизм. Возникающее при этом напряжение связано с переходом кинетической энергии бурового долота в энергию удара при увеличении показателя буримости породы. Различие заключается в источнике и механизме образования ударов.

Напряжение в опорах качения, возникающее при изменении свойств породы, для роликовых тел качения выражается через показатель буримости. При наложении двух или нескольких циклических процессов периодически возникают моменты, когда максимальные нагрузки складываются. Поэтому оценивать циклическую прочность следует именно по максимальным суммарным циклическим нагрузкам. 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 (2.11) [110]:

$$\sigma_{p.уд}^{\Sigma} = 600 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_r}{z \cdot D_p \cdot L_p} \cdot \frac{v_{\delta} + 0,5v_s}{v_{\delta} + 0,25v_s} \cdot \frac{\Pi_{\delta}^1 + \Delta\Pi_{\delta}}{\Pi_{\delta}^1 + 0,5\Delta\Pi_{\delta}}} \cdot k_{инд}; \quad (2.11)$$

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_{δ} – скорость бурения при имеющихся свойствах породы, осевом усилии и скорости вращения бурового долота, м/с; v_s – скорость опускания зубца на забой, м/с; Π_{δ} – показатель буримости; $k_{инд}$ – коэффициент формы индентора ($k_{инд} = 0,79$ для индентора, имеющего форму закругленного цилиндра; $k_{инд} = 0,47$ для индентора, имеющего форму правильного конуса; $k_{инд} = 0,7$ для индентора, имеющего форму выпуклого конуса).

С учетом выражения (2.9) расчетный ресурс шарошечных долот T предлагается определять согласно формуле (2.12) [92]:

$$T = \frac{L_{\Sigma}}{2 \cdot n_{вр} \cdot 1,7} \cdot v_{\delta}, \text{ М}, \quad (2.12)$$

где $n_{вр}$ – частота вращения долота, об/с; v_{δ} – 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 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.

Представленные выражения для расчета напряжений позволяют определить число циклов до разрушения элементов при различных условиях нагружения:

1. Процесс бурения однородной породы с приблизительно одинаковыми свойствами или изменением показателя буримости в пределах $\Delta\Pi_6 < 1$. Технологический процесс сопровождается только циклической нагрузкой с максимальными напряжениями в элементах технической конструкции с учетом коэффициента формы инденторов $k_{инд}$.

2. Процесс бурения слоистой породы характеризуется значительными ударными нагрузками. Для определения количества циклов нагружения при переходе границы между слоями породы с разными физико-механическими свойствами необходимо учитывать количество слоев породы на один погонный метр. Значение этого показателя варьируется от 0 до 20 и более.

3. Процесс бурения трещиноватой породы характеризуется значительными ударными нагрузками. Количество трещин на один погонный метр скважины приблизительно находится в пределах от 0 до 20. Однако в выражении (2.12) для определения ресурса долота при бурении слоистых и трещиноватых пород должно учитываться абсолютное значение количества трещин или слоев. В данных условиях нагружения элементы конструкции испытывают суммарную циклическую нагрузку.

Максимальные напряжения для второго и третьего условий нагружения находятся из выражения (2.11). Условно можно принять, что в данный момент показатель буримости снижается до нуля и возрастает до прежнего значения, в то время как прохождение границы между слоями сопровождается изменением показателя буримости $\Delta\Pi_6 < \Pi_6$.

Для расчета ресурса шарошечного долота, характеризующегося всеми указанными условиями нагружения, доли от общего количества циклов нагружения тел качения шарошек, приходящиеся на бурение однородной, слоистой и трещиноватой породы соответственно, предлагается определять по формулам (2.13):

$$\eta_{\text{од}} = 1 - \eta_{\text{сл}} - \eta_{\text{тр}}; \quad \eta_{\text{сл}} = \frac{n_{\text{сл}} \cdot n_{\text{об}}^{\text{сл}}}{n_{\text{вр}} \cdot \frac{D_1}{D_{\text{ш}}^{\text{max}}}} \cdot v_{\text{б}}; \quad \eta_{\text{тр}} = \frac{n_{\text{тр}} \cdot n_{\text{об}}^{\text{тр}}}{n_{\text{вр}} \cdot \frac{D_1}{D_{\text{ш}}^{\text{max}}}} \cdot v_{\text{б}}, \quad (2.13)$$

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

Число оборотов долота, необходимое для проходки границы между слоями или трещины в породном массиве, предлагается определять по следующим формулам:

$$n_{\text{об}}^{\text{сл}} = \delta_{\text{сл}} \cdot \frac{n_{\text{вр}}}{v_{\text{б}}}; \quad n_{\text{об}}^{\text{тр}} = \delta_{\text{тр}} \cdot \frac{n_{\text{вр}}}{v_{\text{б}}}, \quad (2.14)$$

где $\delta_{\text{сл}}$ – толщина пограничного слоя или его размер, м; $\delta_{\text{тр}}$ – толщина трещины или ее размер, м.

Принимая во внимание выражение (2.7), соответствующие значения количества циклов до разрушения предлагается определять по следующим формулам (2.15), (2.16) и (2.17):

$$L_{\text{од}} = 10^6 \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{в}}}{\sigma_{\text{р.уд}}^{\text{max}}} \right)^{10/3} \cdot \frac{2\sigma_{-1}}{\sigma_{\text{р.уд}}^{\text{max}} - \sigma_{\text{р}}^{\text{max}} + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\text{в}}} \cdot (\sigma_{\text{р.уд}}^{\text{max}} + \sigma_{\text{р}}^{\text{max}})}, \quad (2.15)$$

$$L_{\text{сл}} = 10^6 \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{в}}}{\sigma_{\text{р.уд}}^{\Sigma}} \right)^{10/3} \cdot \frac{2\sigma_{-1}}{\sigma_{\text{р.уд}}^{\Sigma} - \sigma_{\text{р}}^{\text{max}} + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\text{в}}} \cdot (\sigma_{\text{р.уд}}^{\Sigma} + \sigma_{\text{р}}^{\text{max}})}, \quad (2.16)$$

где $\sigma_{p.уд}^{max}$ – 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 $\sigma_{min} = 0$:

$$L_{тр} = 10^6 \cdot \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{p.уд}^\Sigma} \right)^{10/3} \cdot \frac{2\sigma_{-1}}{\sigma_{p.уд}^\Sigma + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \cdot \sigma_{p.уд}^\Sigma}. \quad (2.17)$$

С помощью разработанной математической модели процесса шарошечного бурения построены зависимости ресурса шарошечного долота T от показателя буримости Π_b , представленные на рисунке 2.7. Здесь построены кривые для пород, значительно отличающихся по трещиноватости и слоистости.

Разработанная методика определения ресурса шарошечных долот требует учета осевого усилия P_{oc} , частоты вращения $n_{вр}$, механических свойств стали тел качения в опорах шарошек, а также размера трещины и пограничных слоев вдоль оси бурового става. Для примера на рисунке 2.7 получены зависимости при осевом усилии $P_{oc}=200$ кН, частоте вращения $n_{вр}=1,5$ об/с, размере трещины и пограничных слоев вдоль оси бурового става 10 мм.

Методика является достаточно простой в использовании и предназначена для определения прогнозного ресурса шарошечных долот разных типов и размеров при их работе в условиях бурения пород, характеризующихся различной степенью слоистости и трещиноватости. При этом многопараметрический расчет целесообразно производить при помощи специального программного обеспечения, показывающего остаточный прогнозный ресурс шарошечного долота при том или ином режиме работы бурового агрегата. При этом машинист должен иметь возможность отслеживать соотношение значений осевого усилия, частоты вращения, скорости бурения и остаточного прогнозного ресурса.

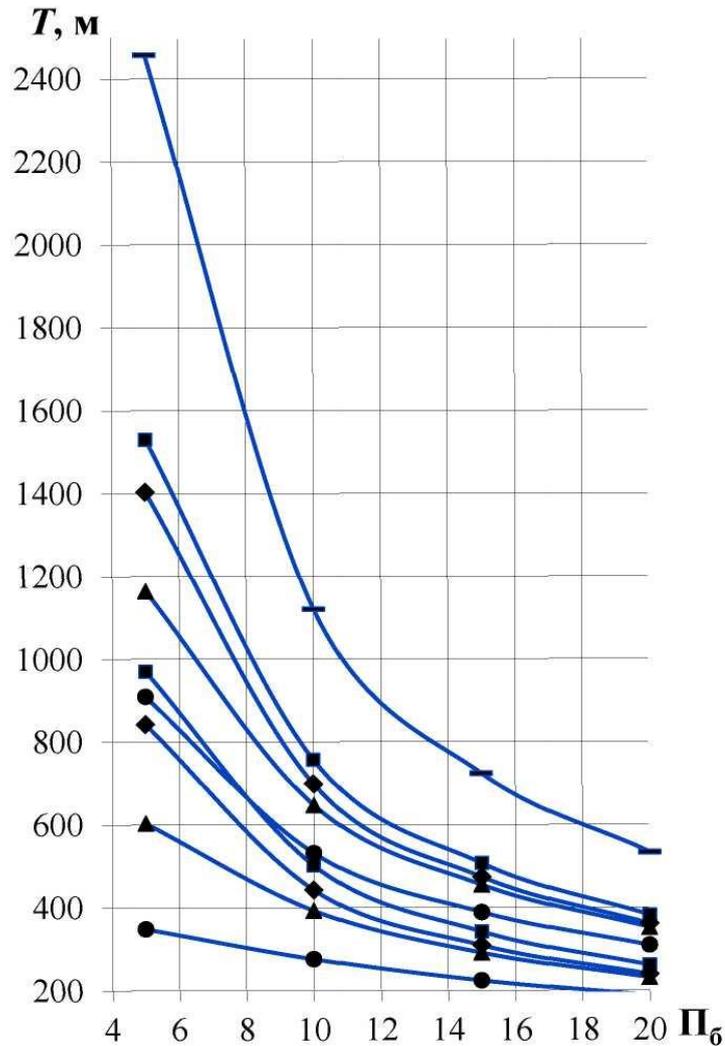


Рисунок 2.7 – Ресурс долот T в зависимости от показателя буримости Π_b .

— — зависимость для однородных пород. Зависимости для слоисто-трещиноватых пород обозначены маркерами, характеризующими параметры слоистости: ■ – при $n_{сл} = 10 \text{ м}^{-1}$, $\Delta\Pi_b = 2$; ▲ – при $n_{сл} = 20 \text{ м}^{-1}$, $\Delta\Pi_b = 2$; ◆ – при $n_{сл} = 10 \text{ м}^{-1}$, $\Delta\Pi_b = 4$; ● – при $n_{сл} = 20 \text{ м}^{-1}$, $\Delta\Pi_b = 4$.

При каждой характеристике слоистости сверху вниз $n_{тр} = 10 \text{ м}^{-1}$; 20 м^{-1}

Основываясь на сведениях по эксплуатации шарошечных долот в 2014 г. в условиях карьеров Олимпиадинского горно-обогатительного комбината (ГОК) ЗАО «Полюс» [26] были исследованы зависимости проходки шарошечных долот от крепости горных пород (по шкале проф. М.М. Протоद्याконова) (рисунок 2.8).

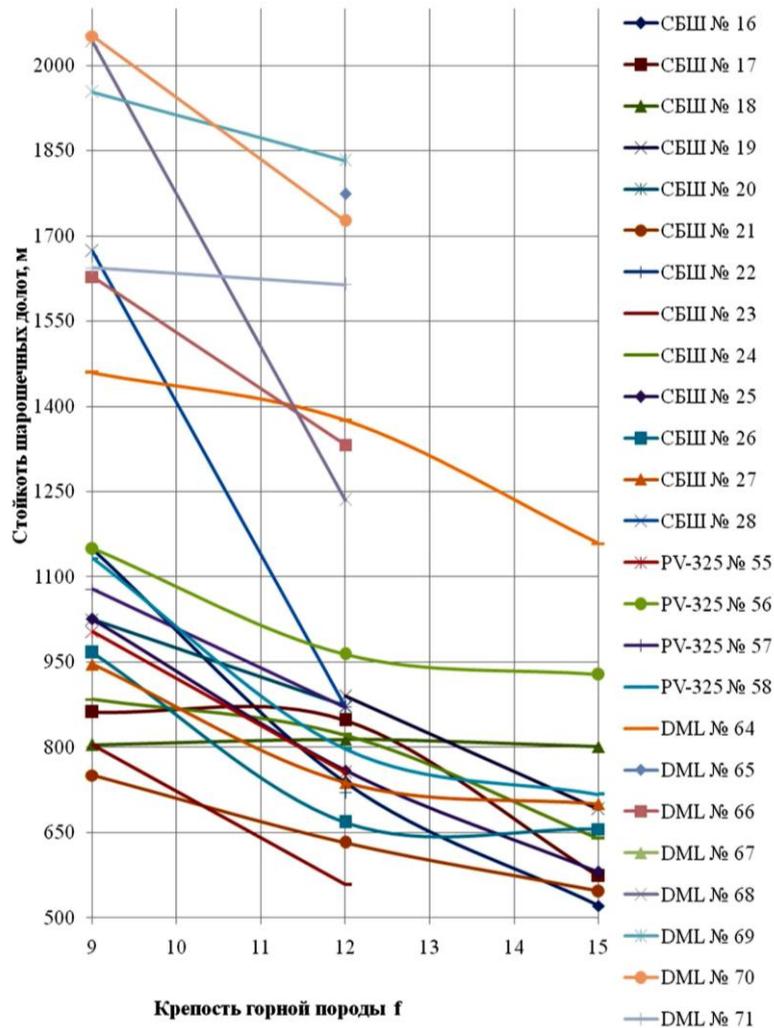


Рисунок 2.8 - Зависимости ресурса (стойкости) шарошечных долот при бурении взрывных скважин на карьере «Восточный» от крепости пород по шкале проф. М.М. Протодяконова

Для расчета ресурса долот при помощи разработанной методики необходимо определить прочностные и структурные характеристики буримого породного массива. В карьере «Восточный» Олимпиадинского ГОК по результатам разведочных работ на месторождении выделено два природных и технологических типа руд: первичные золото-сульфидные (более 60%) и окисленные (таблица 2.2). Среди породообразующих минералов наиболее распространены кварц (30-80%), слюды (10-30%) и глинистые минералы (5-40%). Последние представлены гидромусковитом, гидробиотитом, гидрохлоритом, каолинитом и метагаллуазитом.

Таблица 2.2 - Классификация горных пород карьера «Восточный» по крепости и по степени трещиноватости

Петрографическая характеристика пород	Коэффициент крепости пород f по шкале М.М. Протодяконова	Категория трещиноватости
Связные и дисперсные образования		
Окисленная руда (алеврито-глинистые образования)	1-2	1
Алеврито-глинистые образования коры выветривания по метасоматически измененным породам	1-2	1
Делювиальные отложения (растительный грунт с корнями деревьев, дресва, щебень пород с примесью суглинка)	1-2	1
Аллювиальные отложения (гравий, галька с песком)	1-2	1
Мерзлые окисленные руды и алеврито-глинистые образования коры выветривания по метасоматически измененным породам	6	5
Скальные породы		
Неокисленные первичные руды (метасоматиты кварц-карбонатно-слюдистые сульфидизированные)	10-15	3-4
Частично окисленные первичные руды (метасоматиты кварц-карбонатно-слюдистые сульфидизированные)	6-9	2-4
Слюдисто-кварцевые сланцы нижней литологической пачки	6-7	2-3
Породы углеродсодержащей пачки (углеродистые кварц-мусковитовые сланцы)	6-7	1-3
Породы слюдисто-кварц-карбонатной пачки	8-9	3-4

Ввиду того, что среди породообразующих минералов наиболее распространены кварц (30-80%), слюды (10-30%) и глинистые минералы (5-40%), то для расчетов принимаем диапазон категорий крепости $f = 9-15$ по шкале Протодяконова и категорию трещиноватости 2-3. Режимные параметры: осевое усилие $P_{oc} = 160$ кН, частота вращения бурового става $n_{вр} = 1,5$ об/с.

С использованием экспериментальных значений ресурса долот T , полученных в условиях карьеров Олимпиадинского ГОК ЗАО «Полюс», построена кривая по средним значениям ресурса долот T (рисунок 2.9, кривая 1). Кривая 2 (рисунок 2.9) получена с использованием разработанной математической модели

с учетом аналогичных свойств породного массива и значений режимных параметров.

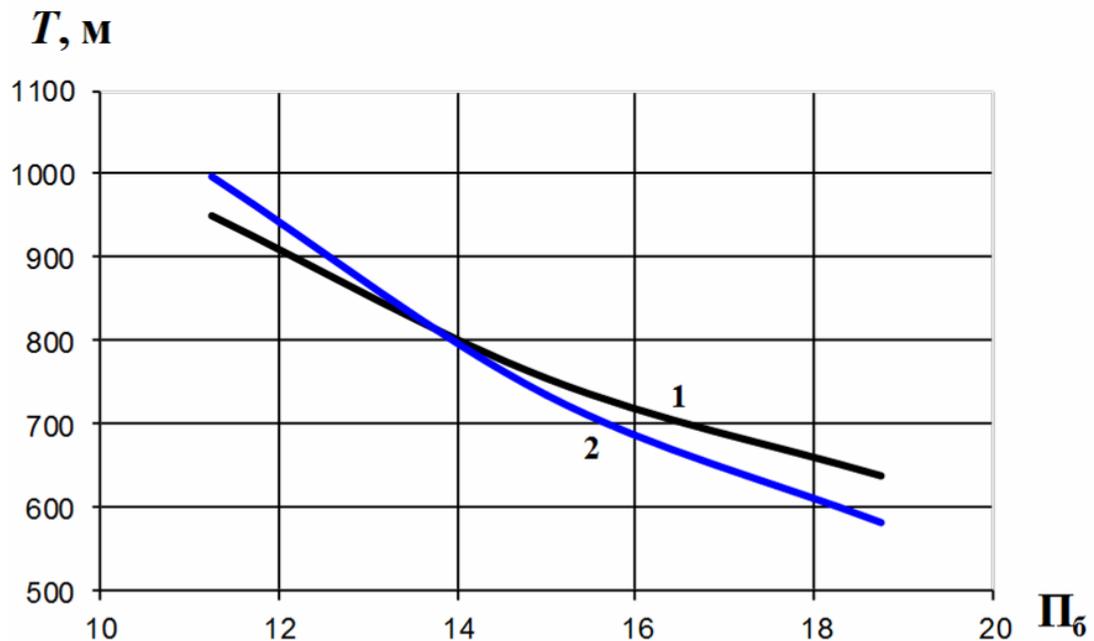


Рисунок 2.9 – Проверка адекватности математической модели

Кривые по ресурсу долот использованы для оценки адекватности математической модели процесса шарошечного бурения. Расчет сходимости результатов представлен в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Проверка математической модели процесса бурения на адекватность по сходимости экспериментальных и расчетных значений ресурса шарошечных долот

№ п/п	Средний показатель буримости $Пб$	Среднее количество трещин на 1 м скважины	Измеренный средний ресурс долота $T, м$	Расчетное значение ресурса долота $T, м$	Сходимость результатов, %
1	12	1-10	910	940	3,3
2	14	1-10	800	800	0
3	16	1-10	720	685	4,9
4	18	1-10	660	610	7,6

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.

Выводы

Для управления процессом шарошечного бурения предложено использовать адаптивный элемент в виде АВПМ, изменяющего характеристики системы управления и сглаживающего кратковременные случайные возмущения в форме ударных нагрузок, вызванных непрогнозируемым изменением свойств породного массива.

Установлена взаимосвязь параметров модели процесса шарошечного бурения. В структуру данной модели предложено ввести регулятор, представляющий собой интеллектуальную систему с адаптивным элементом. С помощью данного регулятора система управления в режиме реального времени получает входные управляющие воздействия в виде скорректированных значений осевого усилия и частоты вращения, в результате чего соответственно меняются значения выходных параметров.

Разработанная математическая модель процесса шарошечного бурения раскрывает взаимосвязи его параметров с производительностью процесса бурения и ресурсом долота, позволяет проанализировать и оценить их соотношение. Предложенная модель учитывает доли от общего количества циклов нагружения тел качения шарошек, приходящиеся на бурение однородной, слоистой и трещиноватой породы с различными показателями буримости.

С помощью предложенной математической модели определяются зависимости ресурса шарошечного долота от показателя буримости, структурных

изменений свойств породы и скорости бурения с целью оптимизации значений режимных параметров при помощи регулятора. В свою очередь, для осуществления поиска эффективных режимных параметров процесса бурения, значения ресурса долота и скорости бурения должны контролироваться в постоянном режиме с учетом изменяющихся свойств породы.

ГЛАВА 3. ФОРМИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ШАРОШЕЧНЫМ БУРЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ИЗМЕНЕНИИ СВОЙСТВ ПОРОДЫ

3.1 Структура интеллектуальной автоматизированной системы управления процессом шарошечного бурения с адаптивным элементом

Шарошечное бурение скважин является сложным многопараметрическим процессом, зависящим от технических характеристик долота, бурового агрегата, физико-механических свойств породы и режимных параметров. Управление этим процессом осложняется тем, что наблюдать за изменением характеристик породы не представляется возможным, поскольку не существует технических средств, точно и заблаговременно сообщающих значения прочностных и структурных свойств. Процессы взаимодействия долота с породой быстротечны, кратковременны и характеризуются временем прохождения ударной волны по долоту [71]. Средства автоматического регулирования, действующие апостериорно и опирающиеся на оптимальные значения режимных параметров, однозначно гарантируют отказ бурового долота при первых перегрузках. Существующие системы, во избежание частого отказа бурового долота, оперируют не критическими значениями режимных параметров, обеспечивающих значительно заниженную производительность.

Для функционирования автоматических систем необходимы рациональные или оптимальные значения регулируемых параметров. Принципиальное отличие разработанной интеллектуальной системы управления процессом шарошечного бурения заключается в отсутствии заранее установленных или известных реперных точек, обозначающих значения оптимальных режимных параметров или минимальной себестоимости бурения, справедливых при любых изменениях свойств породы. В отличие от принципов формирования автоматической системы, управление шарошечным бурением предполагает обработку текущих значений режимных параметров и свойств породы с получением значений

оптимальных режимных параметров и минимальной себестоимости бурения, соответствующих текущему набору свойств породы и параметров процесса. Операции по нахождению оптимальных значений режимных параметров выполняются постоянно с некоторым дискретным интервалом. Интеллектуальная система в постоянном режиме использует управляющие воздействия для изменения значений режимных параметров, в результате которого текущее значение себестоимости постоянно приближается к оптимальному.

Разработанная структурная схема интеллектуальной АСУ процесса бурения [115] представлена на рисунке 3.1. 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).

На систему управления и объект управления (ОУ), 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_b , 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_b , его изменении Δv_b и частоты вращения $n_{вр}$.

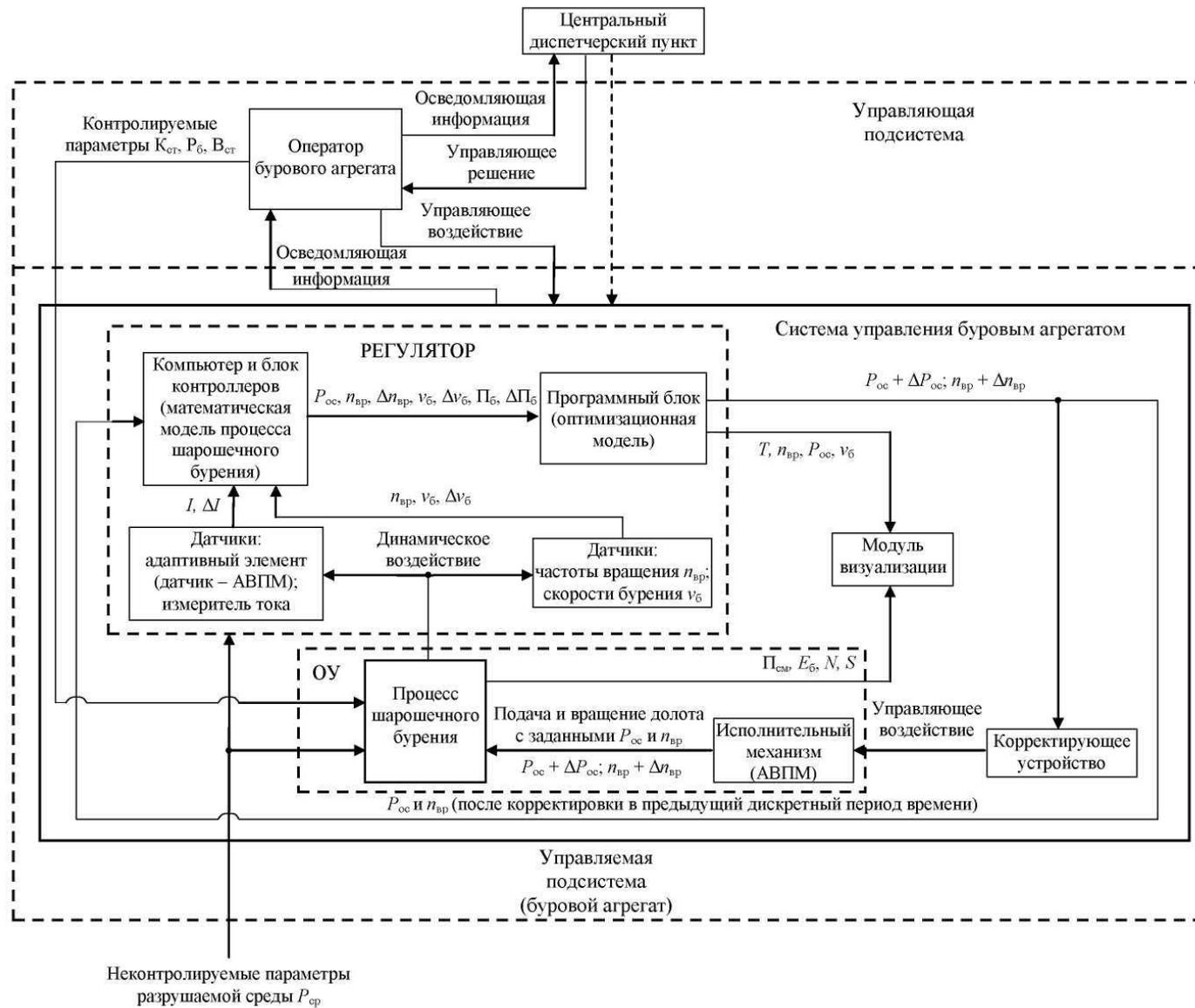


Рисунок 3.1 – Структурная схема интеллектуальной АСУ процессом шарошечного бурения

Измерителем тока работает трансформатор тока или амперметр. В качестве датчика скорости используется штатный электромеханический счетчик, расположенный в блоке канатно-полиспастного механизма. Датчиком частоты вращения служит тахометр, установленный на вращателе. Величина P_6 , характеризующая свойства породного массива, является функцией тока в статоре электродвигателя или муфты АВПМ бурового агрегата. Величина ΔP_6 характеризует изменение свойств, наличие структурных неоднородностей в породном массиве и является функцией, зависящей от изменения тока. Измеренная частота вращения, как кинематическая характеристика, в сочетании с показаниями датчиков тока и скорости бурения, позволяет получать численные значения осевого усилия P_{oc} , показателя буримости P_6 и ΔP_6 в процессе бурения. 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 значения производительности бурового агрегата в смену $P_{см}$, энергоемкости процесса шарошечного бурения E_6 , мощности, передаваемой для разрушения породы N , удельных затрат на бурение S .

По обратной связи осуществляется передача информации о текущих

значениях режимных параметров P_{oc} 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.

Регулирование значений основных режимных параметров в процессе бурения при помощи интеллектуальной автоматизированной системы осуществляется в следующем порядке.

1. Величина тока в обмотках линейных электродвигателей или адаптивной электромагнитной муфты в каждый промежуток времени фиксируются прибором и преобразуется в текущее значение показателя буримости породы, посредством прямой математической зависимости от величины тока через коэффициент подстройки. Величина изменения тока в обмотках в каждый промежуток времени фиксируется прибором и преобразуется в текущее значение изменения показателя буримости породы, посредством прямой математической зависимости от величины тока через коэффициент подстройки. Информация о показателе буримости в каждый момент времени записывается в виде кривой и отображается на дисплее в зависимости от текущих значений глубины и времени бурения конкретной скважины. При отключении подачи запись ставится на паузу, чтобы не нарушать объективность информации о литологической колонке скважины. С помощью средств радио- или спутниковой навигации фиксируется место положения бурового агрегата в процессе бурения и каждая скважина. При суммировании информации о литологических колонках с каждой скважины в автоматическом режиме отстраивается трехмерная модель породного массива, что позволяет анализировать информацию, содержащую конкретные значения показателя буримости, форму трещин, несплошностей и слоев с различными физико-механическими свойствами. Информация о структуре и свойствах породы в массиве используется для планирования взрыво-технических работ, расчета

взрывчатых веществ и определения дальнейшего распространения пластов породы.

2. Система автоматизации содержит контроллеры и компьютер для обработки информации, датчик для измерения скорости бурения в каждый момент времени, частоты вращения, датчика вибрации. В зависимости от текущего значения скорости бурения и показателя буримости рассчитывается текущее значение динамического осевого усилия, оптимального для текущих условий.

В зависимости от текущего значения показателя буримости, изменения показателя буримости за пройденное расстояние (за один и несколько оборотов долота), диаметра шарошечного долота по формуле рассчитывается значение оптимального осевого усилия. При отклонении текущего значения осевого усилия от оптимального оно корректируется при помощи преобразователя частоты или перекоммутацией путем синхронной регулировки механической характеристики на двух электродвигателях подачи.

3. Для корректировки значения частоты вращения электродвигателя вращателя, в компьютер изначально закладывается диапазон допустимой частоты вращения и обратная зависимость от значения осевого усилия также в допустимом диапазоне. Электродвигатель вращателя также регулируется преобразователем частоты. В случае фиксирования датчиками высокого уровня вибрации, значение осевого усилия уменьшается, а частоты вращения бурового долота одновременно плавно увеличивается до снижения уровня вибрации, соответствующей допустимому значению. После снижения вибрации характеристики двигателей плавно возвращаются к расчетным оптимальным значениям режимных параметров.

Ориентиром для настройки режимных параметров являются их оптимальные значения, актуальные для текущих характеристик породы, определяемых с помощью оптимизационной модели.

3.2 Оптимизационная модель управления параметрами процесса шарошечного бурения

Моделирование динамического процесса бурения осуществляется с целью оптимизации его параметров. Комплексное решение задач, связанных с созданием математической модели, системы сбора и обработки первичной информации и оптимизацией режима бурения, является крупной научной проблемой, имеющей большое значение для народного хозяйства. Сложность выбора критерия оптимизации или показателя эффективности (целевой функции) состоит в том, что на практике в задачах оптимизации и управления имеют дело со многими критериями, которые зачастую взаимно противоречивы. В частных задачах оптимизации, когда объект является частью технологического процесса, не всегда удается или не всегда целесообразно выделять прямой экономический показатель, который бы полностью характеризовал эффективность работы исследуемого объекта. В таких случаях критерием оптимальности может служить технологическая характеристика, косвенно оценивающая экономичность работы технического объекта [58]. Оптимизация процесса шарошечного бурения возможна только при наличии математической модели, в основе которой лежит единый универсальный критерий, содержащий условие оптимального протекания процесса разрушения породы зубьями шарошек, которое обеспечивает соотношение производительности и ресурса долота, соответствующее минимальной себестоимости.

В настоящее время существует сложная и недостаточно изученная проблема при решении задач оптимизации – необходимость достижения большого числа целей, которая приводит к возникновению многокритериальной ситуации при принятии решений. Кроме того, с ростом сложности и размерности модели возникают большие проблемы с устойчивостью оптимизационных задач. Для решения проблемы оптимизации необходимы предельно корректная формулировка задач оптимизации и разработка алгоритмов ее решения, которые

должны основываться на доступной для современного уровня развития информации.

Обычно во всех задачах расчета и оптимизации используются методы устойчивого приближенного решения некорректно поставленных задач, основанные на использовании дополнительной априорной информации об искомом решении. Применение данных методов обусловлено тем, что данные для расчета, получаемые с датчиков и контрольно-измерительных приборов, всегда имеют значительную погрешность [1]. К сбоям в режимах функционирования технического объекта могут привести даже незначительные колебания параметров. Для сведения к минимуму погрешности измерений в интеллектуальную систему управления необходимо введение адаптивного элемента, позволяющего ей учитывать характер изменения свойств горной породы, своевременно реагировать на их изменение. При достижении требований к выходным параметрам процесса проводится статистический анализ результатов реализации системы.

В математической постановке задачи оптимизации процесса шарошечного бурения используются смешанные критерии, представляющие собой функцию от первичных параметров (многоцелевая задача управления) [144]. Данная задача ставится с целью оптимального управления процессом при неустановившихся режимах эксплуатации.

Для применения количественных методов при решении задач оптимизации необходимо иметь математические модели критерия оптимизации и ограничений:

$$W = W(x, a, y),$$

где x – вектор внешних условий или переменных, на которые невозможно воздействовать; a – постоянные для данной задачи параметры; y – вектор управления или управляемые факторы, поиск значения которых является целью оптимизации.

Наиболее эффективными в условиях недостатка информации о свойствах буримой породы являются методы на основе априорной модели бурения и поисков экстремума оптимизации. На основании выбранного критерия

оптимальности составляется целевая функция, представляющая собой зависимость критерия оптимальности от параметров, влияющих на ее значение. Таким образом, математическая формулировка задач оптимизации исследуемого технологического процесса сводится к определению экстремума (максимума или минимума) функции (критерия оптимизации) одной или нескольких переменных при некоторых условиях, которые накладываются на ряд других величин, поэтому такая оптимизация будет условной.

Сложность процессов бурения и стохастическая природа внешних воздействий крайне усложняет работу по оптимизации. При бурении разведочных скважин на твердые полезные ископаемые оптимизация процесса бурения представляется наиболее сложной вследствие изменчивости условий ведения буровых работ, недостаточного количества информации о физико-механических свойствах пород. Сложность выбора критерия оптимизации режимных параметров бурения заключается в трудности его оперативного вычисления, что обусловлено недостаточным объемом необходимой информации, непрерывно поступающей с датчиков к оператору бурового агрегата с приборной панели.

Особенность задач оптимизации состоит в том, что переменные, входящие в критерий оптимизации и ограничения, часто имеют дискретный характер (например, число долот). Стремление оптимизировать процесс бурения привело к попыткам создания моделей этого процесса, базирующихся на теоретических расчетах и эмпирических закономерностях, характеризующих работоспособность долот и эффективность разрушения пород. В отечественной практике модели процесса бурения сформировались после установления В.С. Федоровым [99] зависимости механической скорости бурения $v_{\bar{6}}$ от осевого усилия P_{oc} и частоты вращения $n_{вр}$, получена эмпирическая зависимость:

$$v_{\bar{6}} = a \cdot n_{вр}^x \cdot P_{oc}^y, \quad (3.1)$$

где x , y , a – поправочные коэффициенты.

Указанное выражение, как и все известные математические модели процесса шарошечного бурения, отражают общую зависимость скорости бурения от частоты вращения и осевого усилия, не раскрывающие достаточно полно

вопросы изменения физико-механических свойств породы и критерии оптимизации.

В качестве параметров, которые необходимо оптимизировать, предлагается выбрать: скорость бурения, ресурс (проходку) – наблюдаемые в процессе бурения параметры; мощность механизмов подачи и вращения, энергетические затраты (энергоёмкость 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 бурения в условиях непрогнозируемого изменения свойств породы предлагается оптимизационная модель, использующая корректирующие величины осевого усилия $P_{ос}$ и частоты вращения $n_{вр}$. Задача оптимизации процесса бурения сводится к нахождению экстремума целевой функции:

$$R = f(u) = extr, \quad (3.2)$$

где R – многомерная функция.

Задача оптимизации процесса шарошечного бурения сводится к нахождению экстремума целевой функции. При условии, что входными управляющими параметрами для процесса шарошечного бурения являются скорректированные величины $P_{ос.к}$ и $n_{вр.к}$, то многомерная функция (3.2) будет выглядеть следующим образом:

$$R = f(P_{ос.к}, n_{вр.к}) = extr, \quad (3.3)$$

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

Здесь $\Delta P_{ос}$, $\Delta n_{вр}$ – корректирующие величины осевого усилия, частоты вращения. Эти величины получаются в регуляторе при помощи расчетных методик, оценивающих ресурс бурового долота и экономическую эффективность

процесса бурения и методики определения расчетного ресурса долот при комплексе нагрузок, зависящих от свойств породы и режимов бурения.

В процессе принятия решений по выбору оптимальных режимных параметров процесса бурения ставятся две цели:

– цель-ограничение $z_0 \leq z_i(t) \leq z_I, i = \overline{1, n}$ – 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, максимальной мощности 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 и оптимизации частоты вращения в сочетании с максимизацией ресурса.

С помощью интегрального критерия оптимальности можно за достаточно большой период времени, в течение которого осуществляется несколько полных циклов технологического процесса, проанализировать показатели и найти оптимальные условия исследуемого процесса. Экстремумы целевой функции в задаче оптимизации процесса шарошечного бурения позволяют определить наилучшие значения параметров исследуемого процесса в условиях неполной информации об изменении свойств породы.

Исполнительный орган бурового агрегата имеет определенную мощность, с которой нужно воздействовать на объем породы определенный промежуток времени, чтобы ее разрушить, совершив работу:

$$A_{\text{раз}} = N \cdot t_{\text{раз}}, \quad (3.4)$$

где N – мощность, передаваемая для разрушения породы; $t_{\text{раз}}$ – время,

необходимое для разрушения некоторого объема породы посредством одного зубца шарошки.

Мощность исполнительного органа бурового агрегата N , передаваемая посредством бурового долота для разрушения породы, определяется по формуле:

$$N = P_{oc} \cdot v_{\delta} \quad (3.5)$$

Шарошечные долота, как правило, эффективно работают при бурении твердых, но хрупких пород. В случае значительной упругости материала, существенной будет доля потери энергии на деформацию и преобразование ее в тепло. Однако при крепости более 6 по шкале М.М. Протодяконова, породы, в большинстве случаев, не имеют значительной упругости и позволяют работать шарошечному долоту в режиме хрупкого разрушения породы.

При данных условиях, по сведениям А.А. Цуприкова [103], скорость бурения, без учета потерь энергии на деформацию породы и выделение тепла, определяется согласно формуле (3.6):

$$v_{\delta} = \frac{8 \cdot n_{вр} \cdot P_{oc} \cdot k_{ш}}{D_1^2 \cdot \sigma_{пов} \cdot k_{об.раз}}, \text{ м/с} \quad (3.6)$$

где $k_{ш}$ – коэффициент пропорциональности; $k_{об.раз}$ – коэффициент объёмного разрушения, характеризующий трещиноватость породы, её способность дробиться на куски; $\sigma_{пов}$ – поверхностная плотность свободной энергии вещества материала породы, Н/м².

Поверхностная плотность свободной энергии вещества материала породы определяется из выражения:

$$\sigma_{пов} = \frac{F_{раз}}{S \cdot k_{об.раз}},$$

где $F_{раз}$ – сила структурного разрушения породы, Н; S – площадь поперечного сечения разрушаемой породы, м².

Физический смысл величины $\sigma_{пов}$ соответствует пределу прочности материала с учетом уже имеющихся повреждений.

По сведениям Р.Ю. Подэрни [75], скорость бурения v_{δ} можно определить

согласно формуле (3.7):

$$v_6 = \frac{40 \cdot P_{oc} \cdot n_{вр}}{\Pi_6 \cdot D_1^2}, \text{ м/ч} \quad (3.7)$$

Показатель буримости Π_6 определяется следующим выражением:

$$\Pi_6 = \frac{\sigma_{пов} \cdot k_{об.раз}}{7,2 \cdot 10^8 \cdot k_{ш}}, \quad (3.8)$$

Исходя из условия хрупкого разрушения, работа одного зубца [103]:

$$A_{раз} = V_{раз} \cdot \sigma_{пов} \cdot k_{об.раз}, \text{ Дж} \quad (3.9)$$

где $V_{раз}$ – объем разрушенной породы одним зубцом, м^3 .

При этом максимальный объем породы ограничивается размером выступающей части одного зубца h в зубчатом ряду шарошки (рисунок 3.2), расстоянием между зубцами в одном ряду и расстоянием между рядами зубцов шарошки.

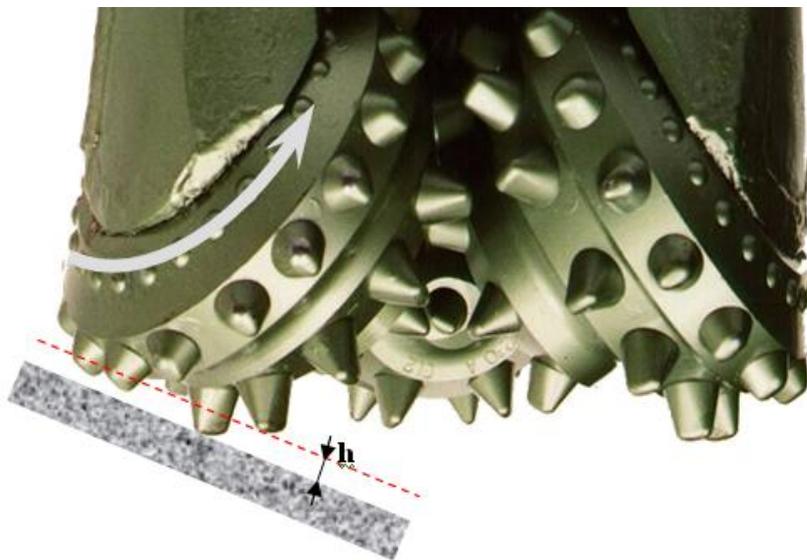


Рисунок 3.2 – Схема шарошки: выступающая часть зубца

Отсюда промежуток времени, необходимый для совершения работы разрушения породы $A_{раз}$ одним зубцом шарошки, при мощности N исполнительного органа бурового агрегата, определяется согласно формуле (3.10):

$$t_{\text{раз}} = \frac{A_{\text{раз}}}{N} = \frac{V_{\text{раз}} \cdot \sigma_{\text{пов}} \cdot k_{\text{об.раз}}}{v_{\text{б}} \cdot P_{\text{ос}}}, \text{ с.} \quad (3.10)$$

С учетом выражения (3.8) промежуток времени, необходимый для совершения работы разрушения породы одним зубцом шарошки, определяется по формуле:

$$t_{\text{раз}} = 7,2 \cdot 10^8 \cdot \frac{R_{\text{ш}} \cdot \Pi_{\text{б}} \cdot V_{\text{раз}}}{N} \text{ или } t_{\text{раз}} = 7,2 \cdot 10^8 \cdot \frac{R_{\text{ш}} \cdot \Pi_{\text{б}} \cdot V_{\text{раз}}}{v_{\text{б}} \cdot P_{\text{ос}}}, \quad (3.11)$$

где $R_{\text{ш}}$ – радиус шарошек долота, м.

Чтобы определить частоту вращения шарошечного долота, при которой время контакта зубцов будет достаточным, для передачи энергии, приводящей к разрушению заданного объема породы, необходимо сравнить время разрушения этого объема со временем контакта зубца с породой при данных кинематических законах движения с учетом диаметра шарошек и количества зубцов в рядах. Таким образом, время контакта зубца определяется следующим образом:

$$t_{\text{к.з}} = \frac{1}{n_{\text{вр}} \cdot \frac{D_1}{D_{\text{ш}}^{\text{max}}} \cdot k_3},$$

где k_3 – количество зубцов всех рядов шарошки.

Из условия эффективного функционирования шарошечных долот время контакта отдельных зубцов с породой определяется согласно формуле (3.12):

$$t_{\text{к.з}} = \frac{1}{1,7 \cdot n_{\text{вр}} \cdot k_3}. \quad (3.12)$$

Максимальная эффективность разрушения соответствует равенству:

$$t_{\text{к.з}} = t_{\text{раз}} \quad (3.13)$$

Если $t_{\text{к.з}} > t_{\text{раз}}$, то неэффективно расходуется время работы бурового агрегата и необходимо повысить частоту вращения бурового долота. Если $t_{\text{к.з}} < t_{\text{раз}}$, то неэффективно используется ресурс долота и необходимо понизить частоту вращения. Таким образом, критерием оптимизации частоты вращения

является равенство времени контакта и времени разрушения (3.13).

Для эффективной работы шарошечного долота необходимо стремиться к выполнению следующего условия:

$$k_{\text{эф.вр}} = \frac{t_{\text{раз}}}{t_{\text{к.з}}} = 7,2 \cdot 10^8 \cdot 1,7 \cdot n_{\text{вр}} \cdot k \cdot \frac{k_{\text{ш}} \cdot \Pi_{\text{б}} \cdot V_{\text{раз}}}{v_{\text{б}} \cdot P_{\text{ос}}} = 1.$$

где $k_{\text{эф.вр}}$ – коэффициент эффективности бурения в зависимости от частоты вращения.

Из условия максимальной эффективности работы шарошечного долота:

$$\frac{1}{1,7 \cdot n_{\text{вр}} \cdot k} = 7,2 \cdot 10^8 \cdot \frac{k_{\text{ш}} \cdot \Pi_{\text{б}} \cdot V_{\text{раз}}}{v_{\text{б}} \cdot P_{\text{ос}}}.$$

Максимальное значение частоты вращения трехшарошечного долота определяется из выражения:

$$n_{\text{вр}} = \frac{N}{D_1 \cdot 3,6 \cdot 10^8 \cdot k \cdot \Pi_{\text{б}} \cdot V_{\text{раз}}}.$$

В случае одного полного оборота шарошки и поражения забоя всеми ее зубцами, максимальная частота вращения долота определяется из выражения:

$$n_{\text{вр}} = \frac{0,94 \cdot N}{10^8 \cdot \pi \cdot D_1^3 \cdot \Pi_{\text{б}} \cdot h},$$

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

С учетом выражения (2.11) оптимальное значение частоты вращения при бурении породного массива предлагается определять по формуле:

$$[n_{\text{вр}}] = \frac{0,94 \cdot N}{10^8 \cdot \pi \cdot D_1^3 \cdot \Pi_{\text{б}} \cdot h} \cdot \frac{\Pi_{\text{б}}^1 + \Delta \Pi_{\text{б}}}{\Pi_{\text{б}}^1 + 0,5 \Delta \Pi_{\text{б}}} \cdot k_{\text{инд}} \quad (3.14)$$

Как видно из выражения (3.14), частота вращения долота зависит от изменения прочностных характеристик, нарушения сплошности и однородности породного массива. При этом с увеличением перепада прочностных характеристик, трещиноватости, слоистости, оптимальная частота вращения увеличивается, снижая общую нагрузку на отдельные тела качения шарошечного долота. Конструктивно значение оптимальной частоты вращения может быть

уменьшено путем снижения коэффициента индентора $k_{инд}$ за счет большего заострения зубцов шарошки и увеличения диаметра долота. Породы с более высоким средним значением показателя буримости также необходимо бурить при меньшем значении частоты вращения по сравнению с менее крепкими породами.

Максимально допустимое осевое усилие определяется из допустимых нагрузок на тела качения шарошечных долот. С учетом выражения (2.11) допустимое максимальное осевое усилие при бурении выражается через радиальное усилие, прилагаемое к подшипнику F_r , предлагается определять по формуле:

$$[P_{oc}] = 6 \cdot z \cdot D_p \cdot L_p \cdot \left(\frac{[\sigma_{p.ш}]}{600 \cdot \frac{v_{\sigma} + 0,5v_s}{v_{\sigma} + 0,25v_s} \cdot \frac{\Pi_{\sigma}^1 + \Delta\Pi_{\sigma}}{\Pi_{\sigma}^1 + 0,5\Delta\Pi_{\sigma}} \cdot k_{инд}} \right)^3, \quad (3.15)$$

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

Из анализа выражения (3.15) следует, что критерий оптимизации максимального осевого усилия зависит от прочности материала подшипников, прочностных и структурных свойств породы. Максимальное значение осевого усилия как режимного параметра при любых условиях не должно превышать значение критерия по выражению (3.15). Минимизация себестоимости возможна при соблюдении критериев оптимизации – частоты вращения и осевого усилия по выражениям (3.14) и (3.15), что приведет к получению оптимального соотношения производительности и ресурса.

3.3 Моделирование процесса управления режимами бурения с учетом критериев оптимизации

Необходимость многократного выполнения сложных и емких расчетов значений режимных параметров для автоматизации процесса шарошечного бурения требует создания специальных средств. Процесс бурения зависит от большого количества параметров, связанных с характеристиками бурового

агрегата, шарошечного долота, свойствами породы, текущими значениями режимных параметров. Главным образом, для оптимизации данного процесса необходимо автоматизировать расчет скорости бурения и ресурса долот в зависимости от значений большого количества изменяющихся параметров, в том числе при оптимальных значениях осевого усилия и частоты вращения.

Предложенная в работе математическая модель процесса шарошечного бурения использована для расчета оптимальных значений режимных параметров, ресурса долота, производительности бурового агрегата при создании специального программного обеспечения. Разработанное программное обеспечение [93, 112] позволяет выбрать буровой станок и уточнить его рабочий диапазон режимных параметров (рисунок 3.3). Затем необходимо указать характеристики породы буримого породного массива, включающие прочностные и структурные свойства (рисунок 3.4), а также конструктивные и прочностные параметры применяемого шарошечного долота (рисунок 3.5).

The screenshot shows a software interface for calculating drilling parameters. The window title is 'MainForm [Расчеты]'. The interface includes a menu bar (Файл, Расчеты, База данных, Опции, Справка) and a toolbar. Below the menu, there are tabs for 'Буровой станок', 'Характеристики породы', 'Шарошечное долото', and 'Режимы'. The main area contains a table with 8 columns representing different drilling regimes and rows for various parameters. A sidebar on the left lists equipment models like Atlas Copco DML, Atlas Copco P4 Viper 235, etc. On the right, there is a photograph of a yellow drilling rig in a snowy, rocky environment.

Исполнение, мм	37	37.02	37.03	37.04	37.05	37.06	37.07
Диаметр скважины, мм	250	250	250	250	250	130	250
Длина штанги, м	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	11,4	8,2
Количество штанг	4	6(2 с плазатора)	6(2 с сепаратора)	4	4	5	4
Глубина бурения, м	32	47	47	32	32	55	32
Способ пылеподавления	мокро	мокро	мокро	мокро	мокро	мокро	мокро
Напряжение питания, В	380	380	380	380	6000	330	6000
Суммарная уст. мощность, кВт	460	460	490	490	490	500	500
Мощность двигателя вращения, кВт	90 пост. ток	90 пост. ток	90 перем. ток с частотн. регуляг	90 перем. ток с частотн. регуляг	90 перем. ток с частотн. регуляг	120	120
Скорость спуска/подъема бур. скважины, м/мин.	25/25	25/25	25/25	25/25	25/25	25/25	25/25
Скорость подачи бурового стока на забой, м/мин.	0...3	0...3	0...3	0...3	0...3	0...3	0...3
Производительность компрессора, м³/мин.	32	32	32	32	32	32	32
Частота вращ. бур. ств. об-и	0...120	0...120	0...120	0...20	0...120	0...120	0...120
Мощность двиг. привода хола, кВт	2x25 пост.ток регул.скорость	2x35 пост.ток регул.скорость	2x45 перем.ток регул.скор. (частотные регул.)	2x45 перем.ток регул.скор. (частотные регул.)	2x45 перем.ток регул.скор. (частотные регул.)	2x50 пост.ток регул.скорость	2x50 пост.ток регул.скорость
Скорость пылеподавления, м³/ч	0-1,3	0-1,3	0-1,8	0-1,8	0-1,8	0-1,8	0-1,8
Макс. преодолеваемый угол, град.	12	12	12	12	12	12	12
Масса, кг	80000	80000	80000	80000	80000	90000	85000
Габаритные размеры с подпиткой водой, м							
длина	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	9,0	10,5
ширина	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	6	5,7
высота	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2	19,8	16,2
Габаритные размеры с опущенной вышкой, м							
длина	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	13,2	15,6
ширина	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	6	5,7
высота	6,6	7,1	7,1	6,6	6,6	7,3	6,6

Рисунок 3.3 – Программа для моделирования режимов шарошечного бурения.

Выбор бурового станка

Параметр	Значение
Крепость (Пбур)	16
Дельта Пбур	6
Количество слоев на пгн/метр скважины (n сл)	10
Количество трещин на пгн/метр (n тр)	15
Вертикальный размер границы	12
Вертикальный размер трещин	8

Рисунок 3.4 – Программа для моделирования режимов шарошечного бурения. Характеристики породы

Параметр	Значение
Количество роликов качения, шт (Z)	20
Длина роликов качения, мм (L)	16
Диаметр шарошечного долота, м (D1)	0,2445
Количество зубьев шарошки (k)	34
Предел прочности тел качения, МПа	2280

Рисунок 3.5 – Программа для моделирования режимов шарошечного бурения. Параметры шарошечного долота

Вкладка «Режимы» (рисунок 3.6) позволяет увидеть весь диапазон характеристик процесса, включая напряжения, скорости бурения и опускания зубца на забой.

Рисунок 3.6 – Программа для моделирования режимов шарошечного бурения.

Расчет характеристик процесса бурения

Нажатие кнопки «Рассчитать» выдает параметры, характеризующие ресурс шарошечного долота в циклах нагружения и метрических величинах. Расчет показывает доли проходки долота при бурении однородной, слоистой и трещиноватой пород. Их сложение показывает ресурс долота при бурении породы с указанными свойствами при выбранных режимных параметрах.

Визуализировать динамику изменения значения того или иного параметра можно построением графической зависимости «Режимы / Графики» (рисунок 3.7). На рисунке 3.7 показана зависимость осевого усилия от ресурса (стойкости) шарошечного долота.

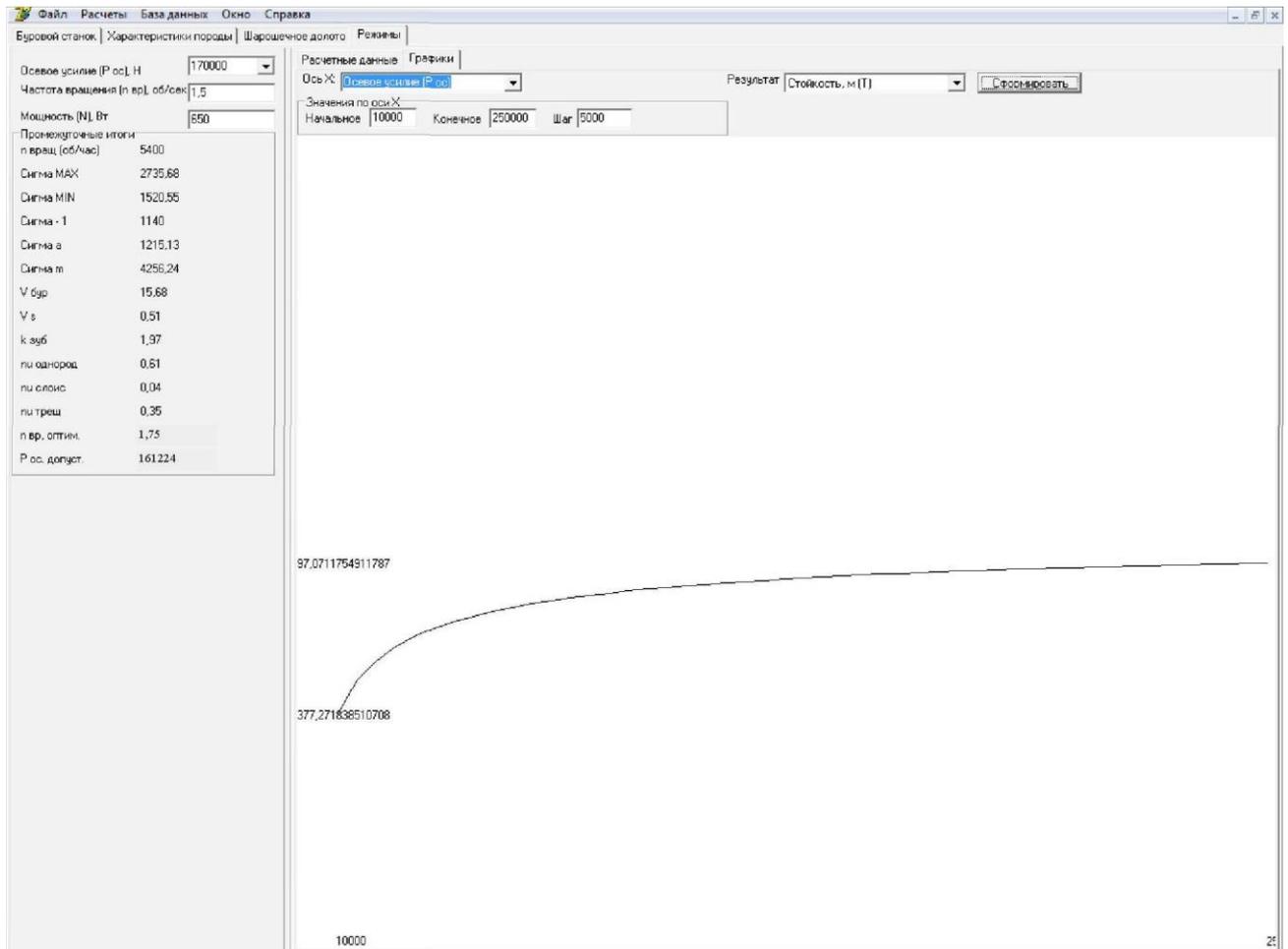


Рисунок 3.7 – Программа для моделирования режимов шарошечного бурения.

Построение графической зависимости

Данное программное обеспечение является расчетным блоком интеллектуальной АСУ процессом шарошечного бурения и позволяет осуществлять мониторинг всех необходимых характеристик и выбирать оптимальные значения режимных параметров. Программа реализует алгоритм оптимального управления данным процессом, учитывающий информационную неопределенность, вызванной случайным изменением свойств породы. При этом, определяемые критерии оптимизации являются реперными точками для выравнивания значений режимных параметров.

3.4 Оценка эффективности управления шарошечным бурением по режимным параметрам

Свойства пород в породном массиве изменяются в процессе бурения. Поэтому максимально допустимое осевое усилие становится величиной переменной. Машинист бурового агрегата, не имея информации о структуре породного массива, поддерживает максимальную механическую скорость бурения интуитивно и с использованием прежнего опыта на определенном уровне. Этот уровень скорости бурения отличается для разных пород, месторождений, условий бурения и т.д. При этом можно утверждать, что машинист для себя выбирает определенные значения осевого усилия и частоты вращения. Значение осевого усилия всегда ниже эффективных значений (3.15) на некоторый коэффициент запаса значений осевого усилия $k_{3,P}$. Величина запаса осевого усилия зависит от квалификации машиниста, но всегда $k_{3,P} < 0$. Это первый фактор неэффективной работы бурового агрегата при ручном управлении режимными параметрами в процессе бурения.

Частота вращения бурового става, как правило, занижается по отношению к оптимальным значениям. Величина запаса частоты вращения, согласно наблюдениям, всегда находится в области неэффективной работы шарошечного долота на коэффициент запаса значений частоты вращения $k_{3,n}$, который также $k_{3,n} < 0$. Это второй фактор неэффективной работы бурового агрегата при ручном управлении режимными параметрами в процессе бурения. Если первый указанный фактор зависит от квалификации машиниста, то второй, помимо квалификации, связан с отсутствием четких рекомендаций по регулированию частоты вращения бурового долота.

Первые два фактора существуют при бурении любой породы и носят заранее определенный и постоянный характер. Определить снижение производительности можно с учетом вышеуказанных коэффициентов запаса в зависимости от квалификации машиниста.

Исходя из наблюдений за работой машинистов буровых агрегатов,

необходимо отметить, что при возникновении существенной вибрации во всех случаях производятся одинаковые действия. Машинист убавляет осевое усилие до некоторого уровня и, если этого не достаточно, убавляет частоту вращения. Отсутствие инструкций по эффективному регулированию значений режимных параметров вынуждает производить такие действия из интуитивных соображений. Как ранее было доказано, снижение осевого усилия в данном случае оправдано, но частота вращения должна одновременно увеличиваться, а не уменьшаться. Существенная вибрация в буровом стае возникает не по причине большой частоты вращения, а по причине совпадения частоты вращения и частоты собственных колебаний рабочего органа бурового агрегата, которая имеет свою структуру, крепость. По этой причине целесообразно несколько увеличивать частоту вращения с одновременным уменьшением осевого усилия.

При бурении сложноструктурных породных массивов на первый план выходят факторы, зависящие от реакции машиниста на изменение свойств породы и времени переходных процессов. Кривая изменения режимных параметров машиниста, отслеживающего все изменения свойств породы, выглядит следующим образом (рисунок 3.8).

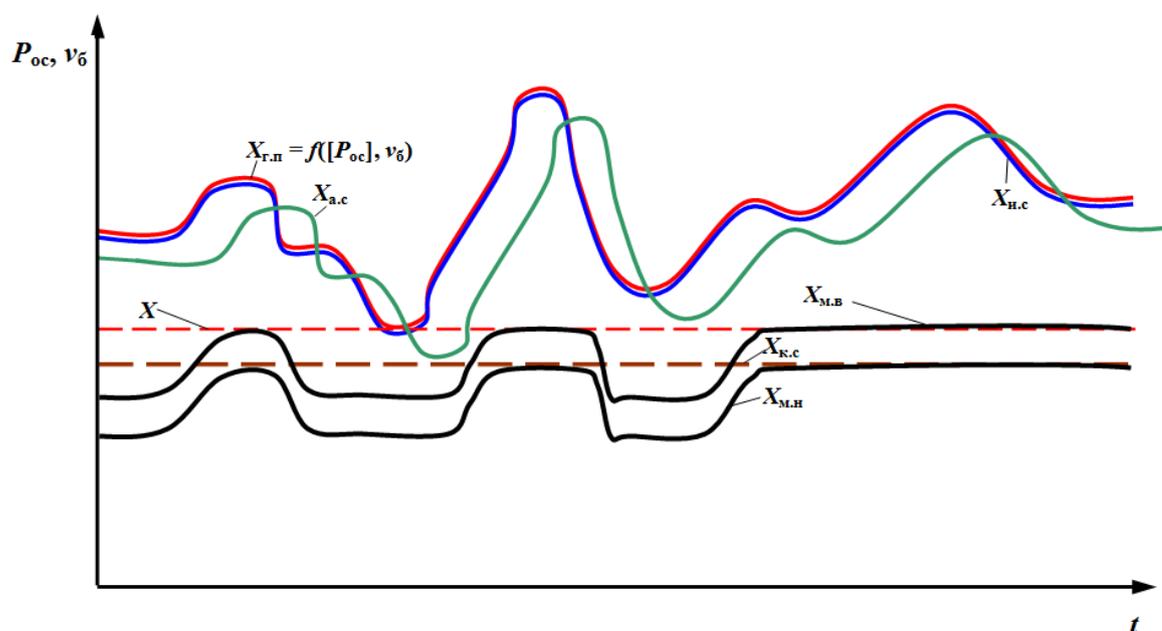


Рисунок 3.8 – Изменение допустимого и установленного значения осевого усилия при использовании различных систем управления

На рисунке 3.8 показаны кривые изменения режимных параметров процесса шарошечного бурения. Здесь $X_{г.п}$ – изменение предельно допустимого осевого усилия в результате изменения показателя буримости Π_6 и структуры породы; $X_{и.с}$ – изменение осевого усилия с применением интеллектуальной автоматизированной системы; $X_{а.с}$ – изменение осевого усилия с применением автоматизированной системы без адаптивного элемента; X – прямая, проходящая через минимальные значения допустимого осевого усилия; $X_{м.в}$ – изменение осевого усилия в ручном режиме машинистом высокой квалификации; $X_{м.н}$ – изменение осевого усилия в ручном режиме машинистом низкой квалификации; $X_{к.с}$ – прямая контроля неизменного значения осевого усилия автоматизированной системы Atlas Copco.

Анализ траекторий изменения режимных параметров процесса бурения сложноструктурного породного массива позволяет сделать вывод, что интеллектуальная автоматизированная система эффективнее регулирует осевое усилие рабочего органа. Она повторяет траекторию изменения предельно допустимого осевого усилия в результате изменения показателя буримости Π_6 и структуры породы с минимальным запасом по осевому усилию. Малое время реагирования позволяет приближаться к максимальным значениям осевого усилия. Существующая автоматизированная система Atlas Copco, осуществляющая контроль неизменного уровня осевого усилия, малоэффективна в связи с потерянными увеличениями механической скорости бурения в промежутки времени, показанные экстремумами увеличения допустимого осевого усилия (кривая $X_{г.п} = f([P_{ос}], \Pi_6)$).

При ручном управлении машинист высокой квалификации, имеющий большой практический опыт, отслеживает по показаниям приборов изменение тока привода подачи или давления в гидросистеме и изменяет осевое усилие (кривая $X_{м.в}$), стараясь максимально приблизить его к минимальным значениям, показанного прямой X . Рабочий низкой квалификации, имеющий мало практического опыта, также следит за показаниями приборов и стремится

приблизить осевое усилие к минимальным значениям допустимого осевого усилия (кривая $X_{м.н}$), но с большим занижением осевого усилия.

При использовании автоматизированной системы, отслеживающей свойства пород без адаптивного элемента, то всегда будет иметь место существенное запаздывание корректировок осевого усилия (кривая $X_{а.с}$), что показывает выход значения осевого усилия за допустимые текущие значения.

Таким образом, разницу между эффективностью интеллектуальной автоматизированной системы и системы ручного управления бурением можно оценить как интегральную сумму разностей механической скорости бурения между кривыми $X_{к.с}$ и $X_{и.с}$ за интервал времени t .

При условии, что скорость бурения определяется из выражения (3.7), а допустимое максимальное значение осевого усилия – по выражению (3.15), минимальное допустимое значение осевого усилия предлагается определять по формуле (3.16):

$$[P_{oc}]_{min} = 6 \cdot z \cdot D_p \cdot L_p \cdot \left(\frac{[\sigma_{p.ш}]}{600 \cdot \frac{v_{\bar{6}} + 0,5v_s}{v_{\bar{6}} + 0,25v_s} \cdot \frac{\Pi'_{\bar{6}min} + \Delta\Pi_{\bar{6}max}}{\Pi'_{\bar{6}min} + 0,5\Delta\Pi_{\bar{6}max}} \cdot k_{инд}} \right)^3 \quad (3.16)$$

Максимальное допустимое значение осевого усилия:

$$[P_{oc}]_{max} = 6 \cdot z \cdot D_p \cdot L_p \cdot \left(\frac{[\sigma_{p.ш}]}{600 \cdot \frac{v_{\bar{6}} + 0,5v_s}{v_{\bar{6}} + 0,25v_s} \cdot k_{инд}} \right)^3 \quad (3.17)$$

Разницу между производительностью бурового агрегата с интеллектуальной автоматизированной системой и системой ручного управления бурением можно оценить как разницу между скоростью бурения при среднем значении осевого усилия:

$$[P_{oc}]_{cp} = \frac{[P_{oc}]_{min} + [P_{oc}]_{max}}{2}.$$

Отношение скоростей бурения с использованием интеллектуальной

автоматизированной системы и системы ручного управления процессом бурения определяется из выражения:

$$\frac{v_{б.и}}{v_{б.к}} = \frac{[P_{ос}]_{ср}}{[P_{ос}]_{min}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\left(\frac{\Pi_{бmin}^I + \Delta\Pi_{бmax}}{\Pi_{бmin}^I + 0,5\Delta\Pi_{бmax}} \right)^3 + \left(\frac{\Pi_{бmin}^I + \Delta\Pi_{бmax}}{\Pi_{бmin}^I + 0,5\Delta\Pi_{бmax}} \right)^3 \right)^3$$

Таким образом, повышение производительности при управлении осевым усилием можно найти из следующего выражения:

$$\frac{v_{б.и}}{v_{б.к}} = 4 \cdot \left(\frac{\Pi_{бmin}^I + \Delta\Pi_{бmax}}{2\Pi_{бmin}^I + \Delta\Pi_{бmax}} \right)^3, \quad (3.18)$$

где $v_{б.и}$ – скорость бурения при управлении бурением с использованием интеллектуальной системы; $v_{б.к}$ – скорость бурения при контроле неизменного значения режимного параметра; $\Pi_{бmin}^I$ – минимальное значение показателя буримости породы в массиве; $\Delta\Pi_{бmax}$ – максимальное изменение показателя буримости.

При бурении сложноструктурных пород на первый план также выходят факторы, зависящие от регулирования частоты вращения бурового става при изменении свойств породы. Кривая изменения частоты вращения бурового става машинистом, отслеживающим все изменения свойств породы, показана на рисунке 3.9. Как показано ранее (выражение 3.15), при бурении породного массива существует некоторое оптимальное текущее значение частоты вращения шарошечного долота, которое эффективно работает в этом режиме с точки зрения производительности и ресурса.

Исходя из практических наблюдений, машинисты, в случае возникновения значительной вибрации, уменьшают частоту вращения, выводя систему из режима резонанса, что приводит к существенной потере производительности и снижению ресурса шарошечного долота. Шарошечное долото при снижении частоты вращения начинает работать в режиме ударного действия, что негативно

сказывается на ресурсе его подшипников. Для шарошечного долота максимальная частота вращения определяется условием нагрева от трения в подшипниках. В связи с большим количеством факторов, оказывающих влияние на ресурс опор качения, рекомендуется удерживать значение частоты вращения выше оптимального значения $[n_{вр}]$ (рисунок 3.9), но не превышать значения, указанные заводом-изготовителем.

При возникновении значительной вибрации рекомендуется увеличить частоту вращения бурового долота при одновременном уменьшении осевого усилия согласно формуле (3.15). После снижения вибрации необходимо приблизить значение частоты вращения к оптимальному $[n_{вр}]$ и удерживать не ниже последнего.

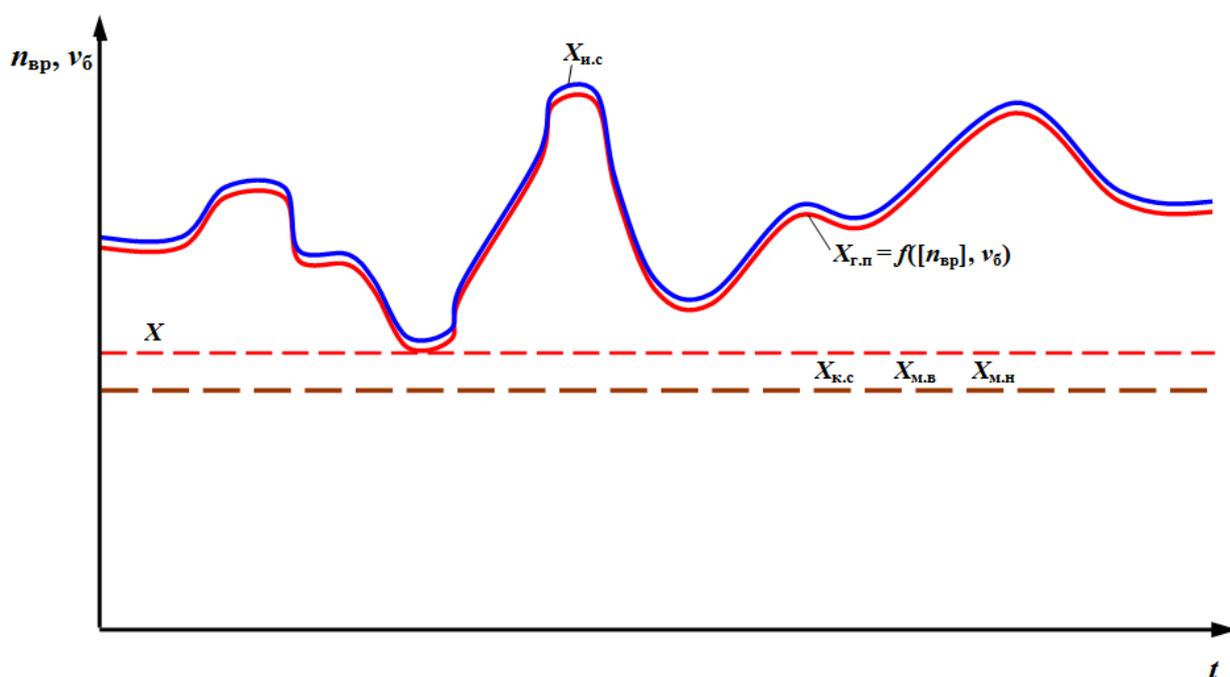


Рисунок 3.9 - Изменение оптимальной и установленной частоты вращения при использовании различных систем управления

На рисунке 3.9 представлены кривые изменения частоты вращения рабочего органа бурового агрегата. Здесь $X_{г.п}$ – изменение оптимального значения частоты вращения в результате изменения свойств породы; $X_{н.с}$ – изменение частоты вращения долота с применением интеллектуальной автоматизированной системы;

X – прямая, проходящая через минимальные значения частоты вращения; $X_{м.в}$, $X_{м.н}$ – прямые контроля постоянного значения частоты вращения в ручном режиме машинистом высокой и низкой квалификации; $X_{к.с}$ – прямая контроля неизменного значения частоты вращения автоматизированной системы Atlas Copco.

Разницу между эффективностью интеллектуальной автоматизированной системы и системы ручного управления шарошечным бурением можно оценить как интегральную сумму разностей механической скорости бурения между кривыми $X_{к.с}$ и $X_{и.с}$ за интервал времени t .

При условии, что допустимое значение частоты вращения согласно выражению (3.14), отношение скоростей бурения бурового агрегата с интеллектуальной автоматизированной системой и системой ручного управления шарошечным бурением при регулировании частоты вращения предлагается определять по формуле:

$$\frac{v_{б.и}}{v_{б.к}} = \frac{[n_{вр}]_{min} + [n_{вр}]_{max}}{2 \cdot [n_{вр}]_{min}}.$$

Минимальное и максимальное значения $[n_{вр}]$ за некоторый промежуток времени, в течение которого изменяются свойства породы, предлагается определять по формулам:

$$[n_{вр}]_{min} = \frac{0,94 \cdot N}{10^8 \cdot \pi \cdot D_1^3 \cdot \Pi_{б.ср} \cdot h} \cdot \frac{\Pi_{бmax}^I + \Delta\Pi_{бmin}}{\Pi_{бmax}^I + 0,5\Delta\Pi_{бmin}} \cdot k_{инд},$$

$$[n_{вр}]_{max} = \frac{0,94 \cdot N}{10^8 \cdot \pi \cdot D_1^3 \cdot \Pi_{б.ср} \cdot h} \cdot \frac{\Pi_{бmin}^I + \Delta\Pi_{бmax}}{\Pi_{бmin}^I + 0,5\Delta\Pi_{бmax}} \cdot k_{инд}.$$

Таким образом, при управлении частотой вращения повышение производительности определяется согласно формуле (3.19):

$$\frac{v_{б.и}}{v_{б.к}} = \frac{\Pi_{бmin}^I + \Delta\Pi_{бmax}}{2\Pi_{бmin}^I + \Delta\Pi_{бmax}}. \quad (3.19)$$

Максимальное значение осевого усилия как режимного параметра при любых условиях не должно превышать значение критерия по выражению (3.15).

Минимизация себестоимости возможна при соблюдении критериев оптимизации – частоты вращения и осевого усилия по выражениям (3.14) и (3.15), что приведет к получению оптимального соотношения производительности и ресурса. Оценка производительности позволяет максимально эффективно использовать время работы бурового агрегата.

Предложенная модель процесса шарошечного бурения и оптимизационная модель, реализованные в виде программы для ЭВМ [93, 112], используются для решения задачи оптимизации режимных параметров в условиях непрогнозируемого изменения свойств породы и успешно применяются при создании интеллектуальной автоматизированной системы управления процессом шарошечного бурения, что подтверждается прилагаемыми актами внедрения в ООО «Краспромавтоматика» и ООО «Тяжмашсервис» (г. Красноярск, см. Приложение А).

3.5 Оценка эффективности управления шарошечным бурением по интегральному показателю

Представленная в данной главе методика позволяет проанализировать соотношение производительности бурового агрегата и ресурса шарошечного долота при бурении пород, характеризующихся различными показателями буримости, количеством и размером трещин и слоев породы с различными физико-механическими свойствами.

С использованием разработанной методики построено несколько зависимостей для пород со средним показателем буримости P_6 – 10, 15, 20, значительно отличающихся по трещиноватости и слоистости (рисунок 3.10). Вертикальными линиями разграничены участки кривых, соответствующие осевому усилию, в диапазоне, рекомендуемом заводом-изготовителем для шарошечных долот типа ОК-ПВ.

На рисунке 3.10 видно, что в пересчете на скорость бурения диапазон значительно отличается при различных показателях буримости P_6 . При анализе

кривых при изменении количества трещин и слоев породного массива значительно изменяется ресурс долот. С экономической точки зрения, более оправданным является использование следующего соотношения:

$$S(v_6, T) = \gamma \cdot t_b + \frac{\gamma}{v_6} + \frac{C_d}{T} = \frac{A \cdot t_b}{t_c \cdot \eta} + \frac{A}{t_c \cdot \eta \cdot v_6} + \frac{C_d}{T}, \quad (3.20)$$

где S – удельные затраты на бурение, руб/м; C_d – стоимость долота, руб.; t_b – удельные затраты времени на вспомогательные операции, мин/м; γ – стоимость машино-часа производственной работы бурового агрегата, выраженная соотношением $\gamma = A/(T_c \cdot \eta)$; A – стоимость машино-смены, руб.; t_c – продолжительность смены, ч; η – коэффициент эффективного использования бурового агрегата в течение смены (обычно составляет $\eta = 0,75 - 0,85$).

Разработанные методики с учетом зависимостей (3.14) и (3.15) позволяют рассчитывать критерии оптимизации, скорость бурения и ресурс долота для различных свойств породы. Например, на рисунке 3.10, а для свойств породы, соответствующих кривой 2, рассчитаны оптимальные режимные параметры: $[n_{вр}] = 2,75$ об/с, $[P_{oc}] = 174$ кН; ресурс долота при данных режимах $T = 887$ м. На рисунке 3.10, б для свойств породы, соответствующих кривой 9, рассчитаны оптимальные режимные параметры: $[n_{вр}] = 1,79$ об/с, $[P_{oc}] = 185$ кН; ресурс долота при данных режимах $T = 565$ м. На рисунке 3.10, в для свойств породы, соответствующих кривой 15, рассчитаны оптимальные режимные параметры: $[n_{вр}] = 1,38$ об/с, $[P_{oc}] = 169$ кН; ресурс долота при данных режимах $T = 300$ м.

Анализ зависимостей 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 (участки кривых на рис. 3.10, разграниченные вертикальными линиями), что доказывает адекватность оптимизационной модели.

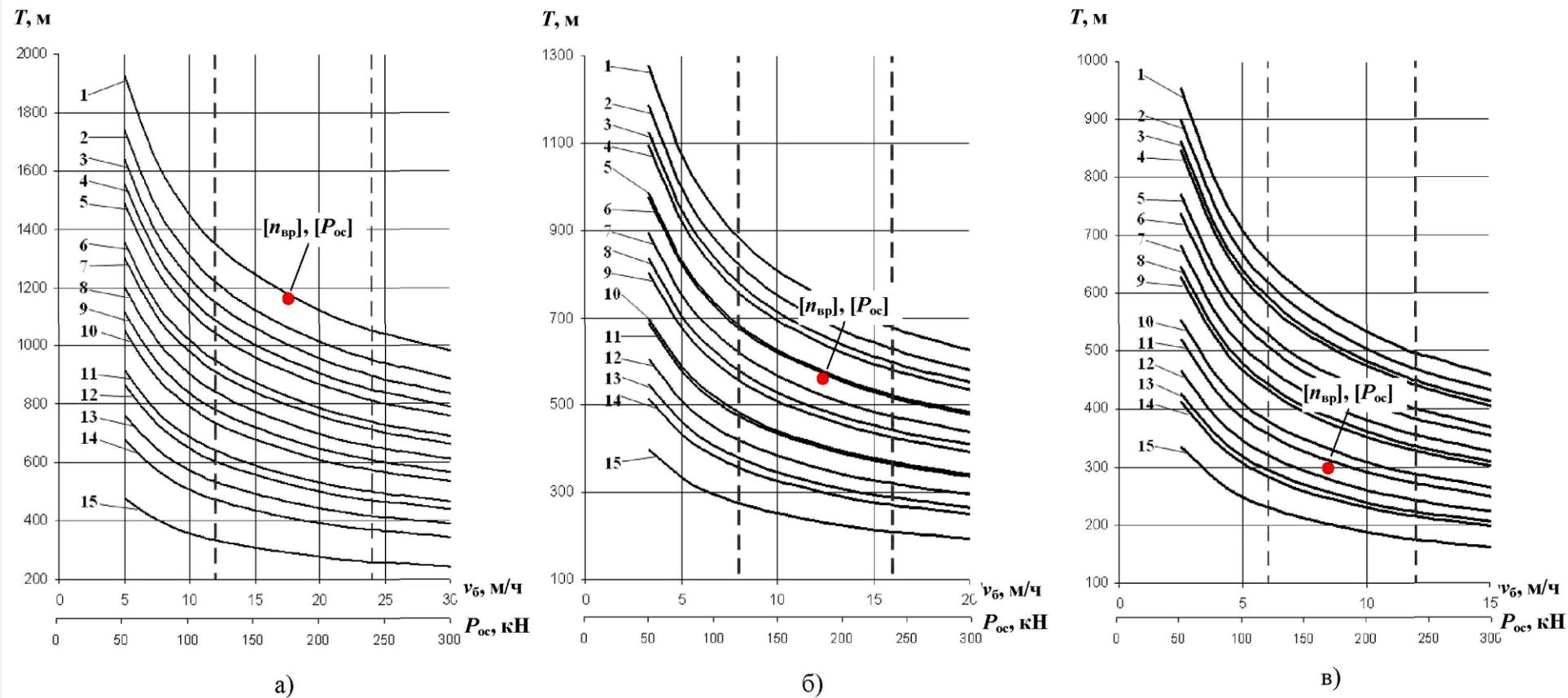


Рисунок 3.10 – Зависимости ресурса T шарошечных долот, скорости бурения v_b и осевого усилия P_{oc} при $n_{вp} = 1,5$ об/с:

а) $\Pi_b = 10$; б) $\Pi_b = 15$; в) $\Pi_b = 20$. Характеристики породы для кривых:

1 – $n_{сл} = 0, n_{тр} = 0$; 2 – $n_{сл} = 10, \Delta\Pi_b = 2, n_{тр} = 0$; 3 – $n_{сл} = 10, \Delta\Pi_b = 4, n_{тр} = 0$; 4 – $n_{сл} = 20, \Delta\Pi_b = 2, n_{тр} = 0$; 5 – $n_{сл} = 0, n_{тр} = 10$; 6 – $n_{сл} = 20, \Delta\Pi_b = 4, n_{тр} = 0$; 7 – $n_{сл} = 10, \Delta\Pi_b = 2, n_{тр} = 10$; 8 – $n_{сл} = 10, \Delta\Pi_b = 4, n_{тр} = 10$; 9 – $n_{сл} = 20, \Delta\Pi_b = 2, n_{тр} = 10$; 10 – $n_{сл} = 0, n_{тр} = 20$; 11 – $n_{сл} = 20, \Delta\Pi_b = 4, n_{тр} = 10$; 12 – $n_{сл} = 10, \Delta\Pi_b = 2, n_{тр} = 20$; 13 – $n_{сл} = 20, \Delta\Pi_b = 4, n_{тр} = 10$; 14 – $n_{сл} = 20, \Delta\Pi_b = 2, n_{тр} = 20$; 15 – $n_{сл} = 20, \Delta\Pi_b = 4, n_{тр} = 20$.

Для нахождения численного значения удельных затрат на бурение породного массива с определенными свойствами, необходимо определить ресурс долота. С учетом приведенных выше расчетных методик, выражение для определения ресурса шарошечного долота предлагается определять по следующей формуле:

$$T = 10^6 \cdot \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{p.уд.}^{max}} \right)^{10/3} \cdot \frac{\sigma_{-1}}{1,7} \times$$

$$\times \left(\frac{1 - \delta_{сл} - \delta_{тр}}{\sigma_{p.уд.}^{max} - \sigma_p^{max} + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \cdot (\sigma_{p.уд.}^{max} + \sigma_p^{max})} + \frac{\delta_{сл}}{\sigma_{p.уд.}^\Sigma - \sigma_p^{max} + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \cdot (\sigma_{p.уд.}^\Sigma + \sigma_p^{max})} + \frac{\delta_{тр}}{\sigma_{p.уд.}^\Sigma + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \cdot \sigma_{p.уд.}^\Sigma} \right).$$

При условии, что $\sigma_{-1} = 0,5\sigma_B$, то выражение примет вид:

$$T = 10^6 \cdot \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{p.уд.}^{max}} \right)^{10/3} \cdot \frac{\sigma_{-1}}{1,7} \cdot \left(\frac{1 - \delta_{сл} - \delta_{тр}}{1,5\sigma_{p.уд.}^{max} - 0,5\sigma_p^{max}} + \frac{\delta_{сл}}{1,5\sigma_{p.уд.}^\Sigma - 0,5\sigma_p^{max}} + \frac{\delta_{тр}}{1,5\sigma_{p.уд.}^\Sigma} \right), \text{ М.}$$

После подстановки выражений, показывающих напряжения при различных условиях нагружения получено выражение для расчета ресурса долота T , учитывающее количество циклов до разрушения подшипников, соответственно бурению однородной, слоистой и трещиноватой пород пропорционально долям от общего количества циклов нагружения тел качения шарошек:

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

$$\times \left(\frac{1 - \delta_{сл} - \delta_{тр}}{1,5 \cdot \frac{v_{\delta} + 0,5v_s}{v_{\delta} + 0,25v_s} - 0,5} + \frac{\delta_{сл}}{1,5 \cdot \frac{v_{\delta} + 0,5v_s}{v_{\delta} + 0,25v_s} \cdot \frac{\Pi_{\delta}^1 + \Delta\Pi_{\delta}}{\Pi_{\delta}^1 + 0,5\Delta\Pi_{\delta}} - 0,5} + \frac{\delta_{тр}}{\frac{2v_{\delta} + v_s}{v_{\delta} + 0,25v_s} \cdot \Pi_{\delta}^1} \right). \quad (3.21)$$

В качестве интегрального критерия оценки эффективности управления

процессом шарошечного бурения (включая режимные параметры) принимаются эксплуатационные затраты на бурение 1 м скважины с учетом повышения производительности и ресурса долота при управлении с помощью интеллектуальной системы:

$$S(v_{б.и}, T) = \frac{A \cdot t_b}{t_c \cdot \eta} + \frac{A}{t_c \cdot \eta \cdot v_{б.и}} + \frac{C_d}{T}, \quad (3.22)$$

где $v_{б.и}$ – скорость бурения при управлении с поддержанием оптимальных значений режимных параметров.

С учетом выражений для определения оптимальных значений режимных параметров (3.14) и (3.15) скорость бурения при оптимальном управлении с использованием адаптивного элемента предлагается определять по формуле:

$$v_{б.и} = \frac{40 \cdot [P_{oc}] \cdot [n_{вр}]}{\Pi_6 \cdot D_1^2}.$$

На рисунке 3.11 показаны расчетные зависимости удельных затрат на бурение породы с различными режимными параметрами. Расчетные зависимости с учетом выражений для определения оптимальных значений режимных параметров (3.14) и (3.15) позволяют определить минимальные удельные затраты при условии оптимального управления. На рисунке 3.11 показана точка, соответствующая оптимальным значениям режимных параметров $[P_{oc}]$, $[n_{вр}]$ и максимальной эффективности технологического процесса по интегральному показателю. Классический метод оценки эффективности процесса шарошечного бурения не связан с оптимизацией режимных параметров, 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.

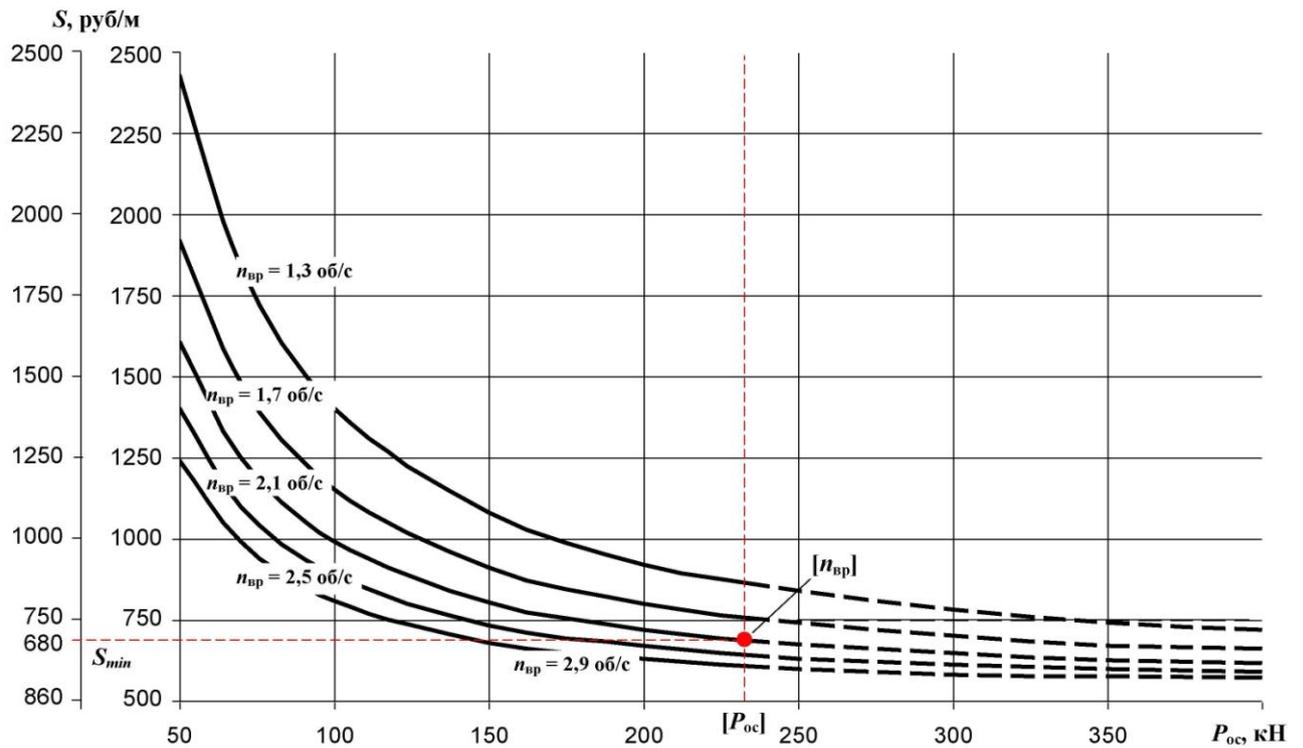


Рисунок 3.11 – Зависимости интегрального показателя эффективности S управления процессом шарошечного бурения от режимных параметров P_{oc} и $n_{вp}$ на примере АО «Хакасвзрывпром»

Оценка эффективности управления процессом шарошечного бурения 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.

Подводя итог, можно отметить необходимость применения данной методики для определения рекомендуемых значений соотношения ресурса шарошечного долота и скорости бурения, соответствующего оптимальной эффективности процесса шарошечного бурения. В свою очередь значения ресурса долота и скорости бурения должны контролироваться в постоянном режиме с учетом изменяющихся свойств породы.

Применение приведенной методики и учет данных рекомендаций позволяют повысить эффективность процесса шарошечного бурения и снизить эксплуатационные затраты при оптимальной производительности в условиях непрогнозируемых изменяющихся и ударных нагрузок.

Выводы

Разработана структура интеллектуальной АСУ процессом шарошечного бурения, осуществляющей корректировку значений режимных параметров в условиях непрогнозируемого изменения свойств породы. 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.

Предложена оптимизационная модель управления параметрами процесса шарошечного бурения. Разработанный 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, позволяет определить максимальные значения ресурса долота и производительности. Корректирующие значения режимных параметров определяются с помощью найденных выражений для расчета их оптимальных значений, соответствующих минимальным удельным затратам на процесс бурения.

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 бурового 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 значений режимных параметров 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%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе предложено новое решение актуальной научной задачи разработки интеллектуальной автоматизированной системы управления процессом шарошечного бурения, имеющей важное народнохозяйственное значение для развития горнодобывающей, нефтегазовой и строительной отраслей страны.

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.

В интеллектуальной системе управления процессом шарошечного бурения предложено использовать АВПМ, сглаживающий кратковременные случайные возмущения в форме ударных нагрузок, вызванных случайным изменением свойств пород. АВПМ также выполняет функции датчика, что позволяет своевременно фиксировать изменения свойств породы. Установлена взаимосвязь параметров модели процесса шарошечного бурения. В структуру интеллектуальной системы предложено ввести регулятор, позволяющий в режиме реального времени формировать управляющее воздействие на объект управления, соответствующего алгоритму его работы, и получать оптимальные значения выходных параметров. Исполнительный механизм в качестве АВПМ в режиме реального времени преобразует входное управляющее воздействие в физическое воздействие в виде скорректированного осевого усилия и частоты вращения, в результате чего соответственно меняются значения выходных параметров.

Разработанная математическая модель процесса шарошечного бурения, включающая установленные взаимосвязи его параметров, позволяет 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.

Разработана структура интеллектуальной АСУ процессом шарошечного бурения, осуществляющей корректировку значений режимных параметров в условиях случайного изменения свойств породы. 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.

Предложена оптимизационная модель управления параметрами процесса шарошечного бурения. Разработанный 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, позволяет определить максимальные значения ресурса долота и производительности. Корректирующие поправки режимных параметров определяются с помощью предложенных выражений для расчета их оптимальных значений, соответствующих минимальным удельным затратам на процесс бурения.

Своевременное регулирование значений режимных параметров процесса шарошечного бурения с использованием интеллектуальной АСУ обеспечивает повышение механической скорости бурения за счет оптимизации значений осевого усилия и частоты вращения бурового 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%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аванесов, В.М. Оценка потенциала энергосбережения промышленного предприятия с учетом неопределенности информации / В.М. Аванесов, Е.В. Садков // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2006. – № 6. – С. 8-11.
2. Акутин, Г.К. Автоматизация технологических процессов на карьерах / Г.К. Акутин, Л.В. Гулько, Ю.М. Щербина, В.В. Яснопольский. – М.: Недра, 1977. – 311 с.
3. Алябьев, Н.М. Автоматизация и автоматизированные системы управления в угольной промышленности / Н.М. Алябьев, В.А. Ульшин, М.С. Рабинович. – Под ред. Б.Ф. Братченко. – М.: Недра, 1976. – 383 с.
4. Андреев, Е.Б. Технические средства систем управления технологическими процессами в нефтяной и газовой промышленности / Е.Б. Андреев, В.Е. Попадько. – М.: Изд-во Нефть и газ, РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2005. – 272 с.
5. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3 т. / под ред. И.Н. Жестковой. – Т. 2. – 9-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2006. – 960 с.
6. Баранникова, И.В. Разработка моделей и алгоритмов управления шарошечным станком в режиме бурения: дис. ... канд. техн. наук. – М.: Московский государственный горный университет, 2003. – 134 с.
7. Барон, В.Л. Техника и технология взрывных работ в США / В.Л. Барон, В.Х. Кантор. – М.: Недра, 1989. – 376 с.
8. Баступский, М.А. Устройства автоматики для горных предприятий / М.А. Баступский, Л.Г. Мелькумов, В.Г. Шорин [и др.]. – М.: Недра, 1978. – 359 с.
9. Батицкий, В.А. Автоматизация производственных процессов и АСУТП в горной промышленности / В.А. Батицкий, В.И. Куроедов, А.А. Рыжков. – М.: Недра, 1991. – 303с.
10. Батрак, А.Ф. Методы выработки технико-технологических решений при бурении в условиях неопределенности: дис. ... канд. техн. наук. –

Екатеринбург: Уральская государственная горно-геологическая академия, 2002. – 220 с.

11. Бахвалов, Л.А. Построение и оптимизация математических моделей по экспериментальным данным. Учебное пособие / Л.А. Бахвалов, М.А. Комаров. – М.: МГГУ, 1997. – 111с.

12. Белов, М.П. Технические средства автоматизации и управления. Учебное пособие / М.П. Белов. – СПб.: СЗТУ, 2006. – 184 с.

13. Благовещенская, М.М. Информационные технологии систем управления технологическими процессами / М.М. Благовещенская, Л.А. Злобин. – М.: Высшая школа, 2005. – 768 с.

14. Блинов, Ю.Ф. Методы математического моделирования / Ю.Ф. Блинов, В.В. Иванцов, П.В. Сербя // Таганрог: ТТИ ЮФУ. – 2012. – [Электронный ресурс] Режим доступа URL: <http://fep.tti.sfedu.ru/russian/tmina/education/literatura/mmm1.pdf>.

15. Бревдо, Г.Д. Проектирование режима бурения / Г.Д. Бревдо. – М.: Недра, 1988. – 200 с.

16. Бродов, Г.С. Технологические измерения и автоматизация процесса бурения / Г.С. Бродов, И.Г. Шелковников, Э.К. Егоров. – СПб.: ФГУ НПП «Геологоразведка», Санкт-Петербургский горный институт, 2004. – 105 с.

17. Буткин, В.Д. Автоматизация буровых станков – прогрессивное развитие технологии бурения на карьерах / В.Д. Буткин, А.А. Жуковский // Горный журнал. – 1981. – № 9. – С. 41-44.

18. Буткин, В.Д. Проектирование режимных параметров автоматизированных станков шарошечного бурения / В.Д. Буткин. – М.: Недра, 1979. – 208 с.

19. Буткин, В.Д. САУ процессом шарошечного бурения / В.Д. Буткин, А.А. Жуковский // Горный журнал. – 1972. – № 9. – С. 59-62.

20. Виноградов, В.Н. О критерии усталостной прочности зубьев шарошек / В.Н. Виноградов [и др.] // Долговечность газонефтепромыслового оборудования и инструмента: труды МИНХиГП. – М.: Недра, 1968. – Вып. 81. – С. 20-25.

21. Волков, А.А. Экстремальное управление буровыми машинами вращательного действия / А.А. Волков, В.Ф. Шостак // Известия вузов. Горный журнал. – 1966. – №3. – С.23-28.
22. Воронин, А.В. Моделирование технических систем / А.В. Воронин. – Томск: ТПУ, 2013. – 130 с.
23. Втюрин, В.А. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Основы АСУТП. Учебное пособие / В.А. Втюрин. – СПб: СПбГЛТА, 2006. – 153 с.
24. Ганопольский, М.И. Методы ведения взрывных работ. Специальные взрывные работы / М.И. Ганопольский, В.Л. Барон, В.А. Белин [и др.]. – 2-е изд. – М.: Изд-во Московского горного университета, 2013. – 563 с.
25. Гафиятуллин, Р.Х. Режимы и автоматизация процесса ударно-вращательного бурения / Р.Х. Гафиятуллин, И.М. Кузнецов, О.В. Игнатьев, А.Е. Троп. – М.: Недра, 1978. – 152 с.
26. Гилёв, А.В. Анализ проходки шарошечных долот в условиях Олимпиадинского ГОК ЗАО «ПОЛЮС» / А.В. Гилёв, К.А. Бовин, А.О. Шигин, И.Р. Белозеров. – Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2 (1). – [Электронный ресурс] Режим доступа URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=20398> (дата обращения: 09.11.2016).
27. Гилев, А.В. Проектирование рабочих органов и режимных параметров буровых станков для сложноструктурных горных массивов / А.В. Гилев, А.О. Шигин, В.Д. Буткин. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – 312 с.
28. Дмитриев, В.Н. Разработка теории механических систем и повышение эффективности станков шарошечного бурения: дис. ... доктора техн. наук. – М.: Московский горный институт, 1987. – 430 с.
29. Доброзраков, А.В. Автоматизированный вращательно-подающий механизм для станка шарошечного бурения / А.В. Доброзраков // Технический прогресс в атомной промышленности. Серия: Горно-металлургическая промышленность. – 1987. – № 10. – С. 20-22.

30. Докукин, А.В. Статическая динамика горных машин / А.В. Докукин, Ю.Д. Красников, З.Я. Хургин. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
31. Жуковский, А.А. Привод и системы управления буровых станков для карьеров / А.А. Жуковский, Ю.А. Нанкин, В.А. Сушинский. – М.: Недра, 1990. – 223 с.
32. Жуковский, А.А. Средства автоматизации железорудных карьеров / А.А. Жуковский, А.Г. Зарипов, В.В. Климов, В.П. Крюков. – М.: Недра, 1976. – 128 с.
33. Замышляев, В.Ф. Современное состояние конструкций карьерных буровых станков / В.Ф. Замышляев, Р.Ю. Подэрни, С.К. Прасолов // Научный вестник МГГУ. – 2012. – № 12 (33). – С. 100-113.
34. Зарубин, В.С. Математическое моделирование в технике: учебник для вузов / В.С. Зарубин [и др.]. – Под ред. В.С. Зарубина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 496 с.
35. Ильин, А.В. Математические методы теории управления. Проблемы устойчивости, управляемости и наблюдаемости / А.В. Ильин, С.В. Емельянов, С.К. Коровин, В.В. Фомичев. – М.: Физматлит, 2013. – 200 с.
36. Кантович, Л.И. Статика и динамика буровых шарошечных станков / Л.И. Кантович, В.Н. Дмитриев. – М.: Недра, 1984. – 200 с.
37. Карклин, А.В. Исследование и разработка мехатронного комплекса станка шарошечного бурения: автореф. дис. канд. техн. наук. – Владимир: Владимирский государственный университет, 2005. – 16 с.
38. Катанов, Б.А. Карьерные буровые станки. Каталог-справочник «Горная техника» / Б.А. Катанов. – 2007. – С. 122-130.
39. Квагинидзе, В.С. Буровые станки на карьерах. Конструкции, эксплуатация, расчёт: учебное пособие / В.С. Квагинидзе, Г.И. Козовой, Ф.А. Чакветадзе, Ю.А. Антонов, В.Б. Корецкий. – М.: Горная книга, 2012. – 291 с. – [Электронный ресурс] Режим доступа URL: <http://e.lanbook.com/book/66440>.

40. Козловский, Е.А. Автоматизация управления геологоразведочным бурением / Е.А. Козловский, В.М. Питерский, С.Ф. Мурашев. – М.: Недра, 1991. – 198с.
41. Козловский, Е.А. Механизация и оптимизация процесса бурения разведочных скважин / Е.А. Козловский, А.Д. Дьяков, П.А. Петров. – М.: Недра, 1980. – 384 с.
42. Козловский, Е.А. Моделирование процесса бурения с целью его оптимизации / Е.А. Козловский, В.М. Питерский. – М: ОНТИ ВИЭМС, 1974. – 92 с.
43. Комащенко, В.И. Взрывные работы: учебник / В.И. Комащенко, В.Ф. Носков, Т.Т. Исмаилов. – М.: Высшая школа, 2007. – 439 с.
44. Комиссарчик, В.Ф. Автоматическое регулирование технологических процессов: учебное пособие / В.Ф. Комиссарчик. – Тверь, 2001. – 247 с.
45. Кулябин, Г.А. Оптимизация технологии бурения и совершенствование привода долота на основе исследований динамических процессов в скважине: дис. ... доктора техн. наук. – Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2002. – 267 с.
46. Кулябин, Г.А. Технология углубления скважин с учетом динамики процессов: учебное пособие / Г.А. Кулябин, А.Г. Кулябин, А.Ф. Семенов. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. – 206 с.
47. Кутузов, Б.Н. Определение оптимальных режимов шарошечного бурения взрывных скважин на карьерах / Б.Н. Кутузов, Л.И. Кантович // В кн.: Научные труды МИРГЭМ. – М., 1965. – № 53. – С. 238-246.
48. Ламбин, А.И. Оптимизация процессов бурения. Элементарное введение в методы оптимизации: учебное пособие / А.И. Ламбин, Т. Фуньлинь, Ц. Гошень. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. – 92 с.
49. Литвинов, М.А. Система комплексного моделирования процессов при бурении нефтяных скважин на основе нечетких множеств: дис. ... канд. техн. наук. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2005. – 156 с.

50. Ломакин, М.С. Автоматическое управление технологическими процессами карьеров / М.С. Ломакин. – М.: Недра, 1978. – 280 с.

51. Мавлютов, М.Р. Технология бурения глубоких скважин. Учебное пособие для вузов / М.Р. Мавлютов, Л.А. Алексеев, К.И. Вдовин [и др.]. – Под общ. ред. проф. М.Р. Мавлютова. – М.: Недра, 1982. – 287 с.

52. Макаров, И.М. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И.М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов. – М.: Наука, 2006. – 336 с.

53. Мальцев, А.В. Приборы и средства контроля процессов бурения: справочное пособие / А.В. Мальцев, Л.М. Дюков. – М.: Недра, 1989. – 253 с.

54. Мамиконов, А.Г. Автоматизированные информационно-управляющие системы на горных предприятиях. Учебное пособие / А.Г. Мамиконов, Н.И. Федунец, Д.К. Потресов. – М.: МГИ, 1989. – 49 с.

55. Матвейкин, В.Г. Применение SCADA-систем при автоматизации технологических процессов / В.Г. Матвейкин, С.В. Фролов, М.Б. Шехтман. – М.: Машиностроение, 2000. – 176 с.

56. Мелькумов, Л.Г. Автоматизированные системы управления в угольной промышленности / Л.Г. Мелькумов, Л.М. Климов, Р.Д. Мигачев. – М.: Недра, 1980. – 287 с.

57. Муминов, Р.О. Обоснование и выбор динамических параметров вращательно-подающего механизма карьерного бурового станка: дис. ... канд. техн. наук. – М.: Московский государственный горный университет, 2012. – 115 с.

58. Назарян, С.А. Развитие методов управления надежностью сложных технических систем с зависимыми отказами элементов: дис. ... канд. техн. наук. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2004. – 140 с.

59. Нестеров, А.Л. Проектирование АСУ ТП / А.Л. Нестеров. – Кн. 2. – М.: Деан, 2009. – 944 с.

60. Нехорошев, Д.Б. Обоснование и выбор рациональных параметров технологического процесса шарошечного бурения в условиях карьера: дис. ...

канд. техн. наук. – Иркутск: Иркутский государственный технический университет, 2007. – 177 с.

61. Нурлыбаев, М.А. Автоматизированные системы управления технологическими процессами на карьерах. Учебное пособие для вузов / М.А. Нурлыбаев. – М.: Недра, 1985. – 197 с.

62. Олдред, У. Автоматизация бурения / У. Олдред, Ж. Бурк, М. Мэннеринг [и др.] // Нефтегазовое обозрение. – 2012. – Том 24, № 2. – С. 22-35.

63. Олссон, Г. Цифровые системы автоматизации и управления / Г. Олссон, Д. Пиани. – СПб.: Невский Диалект, 2001. – 557 с.

64. Орлов, А.В. Оптимизация процесса углубления скважин на основе промысловых данных / А.В. Орлов, С.А. Орлов // Нефтяное хозяйство. – 1981. – № 11. – С. 14-21.

65. Орлов, А.В. Получение оптимальной проходки при оптимизации режимов работы долот / А.В. Орлов, В.И. Иноземцев // Нефтяное хозяйство. – 1984. – № 4. – С. 15-18.

66. Остроух, А.В. Интеллектуальные системы / А.В. Остроух. – Красноярск: Научно-инновационный центр, 2015. – 110 с.

67. Охтилев, М.Ю. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов / М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.

68. Певзнер, Л.Д. Теория систем управления: учебное пособие / Л.Д. Певзнер. – М.: МГГУ, 2002. – 472с.

69. Перетолчин, В.А. Вращательное шарошечное бурение взрывных скважин на карьерах / В.А. Перетолчин. – М.: Недра, 1983. – 175 с.

70. Петров, И.П. Принципы автоматической оптимизации процесса бурения глубоких скважин / И.П. Петров, Г.Н. Семенцов, Н.Б. Ситников // Элементы и системы автоматики в нефтяной и газовой промышленности: сб. статей. – Киев, 1974. – С. 126-139.

71. Пимонов, А.Г. 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.

72. Повышение эффективности эксплуатации буровой техники на горных предприятиях: монография / А.В. Гилёв, А.О. Шигин, В.Т. Чесноков, И.Р. Белозеров. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – 372 с.

73. Погарский, А.А. Автоматизация процесса бурения глубоких скважин / А.А. Погарский. – М.: Недра, 1972. – 216 с.

74. Подэрни, Р.Ю. Анализ конструкций и технологических возможностей современных станков вращательного бурения взрывных скважин на открытых работах / Р.Ю. Подэрни // Горная техника: машины и оборудование для открытых горных работ. – 2008. – С. 116-125.

75. Подэрни, Р.Ю. Горные машины и комплексы для открытых работ: учебное пособие / Р.Ю. Подэрни. – 4-е изд. – М.: МГГУ, 2001. – 332 с.

76. Подэрни, Р.Ю. Механизм подачи бурового станка / Р.Ю. Подэрни, М.Х. Мухамедов, Р.А. Шамшадинов [и др.]. А. с. СССР № 1318685, Бюл. № 23 от 23.06.1987.

77. Подэрни, Р.Ю. Механическое оборудование карьеров. Учебник для вузов / Р.Ю. Подэрни. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во «Майнинг Медиа Групп», 2011. – 640 с.

78. Подэрни, Р.Ю. Станки вращательного бурения взрывных скважин на открытых работах за рубежом / Р.Ю. Подэрни // Горное оборудование и электромеханика. – 2006. – № 12. – С. 20-24.

79. Протасов, Ю.И. Разрушение горных пород / Ю.И. Протасов. – 3-е изд. – М.: Изд-во МГГУ, 2002. — 453 с.

80. Пупков, К.А. Интеллектуальные системы / К.А. Пупков, В.Г. Коньков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 348 с.

81. Пучков, Л.А. Автоматизированные системы управления в горнодобывающей промышленности. Учебник для вузов / Л.А. Пучков, Н.И. Федунец, Д.К. Потресов. – М.: Недра, 1987. – 284 с.

82. Пьявченко, Т.А. Автоматизированные информационно-управляющие системы / Т.А. Пьявченко, В.И. Финаев. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2007. – 271 с.
83. Регулирование и управление режимами бурения взрывных скважин / Н.И. Терехов, И.С. Абрамов, П.Д. Гаврилов, П.Н. Кунинин. – М.: Недра, 1980. – 223 с.
84. Сащенко, Н.Н. Интеллектуальная адаптивная система передачи информации в распределенных автоматизированных системах управления: дис. ... канд. техн. наук. – Владимир: Институт инженерной физики РФ, 2006. – 166 с.
85. Серeda, Н.Г. Бурение нефтяных и газовых скважин / Н.Г. Серeda, Е.М. Соловьев. – М.: Недра, 1974. – 456 с.
86. Симкин, Б.А. Справочник по бурению на карьерах / Б.А. Симкин, Б.Н. Кутузов, В.Д. Буткин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 224 с.
87. Ситников, Н.Б. Исследование критериев оптимальности процесса вращательного бурения скважин / Н.Б. Ситников, И.А. Бердов, В.А. Савельев // Известия вузов. Горный журнал. – 1977. – № 5. – С. 131-135.
88. Ситников, Н.Б. Моделирование и оптимизация процесса бурения геологоразведочных скважин: дис. ... доктора техн. наук. – Екатеринбург: Уральская государственная горно-геологическая академия, 2000. – 350 с.
89. Ситников, Н.Б. Статическая самонастраивающаяся система регулирования процесса шарошечного бурения взрывных скважин: автореф. дис. канд. тех. наук. – Свердловск: Свердловский горный институт, 1971. – 26 с.
90. Сомкин, М.И. Некоторые вопросы измерения и контроля параметров режима шарошечного бурения / М.И. Сомкин, А.И. Глатоленков // В кн.: Совершенствование открытых разработок недр Казахстана. – Алма-Ата, АН Казахской ССР, 1970.
91. Спесивцев, А. Интеллектуальная АСУ печи Ванюкова / А. Спесивцев // Control Engineering. – 2013. – № 4 (46). – С. 87-91.
92. Ступина, 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.

93. Ступина, А.А. Программный комплекс для расчета и оптимизации режимных параметров шарошечного бурения / А.А. Ступина, А.А. Шигина, С.А. Непомнящий. – М.: Роспатент, 2017. – № гос. рег. 2017615058.

94. Терехов, Н.И. Оптимизация режимов бурения с применением дополнительного функционала качества / Н.И. Терехов, И.С. Аврамов, П.Д. Гаврилов. – Кемерово: КузПИ, 1973. – С. 224-228.

95. Техника, технология и опыт бурения скважин на карьерах / под ред. В.А. Перетолчина. – М.: Недра, 1993. – 286 с.

96. Тоискин, В.С. Интеллектуальные информационные системы: учебное пособие / В.С. Тоискин. Часть 1. – Ставрополь: Изд-во СГПИ, 2009. – 181 с.

97. Трубецкой, К.Н. Открытые горные работы: справочник / К.Н. Трубецкой [и др.]. – М.: Горное бюро, 1994. – 599 с.

98. Трубецкой, К.Н. Современные системы управления горно-транспортными комплексами / К.Н. Трубецкой, А.А. Кулешов, А.Ф. Клебанов, Д.Я. Владимиров. – Под ред. акад. РАН К.Н. Трубецкого. – СПб.: Наука, 2007. – 306 с.

99. Федоров, В.С. Проектирование режимов бурения / В.С. Федоров. – М.: Гостоптехиздат, 1958. – 215 с.

100. Федунец, Н.И. Системы отображения информации: учебное пособие / Н.И. Федунец. – М.: МГИ, 1985. – 39 с.

101. Фокс, Б. Справочник по бурению взрывных скважин. Бурение взрывных скважин на открытых горных выработках / Б. Фокс, К. Зинк, Д. Йонссон [и др.]. – Garland: Atlas Copco Drilling Solutions LLC, 2011. – 244 с.

102. Храменков, В.Г. Автоматизация и управление технологическими процессами бурения нефтегазовых скважин / В.Г. Храменков. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 416 с.

103. Цуприков, А.А. Анализ процесса разрушения породы долотом при бурении скважин / А.А. Цуприков // Научный журнал КубГАУ. – 2011. – № 10. – С. 1-10.

104. Цыганков, В.А. Адаптированная система управления процессом бурения с комбинированным управлением / В.А. Цыганков // Изв. ВУЗов. Приборостроение. – 1971. – Т. 14, №4. – С. 39-43.

105. Цыпкин, Я.З. Информационная теория идентификации / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука, 1995. – 336 с.

106. Чикуров, Н.Г. Моделирование технических систем. Учебное пособие / Н.Г. Чикуров. – Уфа: УГАТУ, 2009. – 357 с.

107. Чистяков, В.К. Оптимизация и автоматизация процессов разведочного бурения. Учебное пособие / В.К. Чистяков, И.Г. Шелковников. – Л.: ЛГИ, 1990. – 102 с.

108. Шалыто, А.А. Реализация алгоритмов логического управления программами на языке функциональных блоков / А.А. Шалыто // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2000. – № 4. – С. 45-50.

109. Шигин, А.О. Методика расчета усталостной прочности как основного фактора стойкости шарошечных долот / А.О. Шигин, А.В. Гилев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2012. – № 3. – С. 22-27.

110. Шигин, А.О. 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 (научно-технический журнал). – 2013. – № 4. – С. 325-333.

111. Шигин, А.О. Проектирование адаптивных рабочих органов буровых станков для сложноструктурных горных массивов: монография / А.О. Шигин. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – 156 с.

112. Шигин, А.О. Система моделирования режимных параметров процесса бурения / А.О. Шигин, А.А. Шигина, А.А. Ступина, С.А. Непомнящий. – М.: Роспатент, 2014. – № гос. рег. 2014612158.

113. Шигин, А.О. Станок шарошечного бурения / А.О. Шигин, А.В. Гилев, А.В. Ларин, В.П. Глазунов, А.А. Шигина // Патент 2578684 Рос. Федерация, МПК E21B7/02, E21B3/02. № 2014154491/03; заявл. 30.12.2014; опубл. 27.03.2016, Бюл. № 9. – 7 с.

114. Шигин, А.О. Устройство для бурения скважин / А.О. Шигин, А.В. Гилев, А.А. Шигина // Патент 2580118 РФ, МПК H02K3/00, E21B7/00, E21B4/04. № 2014154493 от 30.12.2014; опубл. 10.04.2016, Бюл. № 10. – 7 с.

115. 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).

116. 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).

117. Шигина, А.А. Математическое моделирование динамической системы / А.А. Шигина // Вопросы технических наук: новые подходы в решении актуальных проблем: сб. науч. тр. – Казань, 2014. – С. 54-58.

118. Шулаков, А.С. Автоматизированная система управления бурением скважин со сложной траекторией на основе прогнозирующих моделей: дис. ... канд. техн. наук. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2005. – 211 с.

119. Щагин, А. В. Основы автоматизации техпроцессов: учебное пособие / А.В. Щагин, В.И. Демкин, В.Ю. Кононов, А.Б. Кабанова. – М.: Высшее образование, 2009. – 163 с.

120. Эйгелес, Р.М. Расчет и оптимизация процессов бурения скважин / Р.М. Эйгелес, Р.В. Стрекалова. – М.: Недра, 1977. – 200с.
121. Aldred, W. Drilling Automation / W. Aldred, J. Bourque, M. Mannering, C. Chapman [et. al.] // Oilfield Review. – 2012. – Vol. 24, No 2. – P. 18-27.
122. Bieniawski, Z.T. Rock mass classification in rock engineering / Z.T. Bieniawski // In Exploration for rock engineering: Proceedings of the symp. 1. – Cape Town: Balkema, 1976. - P. 97-106.
123. Boccara, N. Modeling Complex Systems / N. Boccara. – 2nd Edition. – Chicago: Springer Science+Business Media, LLC, University of Illinois, 2010. – 489 p.
124. Bowler, A. Continuous high-frequency measurements of the drilling process provide new insights into drilling-system response and transitions between vibration modes / A. Bowler, R. Harmer, L. Logesparan, J. Sugiura [et. al.] // SPE Drilling and Completion. – 2016. – Vol. 31 (2), DOI: 0.2118/170713-PA.
125. Brett, J.F. The Perfect Well Ratio: Defining and Using the Theoretically Minimum Well Duration to Improve Drilling Performance / J.F. Brett // Conf. “American Association of Drilling Engineers”, 2006.
126. Chapman, C. Automated Closed-Loop Drilling with ROP Optimization Algorithm Significantly Reduces Drilling Time and Improves Downhole Tool Reliability / C.D. Chapman, J.L. Sanchez, R. Perez [et al.] // SPE-151736-MS, IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition. – San Diego, California, USA, 6-8 March, 2012.
127. Chu, D. Theories of Complexity: Common Denominators of Complex Systems / D. Chu, R. Strand, R. Fjelland // Complexity. – 2003. - Vol. 8, No. 3. – P. 19-30.
128. Hartley, J.S. Drilling. Tools and programme management / J.S. Hartley. – Rotterdam: CRC Press, 1994. – 192 p.
129. Hiroki, S. Introduction to the modeling and analysis of complex systems / S. Hiroki. – New York: Open SUNY Textbooks, Milne Library, 2015. – 478 p.
130. Hoek, E. Strength of rock and rock masses / E. Hoek // ISRM News J. – 1994. – Vol. 2, No. 2. – P. 4-16.

131. Hossain, M.E. Fundamentals of Sustainable Drilling Engineering / M.E. Hossain // Scrivener Publishing 100 Cummings Center, Suite 541J. – Beverly: Scrivener Publishing LLC, 2015. - 737 p.

132. Isidori, A. Robust Motion Control: an Internal-Model Approach / A. Isidori, L. Marconi, A. Serrani // Springer Verlag, 2003. – 227 p.

133. Iversen, F. Drilling Automation: Potential for Human Error / F. Iversen, L.J. Gressgrd, J. Thorogood, M.K. Balov, V. Hepso // Society of Petroleum Engineers. – 2013, DOI: 10.2118/151474-PA.

134. Jones, S. A new steady weight-on-bit tool reduces torque and RPM variations and enhances drilling efficiency and bit/BHA life / S. Jones, C. Feddema, J. Sugiura // Proceedings of IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, 1-3 March – Fort Worth, Texas, USA, 2016, DOI: 10.2118/178818-MS.

135. Khalil, H.K. Nonlinear Systems / H.K. Khalil. – New Jersey: Prentice Hall, 2002. – 750 p.

136. Khan, G.N. Discrete element modeling of rock failure dynamics / G.N. Khan // Journal of Mining Science. – 2012. – Vol. 48, No. 1. – P. 96-102.

137. Maleki B. Optimization of the Cost Function in the Drilling of Oil Well Network by Balas Algorithm / B. Maleki, K. Ahmadi, A. Jafari // Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology. – 2014. – Vol. 3, No. 3. – P. 26-38.

138. Marinos, P. Variability of the engineering properties of rock masses quantified by the geological strength index: the case of ophiolites with special emphasis on tunneling / P. Marinos, E. Hoek, V. Marinos // Bull. Eng. Geol. Env. – 2006. – Vol. 65, No. 2. - P. 129-142.

139. Narendra, K.S. Adaptive control using multiple models [J] / K.S. Narendra, J. Balakrishnan // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1997. - Vol. 42, No. 2. - P. 171-187.

140. Nicolis, G. Foundations of Complex Systems / G. Nicolis, C. Nicolis. – European Review. – 2009. – Vol. 17, No. 2. – P. 237-248.

141. Shi, X. Confined compressive strength model of rock for drilling optimization / X. Shi, Y. Meng, G. Li, J. Li, Z. Tao, S. Wei // *Petroleum*. – 2015. – Vol. 1 (1). – P. 40-45.

142. Shigin, A.O. 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, No. 1. – P. 95-104.

143. Stupina, 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, No. 8s. – P. 302-306.

144. Stupina, 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. – 2015. – Vol. 94, No. 1. – P. 1-6, DOI: 10.1088/1757-899X/94/1/012001.

145. Sveinbjornsson, B.M. Drilling performance and productivity of geothermal wells / B.M. Sveinbjornsson, S. Thorhallsson // *47th US Rock Mechanics Geomechanics Symposium held in San Francisco*. - 2013. – [Electronic resource] Access mode URL: <http://iea-gia.org/wp-content/uploads/2013/12/Drilling-performance-and-productivity-of-geothermal-wells-ARMA2013Paper386.pdf>.

146. Thorogood, J. Drilling Automation: Technologies, Terminology, and Parallels with Other Industries / J. Thorogood, W.D. Aldred, F. Florence, F. Iversen // *Society of Petroleum Engineers*. – 2010. – Vol. 25, No. 4, DOI: 10.2118/119884-PA.

147. Vespignani, A. Modelling dynamical processes in complex socio-technical Systems / A. Vespignani // *Nature Physics*. – 2012. – Vol. 8. – P. 32-39.

148. Wang, Y. Application of Real-Time Field Data to Optimize Drilling Hydraulics Using Neural Network Approach / Y. Wang, S. Salehi // *Journal of Energy Resources Technology-transactions of the ASME*. – 2015, DOI: 10.1115/1.4030847.

149. Zaitsev, K.S. Using group technology to plan data processing in computer-aided control system / K.S. Zaitsev // *Automatic and Remote Control*. – 2003. – Vol. 9, No. 64. – P. 1507-1512.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акты об использовании результатов диссертационного исследования

ООО
«Краспромавтоматика»
660041 г. Красноярск,
ул. Ак.Киренского, 89,
а/я 12242
Тел/факс: (391) 256-03-01
E-mail:kpa_kras@mail.ru

«Утверждаю»
Генеральный директор
ООО «Краспромавтоматика»
В.Ф. Машуков
05.09.2016 г.



АКТ

внедрения результатов диссертационного исследования

Шигиной Анны Александровны

Результаты диссертационного исследования ассистента кафедры «Экономика и информационные технологии менеджмента» ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» Шигиной А.А.: адаптивная модель и алгоритм оптимального управления динамическим процессом применены при создании интеллектуальной автоматизированной системы управления процессом шарошечного бурения взрывных скважин предприятием ООО «Краспромавтоматика».

Разработанные модель и алгоритмы управления используются для оптимизации режимных параметров в условиях высокой информационной неопределенности, вызванной случайным изменением свойств горных пород различной крепости в процессе бурения, что позволяет повысить эффективность данного процесса за счет своевременной корректировки значений режимных параметров (осевого усилия и частоты вращения) в режиме реального времени.

Технический директор КБ



В.Н. Путинцев



общество с ограниченной ответственностью



ТЯЖМАШСЕРВИС

Сервисно - сбытовая фирма горного оборудования

ИНН 2466126154, КПП 246601001, ОГРН 1052466010508

«Утверждаю»
 Директор ООО «Тяжмашсервис»
 Сергеев Валерий Юрьевич
 11.10.2016г.



АКТ

внедрения результатов диссертационного исследования
 Шигиной Анны Александровны

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационного исследования ассистента кафедры экономики и информационных технологий менеджмента Сибирского федерального университета Шигиной Анны Александровны в области создания систем управления процессом бурения породных массивов внедрены и успешно используются на предприятии ООО «Тяжмашсервис».

В частности, адаптивная модель и алгоритм оптимального управления технологическим процессом используются для решения задачи оптимизации режимных параметров в условиях непрогнозируемого изменения свойств породы и автоматизации процесса шарошечного бурения с применением интеллектуальных технологий.

Гл. инженер ООО «Тяжмашсервис»

Котов Александр Евгеньевич



Юридический адрес:
 ООО «Тяжмашсервис»
 г. Красноярск
 ул. Ленина, д. 21,
 оф. 12
 660049

Почтовый адрес:
 ООО «Тяжмашсервис»
 ул. Щорса, д. 41
 г. Красноярск
 660094

Телефон:
 (391) 235-83-50
 (391) 235-83-52
 (391) 260-69-90

Факс:
 (391) 235-83-51
 (391) 260-69-90

Электронная почта:
 office@tmsmining.ru
 www.tmsmining.ru

**Общество с ограниченной ответственностью
«Управление по буровзрывным работам»**

Российская Федерация, 655162, Республика Хакасия, г. Черногорск, ул. Советская, д. 40
Адрес офиса: 655650, Республика Хакасия, с. Белый Яр, Алтайский район, ОАО «Разрез
Изыхский» для ООО «Управление по буровзрывным работам»

E-mail: TikhomirovaTD@suek.ru

ИНН/КПП 1903018716/190301001 ОКПО 87232578

АКТ

проведения замеров режимных параметров буровых станов DML (фирма Atlas
сорсо) в условиях Восточно-Бейского разреза компании СУЭК

Бурение осуществлялось станками шарошечного бурения DML № 9067 и DML № 9591 компании ООО «Управление по буровзрывным работам». Исследование производили: канд. тех наук, кафедры «Горные машины и комплексы» Сибирского Федерального Университета А.О. Шигин; аспирант кафедры «Горные машины и комплексы» Сибирского Федерального Университета А.А. Волков; аспирант кафедры «Экономика и информационные технологии менеджмента» Сибирского Федерального Университета А.А. Шигина При бурении взрывных скважин под углом 75° при отработке породного массива крепостью 5 с пропластками крепостью 6-7 по шкале Протодеяконова получены следующие параметры.

Таблица 1. - Основные режимные параметры бурения

№ станка	№ замера	Среднее давление в гидроцилиндре подачи, psi	Среднее давление в гидромоторе вращателя, psi	Частота вращения бурового става, об/мин	Скорость бурения, м/мин	Время забуривания одной штанги, с	Давление компрессора, psi
	1	2000	1100	85	1,136	475	54
	2	2000	1160	95	1,2	450	54
	3	2000	1225	105	1,317	410	54
	4	2000	1290	110	1,42	380	54
	5	2000	1350	120	1,54	350	54
	1	2000	1100	85	1,125	480	54
	2	2000	1160	95	1,2	450	54
	3	2000	1225	105	1,28	420	54
	4	2000	1290	110	1,4	385	54
	5	2000	1350	120	1,5	360	54

При исследовании режимов в процессе прохождения долотом пропластков наблюдалась колебание давления в гидромоторе вращателя от 900 до 1300 psi при частоте вращения 85 об/мин и колебания в диапазоне от 1300 до 1400 psi при частоте вращения 120 об/мин. Давление в гидроцилиндре механизма подачи рабочего органа изменялось от 1950 до 2050 psi около установленного значения при частоте вращения 85 об/мин. По мере

увеличения частоты вращения колебание давления уменьшалось и при достижении частоты вращения 120 об/мин стало незначительным и не отражалось на приборе.

Таблица 2. – Изменение режимных параметров бурового станка, вызванное прохождением долота через пропластки породы с более высокой крепостью, трещины и нарушения структуры массива.

№ станка	№ замера	Давление в гидроцилиндре подачи, psi	Среднее давление в гидромоторе вращателя, psi	Частота вращения бурового става, об/мин	Скорость бурения, м/мин	Значение перепада давления в гидромоторе вращателя
	1	2000	1100	85	1,136	400
	2	2000	1160	95	1,2	325
	3	2000	1225	105	1,317	250
	4	2000	1290	110	1,42	175
	5	2000	1350	120	1,54	100
	1	2000	1100	85	1,125	400
	2	2000	1160	95	1,2	325
	3	2000	1225	105	1,28	250
	4	2000	1290	110	1,4	175
	5	2000	1350	120	1,5	100

Начальник участка буровых работ

А.Е. Голубев

Канд. тех наук, кафедры
«Горные машины и комплексы»
Сибирского Федерального Университета

А.О. Шигин





ИНН/КПП 1903006622/190301001 ОКПО 31904853
 655162 Республика Хакасия г.Черногорск, ул. М. Горького, 11а
 код 39031, тел 6-48-97, (факс) 6-47-74, e-mail: khakasvsriv@yandex.ru

АКТ

проведения замеров режимных параметров буровых станков СБШ-270 и СБШ-250 в условиях Черногорского разреза компании СУЭК

Бурение осуществлялось станками шарошечного бурения СБШ-270 № 8 и СБШ-250 № 1029 компании «Хакасвзрывпром». Исследование производили: канд. тех наук, кафедры «Горные машины и комплексы» Сибирского Федерального Университета А.О. Шигин; аспирант кафедры «Горные машины и комплексы» Сибирского Федерального Университета А.А. Волков; аспирант кафедры «Экономика и информационные технологии менеджмента» Сибирского Федерального Университета А.А. Шигина. При бурении взрывных скважин под углом 15° в горном массиве крепостью 5 – 8 по шкале Протоdjяконова, состоящем из слоев песчаника, алевролита, аргиллита, угля разной мощности получены следующие параметры.

Таблица 1. - Основные режимные параметры бурения

модель станка	№ замера	Среднее значение усилия подачи рабочего органа, кН	Частота вращения бурового става, об/мин	Скорость бурения, м/мин	Длина секции бурового става, м	Время забуривания одной секции, с	Давление компрессора, МПа
СБШ-270	1	150	80	1,43	11,8	495	0,4
	2	150	90	1,61	11,8	441	0,4
	3	150	100	1,82	11,8	390	0,4
	4	150	110	2,04	11,8	346	0,4
	5	150	120	2,31	11,8	306	0,4
СБШ-250	1	150	80	1,43	8	334	0,4
	2	150	90	1,65	8	291	0,4
	3	150	100	1,91	8	251	0,4
	4	150	110	2,24	8	214	0,4
	5	150	120	2,66	8	180	0,4

При исследовании режимов в процессе прохождения долотом границ между породами с разными крепостями и трещин наблюдалось колебание усилия подачи

рабочего органа в различном диапазоне в зависимости от частоты вращения бурового става. По мере увеличения частоты вращения колебание усилия уменьшалось и при достижении частоты вращения 120 об/мин стало наименьшим.

Таблица 2. – Изменение режимных параметров бурового станка, вызванное прохождением долота через границы с породой более высокой крепости, трещины и нарушения структуры массива

Модель станка	№ замера	Среднее значение усилия подачи рабочего органа, кН	Частота вращения бурового става, об/мин	Скорость бурения, м/мин	значение перепада усилия подачи рабочего органа, кН
СБШ-270	1	150	80	1,43	20
	2	150	90	1,61	17,5
	3	150	100	1,82	15
	4	150	110	2,04	12,5
	5	150	120	2,31	10
СБШ-250	1	150	80	1,43	15
	2	150	90	1,65	13,75
	3	150	100	1,91	12,5
	4	150	110	2,24	11,25
	5	150	120	2,66	10

Результаты проведения замеров режимных параметров буровых станков шарошечного бурения СБШ-270 и СБШ-250 рекомендованы сотрудникам компании «Хакасвзрывпром» для использования с целью повышения стойкости бурового инструмента и эффективности процесса бурения при отработке месторождения Черногорского разреза.

Начальник
буровзрывного участка

В.А. Шальмов

Главный инженер

А.Г. Марков





УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

М.В. Румянцев

» марта 2014 г.

СПРАВКА
о внедрении в учебный процесс программы для ЭВМ
«Система моделирования режимных параметров процесса бурения»

1. Разработана программа для ЭВМ «Система моделирования режимных параметров процесса бурения» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014612158 от 20 февраля 2014г.).

Авторы:

Шигин Андрей Олегович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Горные машины и комплексы» ИГДГТ СФУ

Шигина Анна Александровна, аспирант, ассистент кафедры «Экономика и информационные технологии менеджмента» ИУБПЭ СФУ

Ступина Алена Александровна, д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой «Экономика и информационные технологии менеджмента» ИУБПЭ СФУ

Непомнящий Сергей Александрович, программист, ООО «Медведь-Маркетинг»

2. Целью программы является моделирование основных режимных параметров технической системы «Буровой станок – шарошечное долото – горная порода», их расчет в зависимости от различных свойств объекта воздействия (горной породы), расчет ресурса и производительности бурового станка в целях реализации определённого алгоритма и получения определенного прогнозируемого результата функционирования технической системы.

3. Программа применяется в учебном процессе кафедры «Экономика и информационные технологии менеджмента» при подготовке студентов по ООП 230700.68 «Прикладная информатика», программа магистерской подготовки «Реинжиниринг бизнес-процессов» в лекционных занятиях, курсовом проектировании по дисциплине «Моделирование управляемых процессов».

Общий объем аудиторных занятий составляет 144 часа, самостоятельной работы – 76 часов.

«28» марта 2014 г.

Директор ИУБПЭ

З.А. Васильева

Зав. кафедрой ЭИТМ

А.А. Ступина



Проректор по учебной работе
М.В. Румянцев

2014 г.

СПРАВКА
о внедрении в учебный процесс программы для ЭВМ
«Система моделирования режимных параметров процесса бурения»

1. Разработана программа для ЭВМ «Система моделирования режимных параметров процесса бурения» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014612158 от 20 февраля 2014г.).

Авторы: Шигин Андрей Олегович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Горные машины и комплексы» ИГДГГ СФУ
Шигина Анна Александровна, аспирант, ассистент кафедры «Экономика и информационные технологии менеджмента» ИУБПЭ СФУ
Ступина Алена Александровна, д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой «Экономика и информационные технологии менеджмента» ИУБПЭ СФУ
Непомнящий Сергей Александрович, программист, ООО «Медведь-Маркетинг»

2. Целью программы является моделирование основных режимных параметров бурового станка, их расчет в зависимости от различных свойств горной породы; расчет ресурса бурового инструмента; расчет производительности бурового станка.

3. Программа применяется в учебном процессе кафедры «Горные машины и комплексы» при подготовке студентов по ООП 130400 «Горное дело», специализация «Горные машины и оборудование» в лекционных занятиях, курсовом проектировании по дисциплине «Механическое оборудование карьеров» и выполнении выпускной квалификационной работы.

Общий объем аудиторных занятий составляет 6 часов, самостоятельной работы – 6 часов.

«18» марта 2014 г.

Директор ИГДГГ

В.А. Макаров

Зав. кафедрой ГМик

А.В. Гилев



ООО «Центр содействия развитию научных исследований»
 (ООО «ЦСРНИ»)
 ИНН/ КПП 5404455429/540401001
 630041 г. Новосибирск,
 1-й Экскаваторный переулок, д.23
 Тел. 8-960-796-56-02
 e-mail: admin@csrni.ru
 http://www.csrni.ru

24.02.2015 № 24.02-2

На № _____ от _____

Акт о внедрении результатов диссертационного исследования и их апробации

Настоящим актом подтверждается, что положения и результаты диссертационного исследования Шигиной Анны Александровны внедрены в научно-методическую и проектную деятельность ООО «ЦСРНИ».

Апробация результатов диссертационного исследования осуществлялась в форме выступления на VI Международной научно-практической конференции «Современные научные исследования: методология, теория, практика» (Челябинск, 23 февраля 2015 г.) с докладом на тему: «Адаптивный алгоритм оптимального управления технологическим процессом в условиях неопределенности».

Директор ООО «Центр содействия
 развитию научных исследований»



Омельченко А.В.

24.02.2015