На правах рукописи



Васюта Алексей Дмитриевич

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ КОМПЛЕКСЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА

Специальность 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Хабаровск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Хабаровском Федеральном исследовательском центре Дальневосточного отделения Российской академии наук (ХФИЦ ДВО РАН)

Научный руководитель:	**Серый Руслан Сергеевич,** кандидат технических наук, заведующий лабораторией разработки россыпных месторождений Института горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук – обособленного подразделения Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук
Официальные оппоненты:	**Матвеев Андрей Иннокентьевич**, доктор технических наук, заведующий лабораторией Института горного дела Севера им. Н. В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»; **Рочев Виктор Федорович,** кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой горного дела Технического института (филиала) ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова» в г. Нерюнгри.
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Восточный государственный университет» (ФГБОУ ВО «СВГУ»).

Защита диссертации состоится 16 февраля 2027 г. в 13^{00} на заседании диссертационного совета 24.1.478.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, по адресу: 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51, конференц-зал. Тел./факс: (4212) 32-79-27, e-mail: adm@khfrc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, по адресу 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51 и на сайте www.khfrc.ru

Автореферат разослан «_____» _____ 20____ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук С.И. Корнеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современные условия разработки россыпных месторождений золота характеризуются нарастающими требованиями к эффективности и устойчивости производственных процессов. В условиях высокой конкуренции и роста затрат на энергоресурсы и эксплуатацию техники особую значимость приобретает оптимизация процессов переработки песков – одного из ключевых этапов технологической цепочки россыпной золотодобычи, непосредственно влияющего на технико-экономические показатели отработки месторождений.

Россыпные месторождения имеют ряд особенностей, таких как низкое содержание и неравномерное распределение полезного компонента, высокая степень неоднородности гранулометрического и минерального состава, сезонный характер их отработки и применение цикличных технологий, нестабильность водоснабжения, климатических условий и др. Эти факторы затрудняют обеспечение равномерной подачи сырья, поддержание оптимальных режимов обогащения и стабильное качество получаемых полезных ископаемых и концентратов. В результате возникают частые отклонения от проектных параметров, увеличивается расход электроэнергии и технологической воды, повышается износ оборудования и снижается эффективность обогащения [2, 4].

Традиционные подходы к управлению технологическим процессом, основанные на ручной корректировке параметров и визуальном контроле, оказываются недостаточными в условиях постоянно меняющихся параметров перерабатываемых песков. Современное развитие технологий автоматизации и цифрового мониторинга позволяет внедрять адаптивные системы, способные самостоятельно приспосабливаться к текущим условиям отработки месторождения, предсказывать отклонения и автономно управлять процессами в режиме реального времени. Однако для успешного внедрения таких систем в условиях отработки россыпного месторождения необходимо учитывать специфику самих процессов, характер движения пульпы, колебания плотности, расхода и состава сырья. Это требует научного обоснования параметров системы автоматизированного регулирования расхода технологической воды и режимов работы оборудования с учётом конкретных горно-геологических и технологических условий эксплуатации промывочного комплекса.

Для россыпных объектов, использующих дизельные электростанции, разработка средств автоматизации технологических процессов имеет важное значение, поскольку позволяет уменьшить энергопотребление и эксплуатационные затраты на переработку золотосодержащих песков. В связи с этим обоснование параметров автоматизированного регулирования расхода технологической воды по текущей загрузке промывочного комплекса является актуальной научно-технической задачей.

Цель диссертационной работы заключается в повышении эффективности процесса промывки золотосодержащих песков при разработке россыпных месторождений золота на основе автоматизированного регулирования расхода технологической воды с учётом текущей загрузки промывочного комплекса.

Идея диссертационной работы заключается в определении текущей производительности промывочного комплекса по току нагрузки привода скруббер-бутары и последующем автоматизированном регулировании расхода технологической воды в зависимости от установленной производительности.

Работа основана на результатах исследований, выполненных в 2022-2025 годах при непосредственном участии автора, в том числе по плановой теме НИР Института горного дела ДВО РАН: «Развитие научных основ эффективных и экологически безопасных инновационных геотехнологий освоения полезных ископаемых Дальнего Востока России» (ГР № 122042900005-5).

Для достижения поставленной цели в работе поставлены следующие **задачи**:

1. Проанализировать технологические факторы, определяющие эффективность промывки золотосодержащих песков при неравномерной подаче исходного материала;

2. Установить зависимости между производительностью по пескам, расходом технологической воды и показателями эффективности процесса промывки, необходимыми для формирования алгоритма автоматизированного регулирования;

3. Разработать алгоритм автоматизированного регулирования расхода технологической воды с учётом текущей загрузки промывочного комплекса;

4. Провести опытно-промышленную апробацию разработанных технических решений в производственных условиях;

5. Оценить влияние автоматизированного регулирования на устойчивость и эффективность режима промывки, энергозатраты и производительность промывочного комплекса.

Методы исследований. Использован комплекс методов, включающий анализ и обобщение научно-технических источников, натурные наблюдения и опытно-промышленные испытания на действующем промывочном комплексе, статистическую обработку экспериментальных данных, установление зависимостей между параметрами загрузки оборудования, производительностью по пескам и расходом технологической воды, разработку алгоритма автоматизированного регулирования, а также технико-экономическую оценку эффективности предложенных решений.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Использование значений токовых нагрузок электропривода скруббер-бутары является основой алгоритма расчета производительности прибора по пескам в системе автоматического регулирования расхода технологической воды.

2. Автоматизированное регулирование расхода технологической воды с учётом загрузки скруббер-бутары песками обеспечивает снижение колебаний соотношения Т:Ж при изменении фактической производительности, что приводит к снижению потребления технологической воды и увеличению извлечения мелкого и тонкого золота при сохранении требуемой производительности по пескам.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов обеспечиваются применением комплекса методов научного исследования, работоспособность алгоритмов работы электрооборудования и внедренных технических решений подтверждена результатами опытно-промышленной эксплуатации оборудования в реальных условиях действующего горнодобывающего предприятия.

Научная новизна выполненных исследований:

– установлена зависимость между электрическими параметрами электроприводов промывочного оборудования и текущей производительностью промывочного комплекса по пескам, что позволяет использовать указанные параметры для оперативной оценки загрузки промывочного комплекса;

– обоснован принцип автоматизированного регулирования расхода технологической воды в зависимости от текущей загрузки промывочного комплекса, обеспечивающий поддержание оптимального режима обогащения на шлюзах при неравномерной подаче песков;

– установлено снижение потребляемой мощности насосного оборудования при автоматизированном регулировании расхода технологической воды в зависимости от текущей загрузки промывочного комплекса при сохранении требуемой производительности по пескам;

– обоснованы параметры частотного регулирования насосной установки в диапазоне 35-50 Гц, обеспечивающие изменение расхода технологической воды в соответствии с текущей загрузкой промывочного комплекса.

Личный вклад автора заключается в:

– постановке цели и задач исследования, выборе объекта исследования и разработке программы экспериментальных работ на промывочном комплексе, эксплуатируемом на действующем горнодобывающем предприятии;

– организации и проведении натурных исследований технологических и энергетических параметров, инструментальной регистрации сигналов системы управления, формировании и статистической обработке массива полученных исходных данных;

– разработке методики расчёта расхода технологической воды на основе выходной частоты преобразователя частоты насосной установки, обработке полученных экспериментальных данных и построении регрессионных моделей, описывающих зависимости параметров процесса промывки;

– разработке алгоритмов адаптивного регулирования расхода технологической воды по индикатору загрузки минеральной массы в промывочный прибор, а также структуры автоматизированной системы управления;

– участии в реализации и внедрении автоматизированной системы управления на разрабатываемом россыпном месторождении золота, проведении её опытно-промышленной апробации, анализе результатов внедрения и выполнении технико-экономической оценки эффективности разработанной системы.

Практическая ценность работы заключается в разработке и практическом применении предлагаемых технических решений и алгоритмов работы автоматизированного управления насосными установками промывочного комплекса при отработке россыпных месторождений золота Хабаровского края, обеспечивающих значительное снижение эксплуатационных затрат и устойчивость работы обогатительного оборудования, в том числе при автономном энергоснабжении от дизельных электростанций.

Реализация результатов работы. Экспериментальная проверка разработанной системы автоматизации выполнена на промывочном приборе ПБШ-100 с регулируемой подачей технологической воды. Выполнена опытно-промышленная апробация разработанной автоматизированной системы, которая подтвердила её работоспособность и эффективность, обеспечив повышение устойчивости технологического режима, снижение вероятности перегрузки оборудования и улучшение условий промывки золотосодержащих песков при изменении свойств исходного материала. Полученные результаты свидетельствуют о практической применимости разработанной системы при модернизации действующих и создании новых промывочных комплексов, особенно в условиях удалённого расположения объектов и высокой доли эксплуатационных затрат.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и региональных научных конференциях, конкурсах молодых ученых и научных школах, в том числе: XXV Краевом конкурсе молодых ученых и аспирантов (г. Хабаровск, 2023 г.); XVI Международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (г. Москва, 2023 г.); XVII Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (г. Екатеринбург, 2023 г.); IX Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых «Проблемы комплексного освоения георесурсов» (г. Хабаровск, 2023 г.); XVIII Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (г. Екатеринбург, 2024 г.); XXVI Краевом конкурсе молодых ученых (г. Хабаровск, 2024 г.); Российско-Китайской научной конференции «Проблемы комплексного освоения георесурсов» (г. Харбин, Китай, 2025 г.).

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования отражены в 5 опубликованных работах, в том числе в 2 работах в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 3 работы опубликованы в научных изданиях, индексируемых в базе Scopus, 1 работа в материалах научной конференции.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (120 источников), приложения (1), 15 иллюстраций, 15 таблиц. Общий объем – 108 страниц.

Автор выражает искреннюю признательность своему научному руководителю, к.т.н. Серому Р.С. за научное руководство, постоянную поддержку и ценные рекомендации на всех

этапах выполнения диссертационной работы, к.т.н. Алексееву В.С. за консультации по отдельным вопросам исследования и конструктивные замечания при выполнении работы. Автор считает своим долгом выразить благодарность чл.-корр. РАН Шулюпину А.Н. за внимание к работе, ценные рекомендации и помощь в её реализации, коллегам из ИГД ДВО РАН за помощь, поддержку и ценные советы при выполнении исследований, а также руководству и специалистам артели старателей «Восток» за содействие в организации и проведении опытно-промышленных исследований, предоставление производственной информации и внедрение результатов диссертационной работы в производственный процесс.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Технологические процессы эксплуатации россыпных месторождений характеризуются высокой изменчивостью свойств добываемого минерального сырья и условий промывки золотосодержащих песков, обусловленной неоднородностью гранулометрического состава, изменением содержания глинистых частиц, влажности и других характеристик исходного материала. Эти факторы приводят к нарушению режима промывки песков, увеличению расхода технологической воды и росту потерь драгоценного металла.

В условиях традиционного управления промывочным комплексом параметры его работы, как правило, корректируются вручную или с использованием простых механических устройств. Такой подход не обеспечивает необходимой оперативности реагирования на изменения свойств промываемых песков и не позволяет поддерживать требуемые технологические режимы. Практика разработки россыпных месторождений показывает, что нестабильность подачи на промывку песков и расхода технологической воды является одной из главных причин снижения эффективности промывки и увеличения потерь добываемого золота [2, 4].

Следовательно, изменчивость свойств золотосодержащих песков и недостаточная адаптивность традиционных способов регулирования подачи песков и технологической воды определяют необходимость разработки автоматизированной системы управления процессом промывки.

Экспериментальные исследования выполнены в производственных условиях на действующем промывочном комплексе ПБШ-100 (рисунок 1) артели старателей «Восток» при разработке россыпного месторождения золота ручья Хребтовый (Хабаровский край). Пески месторождения представлены гравийно-галечными грунтами с глинисто-песчаным и песчано-глинистым заполнителем; по содержанию песка и глинистого материала они относятся к среднепромывистым.

Установленные геолого-технологические особенности объекта исследования обусловили необходимость регистрации параметров, характеризующих текущую загрузку промывочного комплекса и режим подачи технологической воды. Регистрация параметров осуществлялась в режиме реального времени с дискретностью 5 секунд с последующей обработкой данных в электронных таблицах. Первичные данные регистрировались штатными средствами промышленной системы управления промывочным комплексом. Значения тока нагрузки I, управляющей частоты f и активной мощности P считывались из шкафа управления (ПЛК/преобразователи частоты) и архивировались для последующей обработки. Расход технологической воды Q_w определялся расчётным способом по текущей частоте f на основе законов подобия центробежных насосов при частотном регулировании.

В ходе исследований регистрировались следующие параметры: ток нагрузки промывочного прибора I (А), производительность промывочного прибора по пескам Q_s (м³/ч), управляющая частота насосных установок f(Гц), активная электрическая мощность насосов P(кВт), а также расход технологической воды Q_w (м³/ч) для насосных установок номинальной мощностью 55 и 110 кВт.



Рисунок 1 – Промывочный прибор ПБШ-100 на месторождении руч. Хребтовый, Хабаровский край

Подача песков на промывочный прибор ПБШ-100 осуществлялась экскаватором в приёмный бункер прибора. Производительность по пескам Q_s определялась по объёму поданного материала за заданный интервал времени по данным оперативного учёта подачи. Объём подачи определялся по вместимости ковша экскаватора $V_k = 1{,}6$ м^3 и числу рабочих циклов загрузки за интервал наблюдения с учётом коэффициента заполнения ковша.

Для обеспечения воспроизводимости результатов в таблице 1 приведён обобщённый паспорт регистрируемых параметров, используемых при статистической обработке и формировании расчётной основы алгоритма управления.

Всего в исходном массиве содержалось 33118 записей. После фильтрации для статистической обработки использовано 27160 записей. Для выявления закономерностей применялась линейная регрессия методом наименьших квадратов и оценка качества аппроксимации по коэффициенту детерминации R^2.

Таблица 1 – Паспорт регистрируемых параметров и источники данных

Параметр	**Обозначение**	**Ед. изм.**	**Источник/способ получения**
Ток нагрузки промывочного прибора	I	А	ПЛК/ПЧ электропривода промывочного прибора (канал измерения тока)

Продолжение таблицы 1

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Источник/способ получения
Производительность по пескам	Q_s	м³/ч	Производственный замер (объём/время), оперативный учёт подачи
Выходная частота преобразователя частоты насосной установки	f	Гц	Преобразователь частоты насосной установки
Мощность насоса	P	кВт	ПЧ/анализатор мощности/счётчик (мгновенная активная мощность)
Расход технологической воды	Q_w	м³/ч	Расчёт по законам подобия центробежных насосов по текущей частоте ПЧ и базовому режиму; диапазон $f = 35 - 50$ Гц

I научное положение:

Использование значений токовых нагрузок электропривода скруббер-бутары является основой алгоритма расчета производительности прибора по пескам в системе автоматического регулирования расхода технологической воды.

По результатам обработки экспериментальных данных установлена линейная связь между током электропривода I и производительностью по пескам Q_s. Полученная зависимость позволяет использовать ток электропривода как оперативный показатель текущей загрузки промывочного прибора.

Уравнение регрессии имеет вид:

$$Q_s = 3{,}306 \times I - 162{,}469. \quad (1)$$

Коэффициент детерминации модели составляет $R^2 = 0{,}956$

Средняя абсолютная ошибка модели составляет 4,51 м³/ч, RMSE – 7,80 м³/ч.

Высокое значение R^2 объясняется тем, что ток является интегральной характеристикой момента сопротивления на приводе промывочного узла, который в рассматриваемых режимах в основном определяется текущей загрузкой песками и сопротивлением перемешиванию/перемещению пульпы. Указанная зависимость применима в пределах диапазонов режимов, охваченных экспериментом, и может использоваться для оперативной оценки подачи песков без введения дополнительных датчиков расхода твёрдой фазы [1].

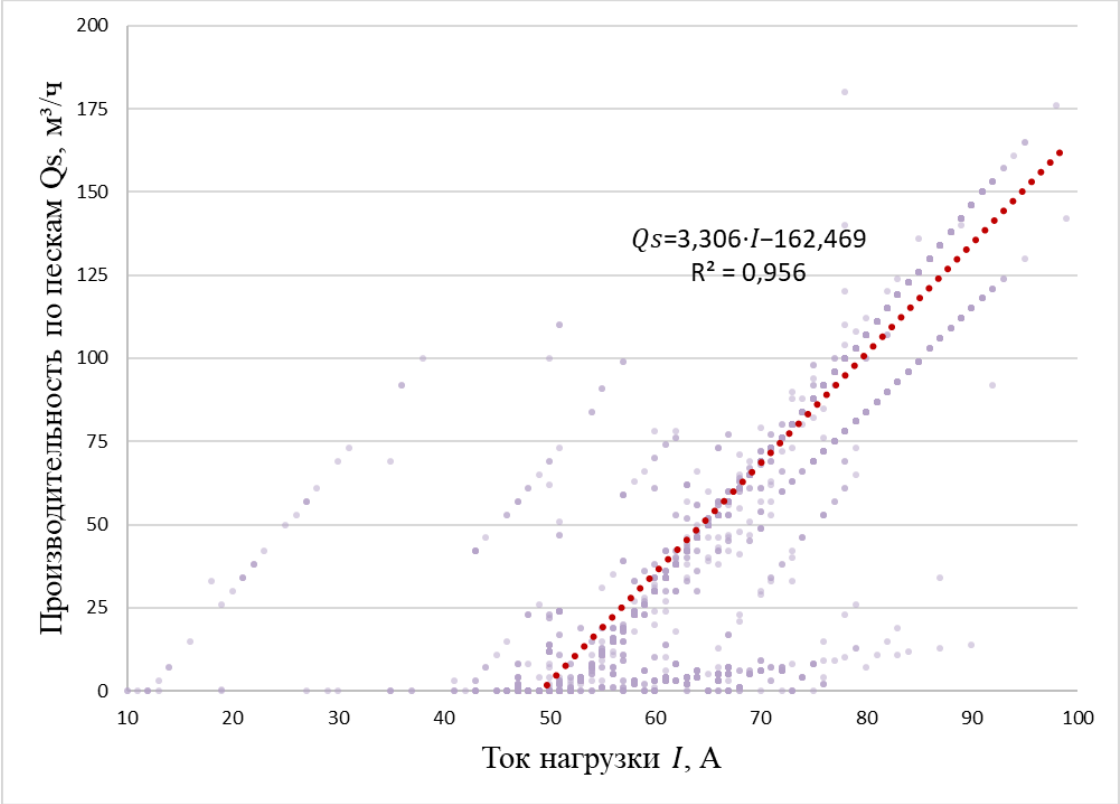


Рисунок 2 – Зависимость производительности по пескам Q_s от тока нагрузки I

Линейная модель выбрана как наиболее простая и практически реализуемая для промышленного алгоритма регулирования. Анализ экспериментальных данных показал, что использование более сложных моделей не обеспечивает существенного повышения точности расчёта производительности.

II научное положение:

Автоматизированное регулирование расхода технологической воды с учётом загрузки скруббер-бутары песками обеспечивает снижение колебаний соотношения Т:Ж при изменении фактической производительности, что приводит к снижению потребления технологической воды и увеличению извлечения мелкого и тонкого золота при сохранении требуемой производительности по пескам.

Следующим этапом выполнено установление зависимости требуемого расхода технологической воды Q_w от производительности по пескам Q_s. Под требуемым расходом Q_w в рамках настоящего исследования понимается расход, фактически обеспечивавший устойчивый технологический режим в наблюдаемых производственных условиях.

Физический смысл зависимостей состоит в том, что при увеличении подачи песков требуется увеличение расхода воды для поддержания требуемой концентрации твёрдой фазы в пульпе и недопущения превышения допустимого содержания твёрдой фазы (и связанного с этим роста плотности пульпы), приводящего к ухудшению качества промывки. При уменьшении подачи избыточный расход воды вызывает перерасход энергии на перекачку и ухудшение условий удержания мелкого золота из-за усиления транспортной способности потока.

Полученная зависимость используется как эмпирическая база для формирования целевого задания расхода в алгоритме.

Для насоса 110 кВт получено:

$$Q_{w,110} = 3{,}046 \times Q_s + 388{,}515, \quad (2)$$

Коэффициент детерминации модели составляет $R^2 = 0{,}825$.

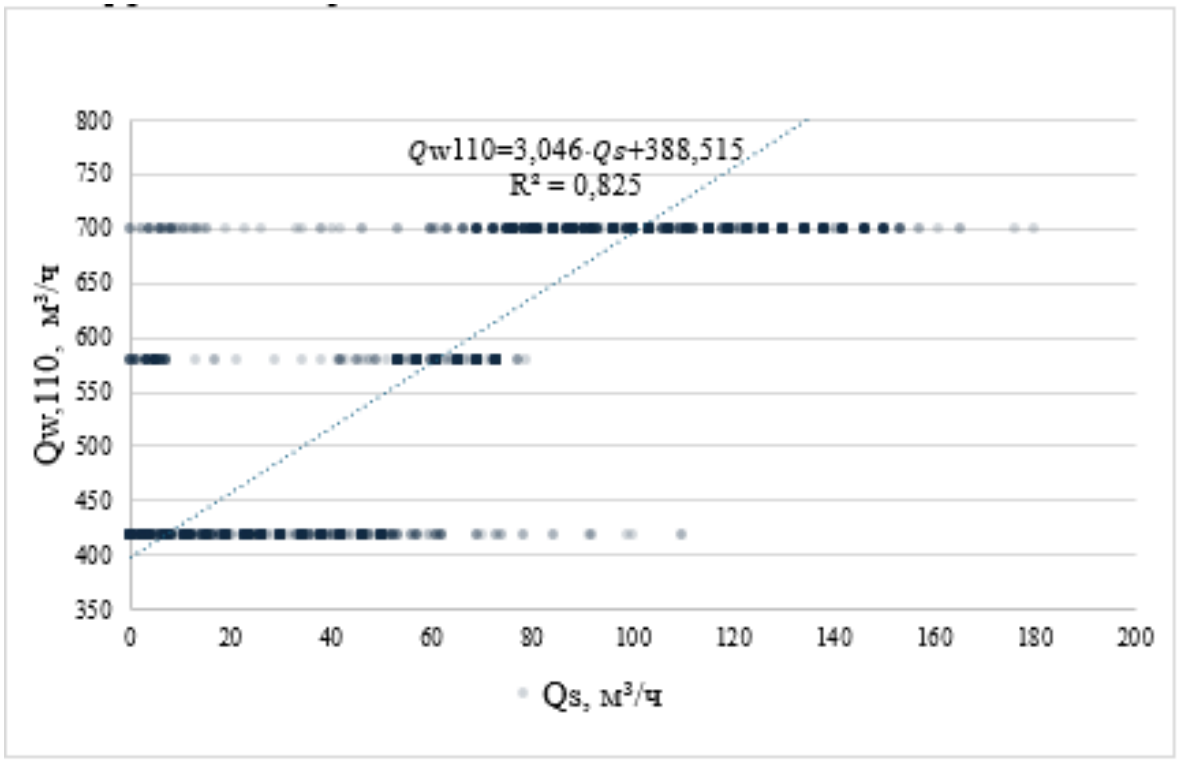


Рисунок 3 – Зависимость расхода технологической воды $Q_{w,110}$ от производительности по пескам Q_s

Для насоса 55 кВт получено:

$$Q_{w,55} = 1{,}503 \times Q_s + 342{,}460, \quad (3)$$

Коэффициент детерминации модели составляет $R^2 = 0{,}789$.

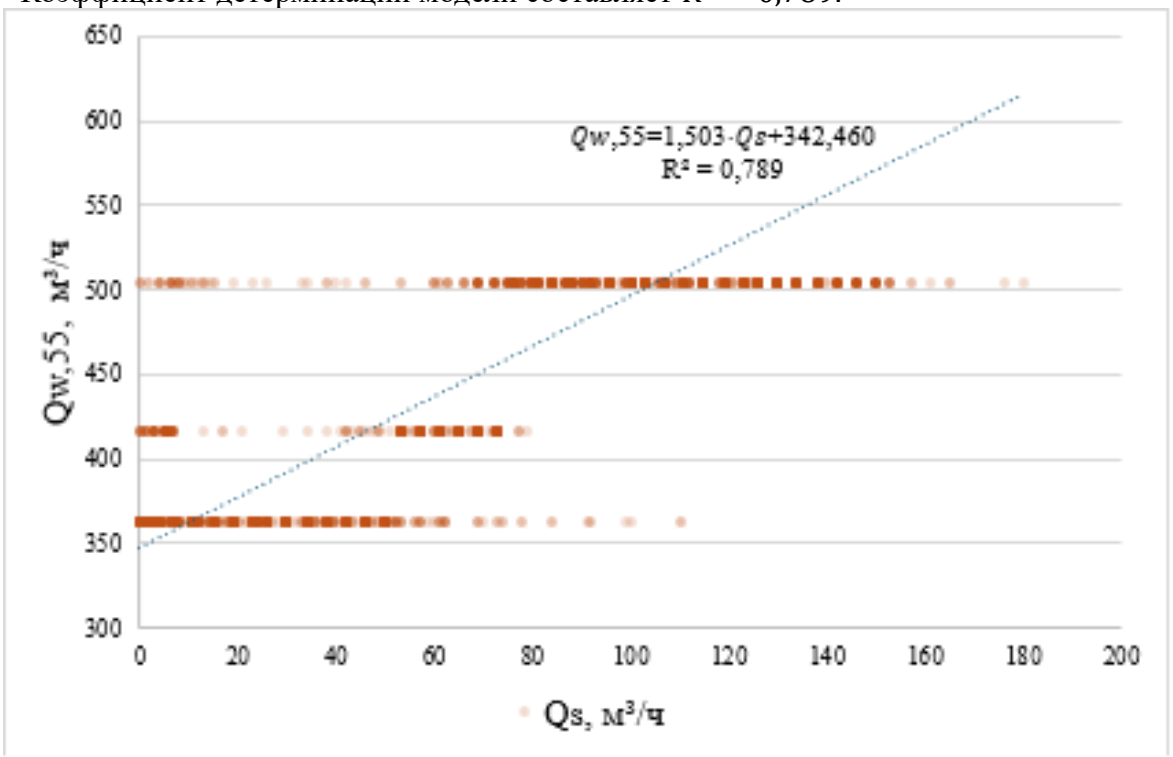


Рисунок 4 – Зависимость расхода технологической воды $Q_{w,55}$ от производительности по пескам Q_s

Для зависимостей (2) и (3) значения MAE и RMSE составляют соответственно 41,29/51,91 м³/ч и 24,96/28,74 м³/ч.

Полученные значения MAE и RMSE приведены в таблице 2 и используются при оценке применимости моделей и настройке ограничителей алгоритма управления.

Таблица 2 – Оценка точности и качества построенных регрессионных моделей (MAE, RMSE)

Модель	$\mathbf{R^2}$	**MAE, м³/ч**	**RMSE, м³/ч**
$Q_s = 3{,}306 \times I - 162{,}469$	0,956	4,51	7,80
$Q_{w,110} = 3{,}046 \times Q_s + 388{,}515$	0,825	41,29	51,91
$Q_{w,55} = 1{,}503 \times Q_s + 342{,}460$	0,789	24,96	28,74

Оценка точности аппроксимации подтвердила возможность использования полученных регрессионных зависимостей в качестве расчётной основы для определения производительности по пескам, оценки требуемого расхода технологической воды и настройки параметров алгоритма управления в рабочем диапазоне режимов.

При существенном изменении гранулометрического состава, плотности пульпы и доли глинистых примесей возможно изменение коэффициентов зависимостей, что является основанием для их периодического уточнения по данным эксплуатации. Уточнение коэффициентов регрессии может быть выполнено на основе накопленной статистики без остановки оборудования, что соответствует принципу адаптивности и обеспечивает сохранение эффективности управления при изменении условий разработки россыпного месторождения.

Формирование расчётной основы алгоритма автоматизированного регулирования.

Полученные эмпирические зависимости позволяют сформировать расчётную основу алгоритма автоматизированного регулирования расхода технологической воды по измеряемому току нагрузки электропривода промывочного прибора. Расчётная схема включает два последовательных этапа:

1. Оценка текущей загрузки промывочного прибора по измеряемому току нагрузки его электропривода;

2. Расчёт требуемого расхода технологической воды, по полученной оценке, в соответствии с зависимостями (2) и (3).

Расчет выполнен по паспортной характеристике центробежного насоса типа 1Д800-56, применяемого в системе подачи технологической воды промывочного комплекса. В качестве базового режима принята подача Q_1 по паспортной характеристике при номинальной выходной частоте преобразователя частоты $f_1 = 50$ Гц. Тогда текущий расход технологической воды определялся по выражению:

$$Q_w = Q_1 \times \frac{f}{f_1}, \quad (4)$$

где f – текущая выходная частота преобразователя частоты насосной установки, Гц;

f_1 – базовая (номинальная) выходная частота преобразователя частоты насосной установки, Гц;

Таким образом, значение Q_w для каждого момента времени вычислялось по текущей частоте преобразователя частоты с привязкой к базовому режиму работы насоса.

Применение расчёта расхода по законам подобия обусловлено особенностями производственных условий и схемой питающей водяной линии насоса, где установка расходомера на напорной линии затруднена (абразивность технологической воды, вибрации, неоднородность потока, необходимость обслуживания). Определение Q_w по текущей частоте ПЧ является корректным в пределах диапазона регулирования, поскольку геометрия рабочего колеса и гидравлическая схема остаются неизменными, а изменение подачи в основном определяется изменением скорости вращения.

Далее требуемый расход технологической воды Q_w, рассчитанный по формуле (2) или (3) в зависимости от мощности применяемой насосной установки, обеспечивается изменением выходной частоты преобразователя частоты насосной установки. С учётом зависимости (4) и установленного рабочего диапазона 35-50 Гц расчётное значение выходной частоты преобразователя частоты насосной установки определяется выражением:

$$f = \min\left\{50; \max\left[35;\ f_1 \frac{Q_w}{Q_1}\right]\right\}. \quad (5)$$

Нижняя граница диапазона выходной частоты преобразователя частоты насосной установки обусловлена эксплуатационными ограничениями электропривода и требованиями к минимально допустимому расходу технологической воды и минимальному напору, необходимому для преодоления перепада высот установки промприборов и насосных установок.

При снижении частоты вращения ухудшаются условия охлаждения электродвигателя, возрастает тепловая нагрузка и риск перегрева при длительной работе. Кроме того, уменьшение частоты приводит к снижению подачи насоса и может нарушить обеспечение минимально необходимого расхода технологической воды одновременно на узлы загрузки (бункер) и шлюза. В связи с этим в ходе опытной эксплуатации нижняя граница выходной частоты преобразователя частоты насосной установки была принята равной 35 Гц. Рабочий диапазон регулирования принят $f = 35–50$ Гц.

На основе полученных зависимостей обоснованы следующие параметры АСУ подачи песков и технологической воды:

1. Параметры зависимости производительности по пескам от тока нагрузки электропривода промывочного прибора, определяемые коэффициентами регрессионного уравнения (1), полученными по экспериментальным данным с учётом фильтрации и исключения выбросов.

2. Параметры зависимости требуемого расхода технологической воды от производительности по пескам, определяемые коэффициентами уравнений (2) и (3) для насосных установок мощностью соответственно 110 и 55 кВт.

3. Диапазон формирования закона регулирования по выходной частоте преобразователя частоты насосной установки: рабочий диапазон выходной частоты преобразователя частоты, в котором обеспечивается регулирование расхода технологической воды с соблюдением эксплуатационных ограничений (в настоящем исследовании – 35-50 Гц).

4. Эксплуатационные ограничения алгоритма, включающие допустимые диапазоны измеряемых и расчётных параметров системы и обеспечивающие исключение нештатных режимов работы оборудования, в том числе ограничения по току и мощности электроприводов, а также по минимальной и максимальной выходной частоте преобразователя частоты насосной установки.

Разработанный алгоритм обеспечивает последовательное преобразование измеряемого значения тока нагрузки I в расчётное значение производительности по пескам Q_s, определение требуемого расхода технологической воды Q_w по уравнениям (2) и (3) и формирование требуемой частоты f преобразователя частоты насосной установки в диапазоне 35-50 Гц [1].

Техническая реализация автоматизированной системы.

В соответствии с установленными эмпирическими зависимостями и обоснованными ограничениями по выходной частоте преобразователя частоты насосной установки разработана структура автоматизированной системы управления технологическим режимом промывочного комплекса.

Система автоматизированного управления технологическими процессами строится на основе комплекса технических средств, обеспечивающих измерение параметров, обработку информации, формирование команд на изменение выходной частоты преобразователя частоты насосной установки и диспетчеризацию процесса.

Выбранный состав технических средств включает программируемый логический контроллер, частотно-регулируемый привод насосной установки, штатные измерительные каналы и систему визуализации и архивирования. Он обеспечивает измерение параметров технологического процесса, обработку информации, формирование команд регулирования, изменение частоты вращения насосной установки и визуализацию режима работы оборудования.

На рисунке 5 показан шкаф управления системой автоматизированного регулирования, размещённый отдельно от промывочного прибора ПБШ-100 и насосной установки. Он обеспечивает приём и регистрацию электрических параметров работы ПБШ-100, оснащённого четырьмя мотор-редукторами, а также управление насосной установкой через преобразователь частоты насосной установки. В нем размещены программируемый логический контроллер, частотный преобразователь, а также аппаратура коммутации и защиты, обеспечивающие приём сигналов от измерительных датчиков и формирование команд на изменение выходной частоты преобразователя частоты насосной установки. Конструктивное исполнение шкафа управления ориентировано на эксплуатацию в полевых условиях россыпного месторождения и учитывает требования к надёжности, ремонтопригодности и устойчивости к запылённости, влажности и температурным колебаниям.



Рисунок 5 – Шкаф управления системой автоматизированного регулирования с сигнальной колонной

В верхней части шкафа управления установлена сигнальная колонна, предназначенная для оперативной индикации текущего состояния загрузки промывочного прибора. Применение световой индикации обусловлено необходимостью быстрого информирования машиниста экскаватора о характере загрузки в процессе подачи песков. В системе принята трёхцветная схема отображения: зелёный сигнал соответствует работе вхолостую или недостаточной загрузке, жёлтый – нормальному режиму подачи песков, красный – перегрузке либо аварийному отклонению режима. Такое решение позволяет уменьшить запаздывание реакции оператора на изменение загрузки и способствует поддержанию стабильного режима промывки.

Наличие сигнальной индикации особенно важно при работе машиниста экскаватора, когда требуется быстро оценивать текущую загрузку промывочного прибора без постоянного обращения к панели оператора и числовым значениям контролируемых параметров. В отличие от визуальной оценки режима по косвенным признакам, световая индикация обеспечивает простую, однозначную и быстро воспринимаемую форму представления информации. Это создаёт условия для более согласованной работы машиниста экскаватора и промывочного прибора, что способствует уменьшению перегрузок и недогрузок самого прибора.

Для реализации автоматизированного регулирования были разработаны алгоритмы управления преобразователями частоты электродвигателей насосных установок, обеспечивающие динамическое изменение подачи технологической воды в зависимости от текущей загрузки промывочного прибора.

В панели оператора шкафа управления ПБШ-100 (рисунок 6) предусмотрен раздел настроек, позволяющий выполнять настройку параметров регулирования соотношения Т:Ж путём задания выходной частоты преобразователя частоты насосной установки при различных значениях производительности прибора.



Рисунок 6 – Панель оператора (меню настройки насоса)

Экспериментальная проверка разработанной системы автоматизации выполнена на промывочном приборе ПБШ-100 с регулируемой подачей технологической воды. Целью проверки являлась оценка работоспособности алгоритма автоматизированного регулирования в реальных производственных условиях, а также определение его влияния на устойчивость режима промывки, соотношение твёрдой и жидкой фаз в пульпе, энергопотребление насосного оборудования и технологические показатели переработки песков.

Настройка параметров регулирования через панель оператора обеспечила адаптацию режима подачи технологической воды к текущей производительности прибора. Внедрение автоматизированной системы управления на установке ПБШ-100 позволило улучшить технологические и энергетические показатели процесса. Важнейшим результатом стало поддержание стабильного режима обогащения по параметру Т:Ж. При изменении производительности прибора по пескам система оперативно регулирует подачу технологической воды, поддерживая требуемое соотношение твёрдой и жидкой фаз в пределах установленных норм.

Опытно-промышленная апробация.

На рисунках 7 и 8 отражены изменения производительности по пескам и расхода технологической воды при использовании насосов с электродвигателями номинальной мощностью 55 и 110 кВт в зависимости от загрузки промывочного прибора. На графиках видно, что изменения производительности промывочного прибора по пескам сопровождаются соответствующим изменением расхода технологической воды, что обеспечивает снижение колебаний соотношения Т:Ж. Эти изменения связаны с динамикой подачи песков, при этом система работает в пределах установленного диапазона, обеспечивая минимальные отклонения.

График энергопотребления насоса показывает пульсирующую динамику с регулярным снижением и повышением значений. Пульсации связаны с изменениями нагрузки и согласуются с циклом подачи песков.

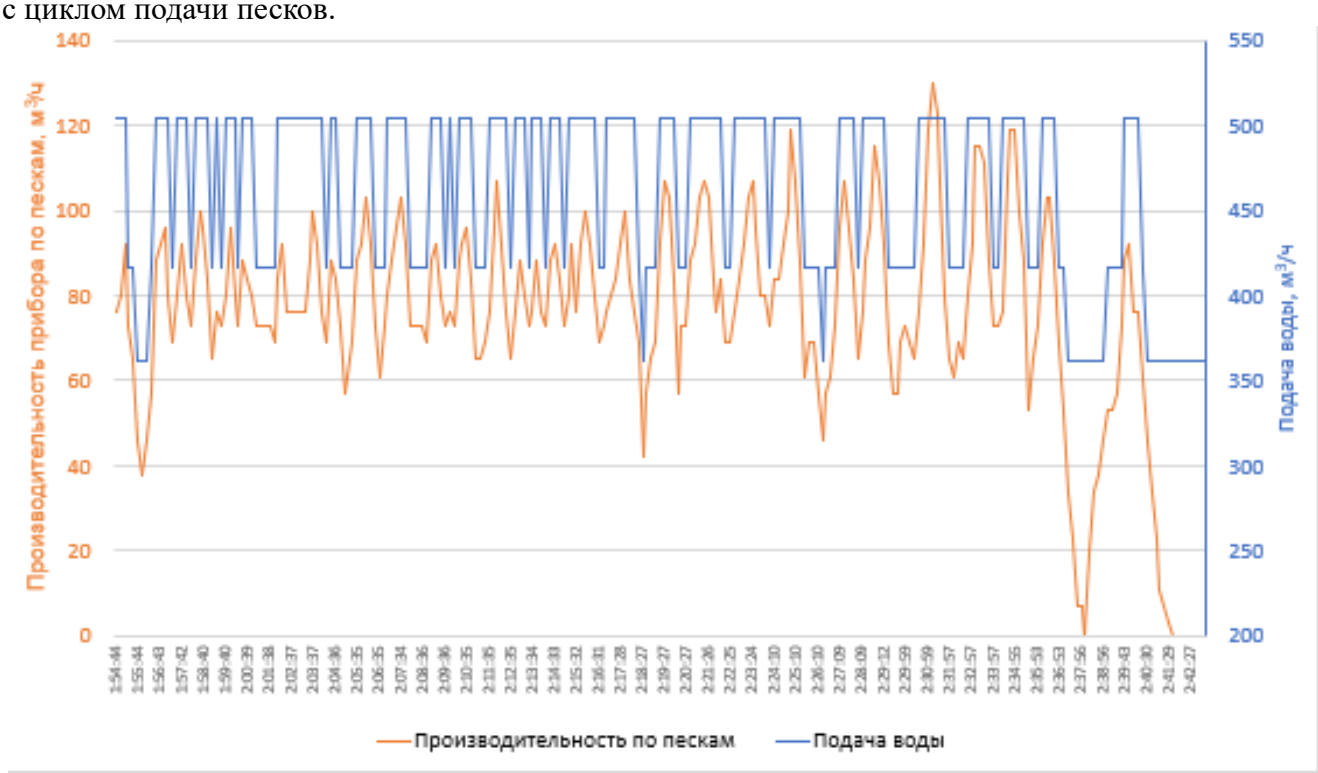


Рисунок 7 – Изменение производительности по пескам и расхода технологической воды при работе насоса 1Д800-56Б (55 кВт)

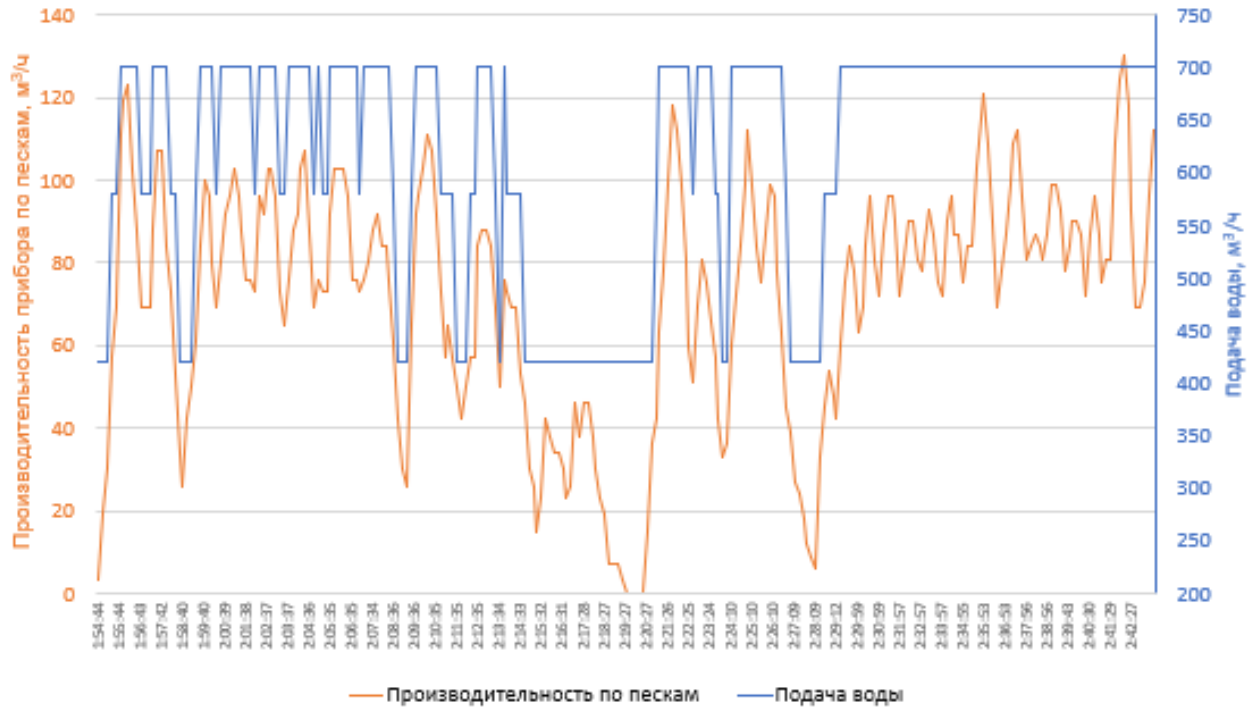


Рисунок 8 – Изменение производительности по пескам и расхода технологической воды при работе насоса 1Д800-56Б (110 кВт)

По результатам опытной эксплуатации установлено, что насос с электродвигателем номинальной мощностью 55 кВт при частотном регулировании потреблял в среднем 29,6 кВт, тогда как в режиме фиксированной подачи средняя потребляемая мощность составляла 55 кВт. Для насоса с электродвигателем номинальной мощностью 110 кВт средняя потребляемая мощность при частотном регулировании составила 52,0 кВт, тогда как в режиме фиксированной подачи – 103 кВт. Таким образом, применение частотного регулирования обеспечило снижение средней потребляемой электрической мощности приблизительно на 46 % для насоса с электродвигателем 55 кВт и на 50 % для насоса с электродвигателем 110 кВт в условиях россыпного месторождения руч. Хребтовый.

Для каждого насоса определены среднее значение потребляемой мощности, стандартное отклонение, медиана и коэффициент вариации, рассчитанные по данным регистрации в период опытной эксплуатации. Анализ результатов показывает, что при автоматическом регулировании средняя потребляемая мощность насоса мощностью 110 кВт снизилась с 103,0 до 52,0 кВт, а насоса мощностью 55 кВт с 55,0 до 29,6 кВт.

Сравнительные характеристики потребляемой мощности насосного оборудования при фиксированной подаче и автоматическом регулировании приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Потребляемая мощность насосов при автоматическом регулировании и без регулирования

Наименование	**Значения параметров**			
	110 кВт, адаптивный режим	**110 кВт, без регулировки**	**55 кВт, адаптивный режим**	**55 кВт, без регулировки**
Средняя потребляемая мощность, кВт	52,0	103,0	29,6	55,0

Продолжение таблицы 3

Наименование	Значения параметров			
	110 кВт, адаптивный режим	**110 кВт, без регулировки**	**55 кВт, адаптивный режим**	**55 кВт, без регулировки**
Стандартное отклонение мощности, кВт	35,3	0,0	13,5	0,0
Медиана мощности, кВт	22,2	103,0	19,0	55,0
Коэффициент вариации мощности, %	67,9	0,0	45,6	0,0

Проведённая экспериментальная проверка показала, что внедрённые технические решения обеспечивают стабильную, надёжную и экономичную работу как насосного оборудования, так и промывочного прибора ПБШ-100 в целом. Испытания на приборе ПБШ-100 подтвердили корректность выбранного подхода и его высокую эффективность, снижение энергопотребления насосного оборудования до 50 %, стабилизацию технологических процессов, рост извлечения, а также повышение оперативности управления за счёт применения световой индикации загрузки промывочного прибора [1, 2, 4].

Технико-экономическая оценка результатов внедрения

Результаты расчёта показали, что внедрение автоматизированной системы управления обеспечивает выраженный экономический эффект за счёт снижения расхода дизельного топлива и уменьшения затрат на обслуживание насосного оборудования. Для насосной установки мощностью 55 кВт суммарный экономический эффект за промывочный сезон составил 1 946 тыс. руб. при капитальных вложениях 1 300 тыс. руб. Срок окупаемости составил 3,34 месяца, а коэффициент экономической эффективности – 1,50.

Для насосной установки мощностью 110 кВт суммарный экономический эффект за промывочный сезон составил 3 702 тыс. руб. при капитальных вложениях 1 450 тыс. руб. Срок окупаемости составил 1,96 месяца, а коэффициент экономической эффективности – 2,55.

В таблице 4 представлены сводные показатели экономической эффективности внедрения автоматизированной системы управления насосными установками.

Таблица 4 – Сводные показатели экономической эффективности внедрения автоматизированной системы управления насосными установками

Показатель	Ед. изм.	Насос 55 кВт	Насос 110 кВт
Экономия по топливу	тыс. руб.	1 746	3 402
Снижение затрат на обслуживание	тыс. руб.	200	300
Общая экономия за сезон	тыс. руб.	1 946	3 702
Капитальные вложения	тыс. руб.	1 300	1 450
Срок окупаемости	мес.	3,34	1,96
Коэффициент экономической эффективности	–	1,50	2,55
Снижение расхода дизельного топлива	%	33,8	42,2

Следует отметить, что в представленную оценку не включён дополнительный экономический эффект, связанный с возможным повышением извлечения мелкого и тонкого золота при снижении колебаний соотношения Т:Ж. Поэтому приведённые значения экономического эффекта учитывают снижение расхода дизельного топлива и уменьшение затрат на обслуживание насосного оборудования.

Эксплуатация промывочного прибора в обоих рассматриваемых режимах осуществлялась одним прибористом. Внедрение автоматизированной системы управления не сопровождалось сокращением численности персонала и не изменяло принятую организацию обслуживания промывочного комплекса. В связи с этим экономия по фонду оплаты труда в расчёт суммарного экономического эффекта не включалась.

Сопоставление полученных результатов показывает, что применение автоматизированного регулирования расхода технологической воды экономически целесообразно для обоих рассмотренных вариантов насосных установок, однако наибольший абсолютный экономический эффект достигается при эксплуатации насоса мощностью 110 кВт. Это обусловлено большей исходной энергоёмкостью режима его работы и, соответственно, более значительным потенциалом снижения топливных затрат при переходе от фиксированной подачи к адаптивному регулированию. Практическая значимость разработанной системы особенно возрастает в условиях удалённого расположения россыпных объектов, где доля топливных и эксплуатационных затрат в себестоимости промывки является повышенной, а снижение расхода топлива и сокращение объёма ремонтных воздействий приобретают дополнительное производственное значение.

Таким образом, автоматизация насосных установок промывочного комплекса подтвердила свою эффективность как с технологической, так и с экономической точки зрения. Реализованный подход обеспечивает снижение эксплуатационных затрат, повышение устойчивости работы оборудования и может быть рекомендован для внедрения на аналогичных промывочных комплексах, работающих в условиях неравномерной подачи песков и автономного энергоснабжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена научно-практическая задача повышения эффективности процесса промывки золотосодержащих песков при разработке россыпных месторождений золота на основе обоснования параметров автоматизированной системы управления процессами подачи песков и регулирования расхода технологической воды в соответствии с текущей загрузкой промывочного комплекса.

В процессе исследований получены следующие научные и научно-практические результаты.

1. Установлена количественная зависимость между током нагрузки электропривода промывочного прибора и производительностью по пескам, позволяющая выполнять расчётную оценку текущей производительности без применения специализированных средств её непрерывного измерения.

2. Получены зависимости требуемого расхода технологической воды от производительности по пескам для насосных установок с электродвигателями номинальной мощностью 55 и 110 кВт, используемые для формирования требуемого режима подачи технологической воды при изменении текущей производительности промывочного комплекса.

3. Сформирована расчётная основа алгоритма автоматизированного регулирования расхода технологической воды, включающая последовательное определение производительности по пескам по току нагрузки, расчёт требуемого расхода технологической воды и определение выходной частоты преобразователя частоты насосной установки с учётом установленного рабочего диапазона 35-50 Гц и эксплуатационных ограничений.

4. Разработаны структурно-функциональная схема автоматизированной системы управления и алгоритм автоматизированного регулирования расхода технологической воды, обеспечивающие адаптацию расхода технологической воды к текущей производительности промывочного комплекса в условиях неравномерной подачи песков.

5. Опытно-промышленная эксплуатация разработанной автоматизированной системы на промывочном комплексе ПБШ-100 подтвердила её работоспособность в производственных условиях. Применение автоматизированного регулирования обеспечило повышение устойчивости технологического режима и снижение средней потребляемой электрической мощности насосного оборудования приблизительно на 46 % для насоса мощностью 55 кВт и на 50 % для насоса мощностью 110 кВт при сохранении требуемой производительности по пескам.

6. Установлено, что применение автоматизированного регулирования расхода технологической воды обеспечивает снижение расхода дизельного топлива на 33,8 % для насосной установки с электродвигателем мощностью 55 кВт и на 42,2 % для насосной установки с электродвигателем мощностью 110 кВт.

7. По результатам технико-экономической оценки подтверждена экономическая эффективность внедрения разработанной автоматизированной системы управления. Полученные результаты свидетельствуют о практической применимости разработанной системы при модернизации действующих и создании новых промывочных комплексов, особенно в условиях удалённого расположения объектов и высокой доли эксплуатационных затрат.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования отражены в 5 опубликованных работах, в том числе в 2 работах в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 3 работы опубликованы в научных изданиях, индексируемых в базе Scopus, 1 работа в материалах научной конференции.

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Серый Р. С. Обоснование параметров автоматизированной системы управления подачей песков на перерабатывающем комплексе при эксплуатации россыпных месторождений золота

/ Р. С. Серый, А. Д. Васюта, К. А. Журавлев // Горная промышленность. – 2026. – № 2. – С. 129-134. – DOI 10.30686/1609-9192-2026-2-129-134.

2. Журавлев, К. А. Анализ факторов, влияющих на потери драгоценных металлов при разработке россыпных месторождений / К. А. Журавлев, А. Д. Васюта // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 12-2. – С. 53-63. – DOI 10.25018/0236_1493_2023_122_0_53.

В прочих изданиях:

3. Алексеев В. С. Исследование миграции частиц золота в техногенных песках россыпных месторождений / В. С. Алексеев, В. В. Таганов, А. Д. Васюта // Обогащение руд. – 2022. – № 5. – С. 34-39. – DOI 10.17580/or.2022.05.06.

4. Васюта А. Д. Анализ работы шлюзовых промывочных приборов и оценка их энергоемкости / А. Д. Васюта, К. А. Журавлев // Проблемы недропользования. – 2023. – № 2(37). – С. 32-39. – DOI 10.25635/2313-1586.2023.02.032.

В материалах научной конференции:

5. Семенов А. Н. Оценка экономической эффективности дезинтеграции высокоглинистых золотосодержащих песков с помощью гидродинамического дезинтегратора / А. Н. Семенов, А. Д. Васюта, К. А. Журавлев // Актуальные проблемы освоения георесурсов : Материалы I Всероссийской научной конференции молодых ученых и аспирантов, Хабаровск, 18–19 мая 2022 года. – Хабаровск: Институт горного дела ДВО РАН, 2022. – С. 102-106.