

На правах рукописи



КНЯЗЬКИН ЕГОР АЛЕКСЕЕВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ СХЕМ
ВОДООТЛИВА ПОДЗЕМНОГО РУДНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ЭНЕРГИИ ГИДРОПОТОКОВ**

Специальность 25.00.22 – «Геотехнология
(подземная, открытая и строительная)»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук в Отделе теории проектирования освоения недр

Научный руководитель: профессор, доктор технических наук
Рыльникова Марина Владимировна

Официальные оппоненты: профессор, доктор технических наук,
главный специалист АО «Центральный
проектно-технологический институт»
Кузьмин Евгений Викторович

кандидат технических наук,
заместитель генерального директора
ООО «УралЭнергоРесурс»
Зубков Антон Анатольевич

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт горного дела
Уральского отделения Российской
академии наук, г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится «16» июня 2021 г. в 10 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.074.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН) по адресу: 111020, Москва, Крюковский тупик, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПКОН РАН:
http://ипконран.рф/?page_id=843

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



В.С. Федотенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время доля энергетической составляющей в себестоимости готовой продукции горнодобывающих предприятий весьма высока и достигает 37–40%, что пагубно сказывается на их экономике, особенно с учетом устойчивой тенденции роста цен на энергоресурсы. Постоянно растущие затраты на энергоносители, связанные в первую очередь с переходом горных работ на большие глубины, предопределили изыскание новых, нетрадиционных технологических решений, обеспечивающих сокращение общего электропотребления рудников, снижение экологической нагрузки при производстве и потреблении энергоносителей, в том числе за счет рекуперации части энергии, затрачиваемой на добычу минерального сырья из недр, в ходе реализации геотехнологических процессов.

Одним из путей существенного улучшения экономических показателей при разработке рудных месторождений является повышение энергоэффективности горного производства за счет использования энергии природных и технологических гидротоков, перемещаемых непосредственно в горнотехнической системе. Использование энергии таких потоков в ходе реализации геотехнологических процессов позволяет исключить ряд принципиальных трудностей, неразрешимых в рамках традиционных технологий. Среди основных преимуществ технологии с использованием энергии гидротоков, помимо повышения энергоэффективности, следует отметить сокращение эксплуатационных затрат на содержание водоотливных станций за счет повышения качества очистки рудничных вод, сокращения числа эксплуатируемых водосборников, а также полной автоматизации процессов осушения горных выработок.

Разработка и обоснование параметров горнотехнической системы с технологией преобразования энергии природных и технологических потоков, перемещаемых и потребляемых в подземном руднике, представляет особую значимость при освоении труднодоступных глубоких горизонтов рудных месторождений. Поэтому актуальность темы диссертации заключается в создании задела в области теоретических основ проектирования энергоэффективных горнотехнических систем для вовлечения в эксплуатацию перспективных месторождений, в том числе расположенных в отдаленных регионах со слаборазвитой инфраструктурой, и повышение эффективности функционирования действующих горных предприятий.

В мировой практике становления энергоэффективных технологических процессов различных производств наблюдается тенденция, связанная с переходом от традиционных минерально-сырьевых источников энергии на возобновляемые, поиском новых, нетрадиционных энергетических источников. Проблема повышения энергоэффективности в России рассматривается государством в качестве приоритетной, совместно с решением вопросов модернизации и инновационного развития промышленности.

Поэтому обоснование параметров энергоэффективных схем водоотлива подземного рудника с использованием энергии гидропотоков представляет весьма актуальную научно-практическую задачу.

Цель работы состоит в разработке и обосновании параметров схем водоотлива с использованием энергии гидропотоков для обеспечения устойчивости и повышения эффективности функционирования горнотехнической системы подземного рудника.

Идея работы заключается в использовании установленных закономерностей формирования и сбора рудничных гидропотоков для преобразования энергии, обоснования принципов и параметров энергоэффективных горнотехнических систем с обеспечением устойчивости их функционирования за счет эффективного преобразования энергии рудничных гидропотоков и совершенствования схемы водоотведения подземного рудника в целом.

Достижение поставленной цели и реализация идеи обеспечены решением следующих научно-практических задач:

- анализ и обобщение мирового опыта внедрения основных и вспомогательных геотехнологий, обеспечивающих повышение энергоэффективности горных предприятий;

- разработка методики определения параметров горнотехнической системы с применением гидротехнических установок по преобразованию энергии гидропотоков в горнотехнической системе подземного рудника;

- исследование влияния конструктивных параметров горнотехнической системы на выбор подхода к преобразованию энергии гидропотоков;

- разработка и обоснование энергоэффективной схемы водоотлива, определяющей новый подход к способам очистки, перепуска, откачки рудничных вод.

Предмет исследования: рациональные параметры энергоэффективной системы водоотлива подземного рудника.

Объект исследования: система водоотлива подземного рудника на примере шахты «Центральная» АО «ЮГК».

Методы исследований

Общей теоретической и методологической основой исследований является комплексный подход, включающий анализ и обобщение производственной и проектной практики эксплуатации водоотливных систем, обобщение результатов научных исследований отечественных и зарубежных ученых в области энергоспроизводства при комплексном освоении недр, анализ показателей работы систем водоотлива на действующих горных предприятиях, компьютерное трехмерное моделирование рудничных гидропотоков в различных режимах работы системы водоотлива, физическое моделирование процесса откачки рудничных вод на базе разработанного лабораторного стенда, апробация параметров разработанной технологии в условиях подземного рудника, технико-экономический анализ.

Положения, выносимые на защиту

1. Выбор рациональной схемы и структуры системы водоотлива должен осуществляться с учетом объемов генерации энергии посредством гидроэлектростанции малой мощности, условий очистки воды в гидроциклонах без внешнего энергопотребления и возможности снижения высоты подъема жидкости насосами при рациональном перераспределении очищенных гидропотоков внутри горно-технической системы рудника на технологические нужды.

2. Эксплуатация системы рудничного водоотлива с использованием гидроэлектростанции малой мощности должна включать создание сети регулировочных водосборников на вышележащих горизонтах объемом $V_{\text{водосб.}} = \frac{N_{\text{ГЭС}}}{H \rho g} \cdot t_{\text{осажд.}} \cdot M^3$, где: $N_{\text{ГЭС}} = (Q_{\text{ест.}} + Q_{\text{техн.}}) \cdot H_{\text{г.р.}} \rho g$, Вт – установленная мощность гидроэлектростанции; H , м – напор воды, созданный высотой перепада; ρ , кг/м³ – плотность воды; g , м/с² – ускорение свободного падения; $t_{\text{осажд.}}$, с, – время осаждения взвешенных частиц в гидропотоке; $Q_{\text{ест.}}$, м³/с – естественный максимальный водоприток; $Q_{\text{техн.}}$, м³/с – максимальный приток технологической воды; $H_{\text{г.р.}}$, м – глубина разработки месторождения; при этом перепуск накопленного объема воды $V_{\text{водосб.}}$ должен осуществляться по вертикальным или крутонаклонным скважинам, исключая горизонтальные или слабонаклонные участки на пути следования потока к гидротурбине активного типа.

3. Увеличение производительности рудничного водоотлива достигается очисткой рудничных вод в гидроциклонах без внешнего энергопотребления путем рациональной взаимосвязи конструктивных параметров и пространственного расположения горных выработок, объема перераспределяемых в них гидропотоков с обеспечением давления потока $P_{\text{мин.г-цикл.}} \leq P_{\text{пот.}} \leq P_{\text{макс.г-цикл.}}$, Па, где: $P_{\text{макс.г-цикл.}}$, Па – максимальное, $P_{\text{мин.г-цикл.}}$, Па – минимальное для функционирования гидроциклона рабочее давление, определяемое техническими характеристиками.

4. Снижение внешнего водопотребления рудника через перераспределение гидропотоков системы рудничного водоотлива после очистки воды в гидроциклонах достигается формированием на вышележащих горизонтах накопительных емкостей объемом $V_{\text{выр.пр.}} \geq Q_{\text{техн.ном.}} \cdot t_{\text{потр.}}$, м³ и при глубине разработки $H_{\text{г.р.}} > H_{\text{техн.мин.}}$, м, где $Q_{\text{техн.ном.}}$, м³/с – номинальный расход технической воды оборудованием рудника; $t_{\text{потр.}}$, ч – время непрерывной эксплуатации оборудования; $H_{\text{техн.мин.}}$, м – требуемый гидравлический напор, определяемый техническими характеристиками применяемого оборудования на основных (бурение, закладка) и вспомогательных (орошение забоев, промывка трубопроводов, обеспыливание, пожаротушение) технологических процессах.

Достоверность научных положений выводов и результатов обеспечивается надежностью и представительностью исходных данных; корректностью постановки задач исследований; сопоставимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований; использованием современного оборудования и апробированных методик; положительными результатами опытно промышленной апробации технологии рекуперации энергии в системе водоотлива подземного рудника АО «ЮГК».

Научная новизна работы

Разработана методика расчета параметров и выбора системы рудничного водоотлива с использованием энергии гидропотоков, отличающаяся учетом взаимосвязи пространственного расположения и конструктивных параметров горных выработок, объема перемещаемых в них гидропотоков с определением рационального распределения по глубине и в плане гидротехнического оборудования в схеме водоотлива для повышения эффективности функционирования горнотехнической системы подземного рудника.

Практическая значимость работы заключается в разработке энергоэффективных структурных схем рудничного водоотлива, обеспечивающих снижение внешнего электро- и водопотребления рудника за счет внутренней генерации электрической энергии и перераспределения гидропотоков системы рудничного водоотлива после очистки в гидроциклонах путем направления части потока на основные (бурение, закладка) и вспомогательные (орошение забоев, промывка трубопроводов, обеспыливание) технологические процессы; обосновании конструкции системы перепускных скважин; повышении автоматизации процессов очистки рудничной воды; разработке технологических рекомендаций по переходу с классической схемы водоотлива на схему с рекуперацией энергии гидропотоков.

Апробация работы

Основные результаты, положения и выводы докладывались и обсуждались на Международном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, 2019 и 2021); 14-м Международном симпозиуме «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях» (Белгород, 2019); VI Международной научно-технической конференции «Решение технологических и экологических проблем горных производств на территории России, ближнего и дальнего зарубежья» (Москва, 2019); X Международной конференции «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу» (Магнитогорск, 2019); II Международной научно-практической конференции «Наука и инновационные разработки – Северу» (Мирный, 2019); 14-й Международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, 2019); Международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность» (Севастополь, 2019); VIII International Scientific Conference «Problems of Complex Development of Georesources» (Хабаровск, 2020); Международной научной школе академика К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы

комплексного освоения и сохранения земных недр» (Москва, 2020); II Всероссийской научно-практической конференции «Золото. Полиметаллы. XXI век» (Пласт, 2020).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 16 работах, 4 из которых – в изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России, получен 1 патент на изобретение.

Объем и структура работы. Диссертация представлена на 158 страницах, состоит из введения, четырех глав, заключения и содержит 69 рисунков, 32 таблицы, библиографический список из 113 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Анализ и обобщение мирового опыта использования энергии техногенных источников и перспективы развития инновационных геотехнологий показал, что проблема повышения энергоемкости рудничного водоотлива особо актуальна при увеличении глубины разработки месторождений и решается на ограниченном ряде горных предприятий путем применения различного рода энергоэффективных технических и технологических решений.

Вопросам повышения эффективности добычи полезных ископаемых и оптимизации ведения горных работ за счет установления взаимосвязей параметров основных и вспомогательных технологических процессов с повышением их энергетической эффективности посвящены работы ведущих ученых: академиков М.И. Агошкова, К.Н. Трубецкого, чл.-корр. РАН Д.М. Бронникова, Д.Р. Каплунова, профессоров И.И. Айнбиндера, О.А. Байконурова, Н.Ф. Замесова, П.Э. Зуркова, В.Н. Калмыкова, Е.В. Кузьмина, В.П. Кравченко, Ю.В. Михайлова, М.В. Рыльниковой, М.Н. Цыгалова, В.И. Шестакова и многих других. В этих работах показана роль систем водоотлива, водопонижения и водоочистки как важнейшего элемента своевременной подготовки запасов полезного ископаемого к очистной выемке, как источника ценного вида георесурсов, как источника экологической опасности и др.

Значительный вклад в становление основ проектирования систем водоотведения при подземном способе добычи заложен в трудах акад. Л.Д. Шевякова, а также А.Н. Бредихина, В.В. Волкова, А.А. Зубкова, А.А. Ломакина, В.В. Олизаренко, М.Г. Риппа, К.И. Струкова, И.С. Туркина, М.М. Федорова и др. Ими установлены принципы и обоснованы технологии, способы и схемы повышения эффективности добычных и закладочных работ. В полной мере представлены теоретические аспекты повышения эффективности разработки запасов твердых полезных ископаемых, но недостаточно исследована область использования энергии перепускаемых гидропотоков в условиях подземного рудника. В мировой практике перспективы повышения энергоэффективности рудничного водоотлива за счет преобразования энергии гидропотоков рассмотрены в трудах W. Van der Wateren (Южная Африка), H. J Groenewald (Южная Африка), Robert N. Torbin (США), Huunen, J.M.H (Нидерланды), где сформулированы подходы к снижению общего энергопотребления системой

водоотлива посредством преобразования потенциальной энергии гидропотоков в электрическую и через использование энергии потока для повышения эффективности работы применяемого оборудования без внешнего энергопотребления. Однако вопросы, связанные с преобразованием энергии гидропотоков в ходе реализации основных и вспомогательных процессов при подземной разработке месторождений полезных ископаемых, в известных трудах не нашли достаточного отражения, что определило цель и задачи диссертации в соответствии с выдвинутой идеей и позволило выявить направления технологических изысканий и методы исследований.

В ходе проведенного анализа существующих подходов к преобразованию энергии гидропотоков с целью повышения энергоэффективности системы рудничного водоотлива было установлено, что рассмотренные методы уместны только в условиях принудительного перепуска гидропотоков. В связи с этим была разработана методика по определению параметров системы водоотлива подземного рудника с использованием энергии гидропотоков, базирующаяся на определении возможности генерации электрической энергии посредством гидроэлектростанций (ГЭС) малой мощности в подземных условиях. На базе установленных закономерностей и выбранных параметров ГЭС малой мощности была разработана гидротурбинная установка промышленного образца, запуск которой проводился в условиях подземного рудника шахты «Центральная» АО «ЮГК» (рис. 1).

В результате эксперимента определены показатели генерируемой мощности на всех действующих перепускных скважинах № 1–4 рудника. Для установления потенциала генерируемой мощности на годовом интервале времени полученные данные были наложены на изменения притоков в подземные выработки за 2018 год, установленные по журналу учета времени работы насосных установок (рис. 16). Суммарная производительность малой ГЭС по всем скважинам оказалась в диапазоне от 15 до 23 кВт·ч, что на 43% ниже теоретически рассчитанного потенциала энергии гидропотоков. В первую очередь в ходе эксперимента установлено, что рудничная вода, перепускаемая по скважинам, имеет прерывистый характер и нарушает основное требование к качеству гидропотока при использовании ГЭС малой мощности – неразрывность потока:

$$Q_1 = Q_2 = Q_n = const, m^3/c; \quad (1)$$

где Q_1 – расход жидкости в скважине в точке (x, y, z) , m^3/c ; Q_2 – в точке $(x, y, z + h)$, m^3/c ; Q_n – в точке $(x, y, z + nh)$, m^3/c .

Уравнение неразрывности потока указывает на неспособность классической схемы водоотлива обеспечить нормальную работу гидроагрегата, не подвергая его гидравлическим ударам. Решением данной проблемы является создание водосборников объемом $V_{\text{водосб.}} \geq \frac{N_{\text{ГЭС}}}{\rho g} \cdot t_{\text{осажд.}}, m^3$, зависимым от мощности установленной малой ГЭС $N_{\text{ГЭС}}, Вт$, высоты перепуска $H, м$, а также времени осаждения взвешенных частиц $t_{\text{осажд.}}, с$, с учетом плотности воды $\rho, кг/м^3$; и ускорения свободного падения $g, м/с^2$.

В ходе эксперимента установлено, что генерируемая мощность малой ГЭС зависит от структуры перепускных скважин и их пропускной способности. Так, в скважине № 2 (рис. 1, б), где приемный трубопровод имеет горизонтальные участки на пути следования гидротока, наблюдалась низкая производительность гидротурбинной установки, тогда как в скважинах № 1, 3 и 4 производительность была соизмерима ввиду их схожей конструкции.

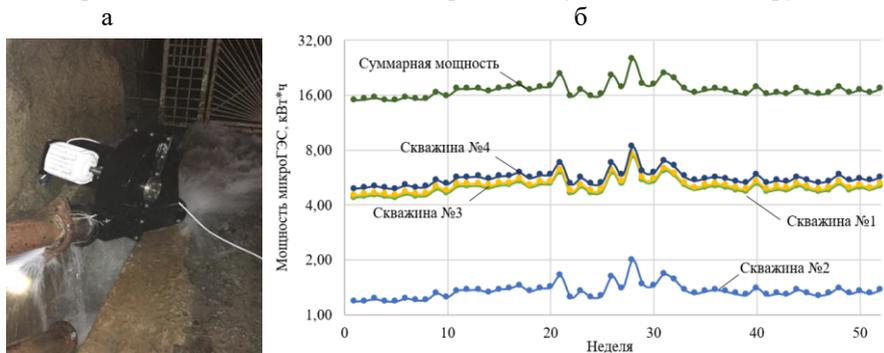


Рисунок 1. Натурный эксперимент по определению параметров системы водоотлива на базе ГЭС малой мощности: а – гидроустановка, смонтированная в устье скважины; б – результаты проведенного эксперимента

На основе результатов, полученных в ходе натурального эксперимента, сформирована схема системы водоотлива с учетом условий применения гидротурбинных агрегатов активного типа (рис. 2).

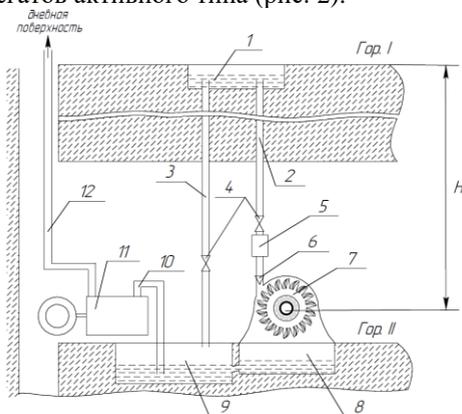


Рисунок 2. Схема водоотлива с генерацией энергии гидротоков на базе использования ГЭС малой мощности

Система рудничного водоотлива с использованием ГЭС малой мощности предусматривает создание сети водосборников 1 на вышележащих горизонтах для подготовки воды к работе в ГЭС малой мощности объемом $V_{\text{водосб.}}$, м^3 , определяемым мощностью $N_{\text{ГЭС}}$, Вт , гидроагрегата 7, высотой перепуска

жидкости с гор. 1 до оси рабочего колеса гидроагрегата 7 $H, м$, и временем осаждения взвешенных частиц гидротока $t_{осажд.}, с$, в водосборнике 1.

Перепуск подготовленного объема воды $V_{водосб.}$ осуществляется по вертикальным или крутонаклонным скважинам 2 через регулировочную 4, 6 и защитную гидроаппаратуру 5, исключая горизонтальные или слабонаклонные участки на пути следования потока к гидротурбине активного типа 7, максимальной мощностью $N_{г.макс.} = (Q_{ест.макс.} + Q_{техн.макс.}) \cdot H_{г.р.} \rho g, Вт$,

где: $Q_{ест.}, м^3/с$ – естественный максимальный водоприток на гор. 1; $Q_{техн.}, м^3/с$ – максимальный приток технологической воды на гор. 1; $H_{г.р.}, м$ – глубина разработки месторождения.

Отдавшая полезную энергию в ГЭС малой мощности 7 рудничная вода поступает в водоотливной лоток 8, откуда перетекает в главный водосборник 9. При этом избыток в водосборнике 1 рудничной воды перепускается по аварийной скважине 3 в главный водосборник 9. Накопленная вода в водосборнике 9 классическим способом по трубопроводу 10 поступает в насос 11 и выдается на дневную поверхность по высоконапорному трубопроводу 12.

Существенный недостаток схемы водоотлива с ГЭС малой мощности, так же как и классической, заключается в необходимости создания водосборников достаточно большой емкости для осветления рудничной воды от взвешенных частиц. При этом водосборники являются проточными и содержащиеся в водостоках твердые частицы не успевают полностью осесть до того момента, когда они попадают в приемные колодцы насосных установок или на лопатки рабочего колеса гидротурбины. Устранение указанного негативного проявления возможно при использовании энергии перепускаемой жидкости для создания завихрения потока и осаждения взвешенных частиц за счет центробежной силы посредством применения гидроциклона (рис. 3).

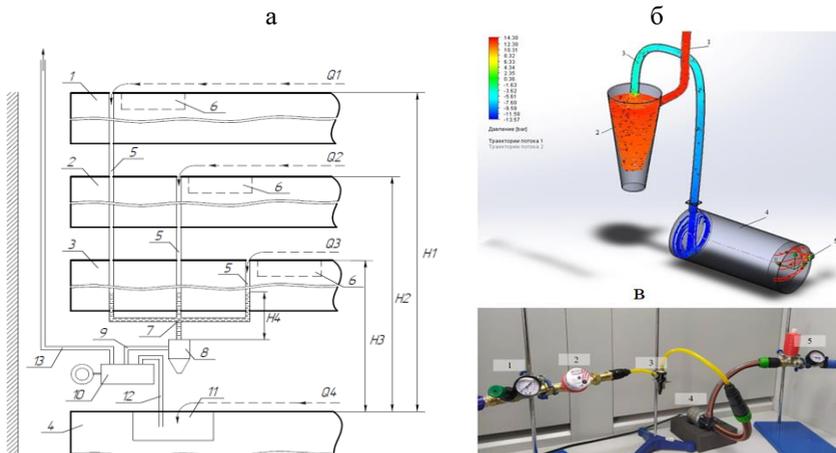


Рисунок 3. Схема водоотлива с использованием энергии гидротоков для очистки вод в гидроциклоне: а – структурная схема; б – компьютерная модель; в – лабораторный стенд

Принцип работы схемы рудничного водоотлива с очисткой вод в гидроциклоне заключается в следующем: рудничная вода по траекториям $Q1-Q3$ (рис. 3, а) с горизонтов 1–3 по перепускным скважинам 5 поступает в гидравлический коллектор 7, необходимый для уравнивания давления, после чего попадает в гидроциклон 8. Очищенная вода поступает в насос 10, где она смешивается с притоком $Q4$ и выдается на дневную поверхность по высоконапорному трубопроводу 13. При этом на входе в гидроциклон путем регулирования числа включений насосных установок создается давление потока $P_{\text{мин.г-цикл.}} \leq P_{\text{пот.}} \leq P_{\text{макс.г-цикл.}}$. $P_{\text{а}}$ за счет напора водяного столба H , образуемого в полости перепускных скважин, где: $P_{\text{макс.г-цикл.}}$, $P_{\text{а}}$ – максимальное, $P_{\text{мин.г-цикл.}}$, $P_{\text{а}}$ – минимальное для функционирования гидроциклона рабочее давление, определяемое его техническими характеристиками. Водосборник 11 в рассматриваемой схеме используется для аккумуляции и очистки притока $Q4$, а также для предотвращения затопления выработок в аварийных ситуациях.

Для определения параметров схемы водоотлива с очисткой воды в гидроциклонах была разработана 3D-модель и проведена потоковая симуляция движения гидропотоков (рис. 3, б), которая показала, что давление $P_{\text{пот.}}$, создаваемое в полости перепускных скважин, полностью удовлетворяет потребности гидроциклона. В качестве проверки результатов компьютерного моделирования был разработан лабораторный стенд (рис. 3, в), который включает регулятор давления с манометром – 1, жидкостный расходомер – 2, напечатанный на 3D-принтере гидроциклон – 3, центробежный насос – 4, клапан регулятора сопротивления с манометром – 5.

В ходе лабораторного эксперимента установлено, что, помимо очистки рудничных потоков, схема позволяет создать подпорное давление на входе в насос, тем самым поднимая его КПД. Также в ходе эксперимента проводилось сравнение с классической схемой водоотлива. Результаты приведены на рисунке 4.

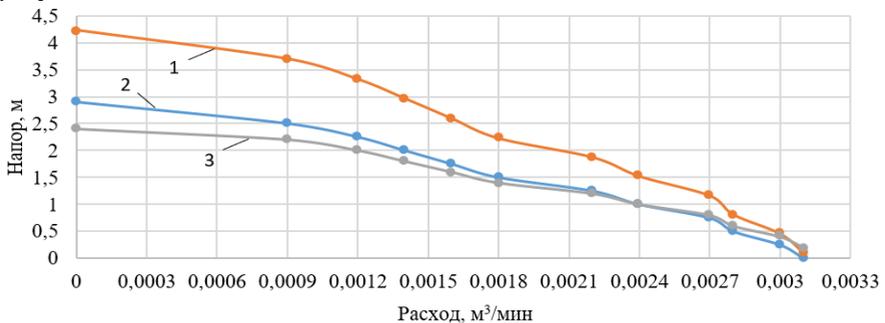


Рисунок 4. Характеристика работы центра центробежного насоса при классической схеме и инновационной схеме водоотлива с учетом влияния на его работу подпорного давления: 1 – схема с очисткой; 2 – классическая схема; 3 – создаваемое подпорное давление

Главным выводом проведенного эксперимента является то, что при неизменной потребляемой мощности электроприводом насоса схема с очисткой позволяет достичь высоты подъема жидкости на 68% выше по сравнению с классической за счет искусственно создаваемого подпорного давления, что в полной мере совпадает с результатами компьютерного моделирования.

Существенным недостатком схемы с очисткой рудничных вод в гидроциклонах является вынужденное оставление эксплуатируемых ранее водосборников 6 (см. рис. 3, а). С учетом рекомендации чл.-корр. РАН Д.Р. Каплунова, для более полного эффективного использования выработанного пространства в различных функциональных назначениях для реализации полного цикла комплексного освоения месторождений твердых полезных ископаемых была разработана расширенная версия схемы водоотлива с активной очисткой рудничных вод, где выбывшие из эксплуатации водосборники используются в качестве накопителей воды для технологических нужд (рис. 5).

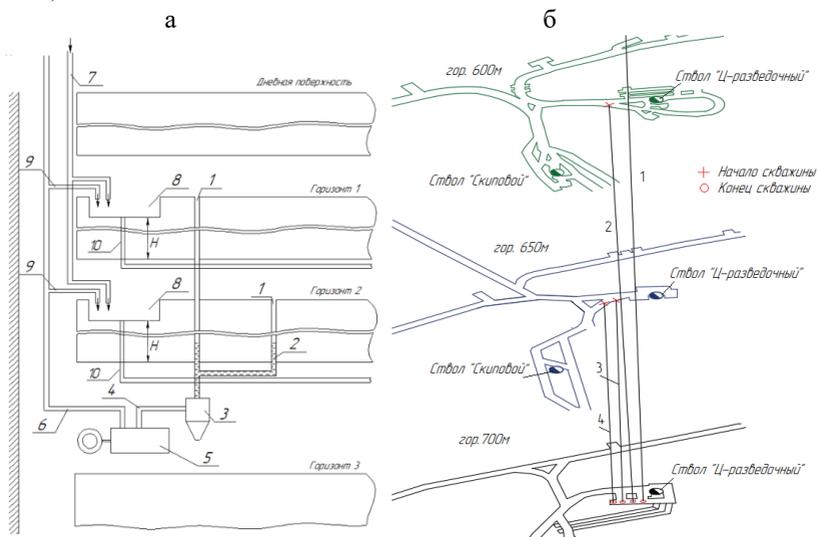


Рисунок 5. Схема водоотлива с очисткой и обратным водоснабжением: а – структурная схема, б – применительно к выработкам шахты «Центральная»

Принцип действия схемы водоотлива с обратным водоснабжением (рис. 5, а) схож со схемой очистки, представленной на рисунке 3, а. Отличительной особенностью схемы является конструкция высоконапорного трубопровода 6, который оснащен трубными отводами 9 для наполнения очищенной рудничной водой подземных резервуаров 8, объемом $V_{\text{выр.пр.}} \geq Q_{\text{техн.ном.}} \cdot t_{\text{потр.}}$, M^3 , где: $Q_{\text{техн.ном.}}$, $M^3/ч$ – номинальный расход технической воды оборудованием рудника; $t_{\text{потр.}}$, ч – время непрерывной эксплуатации оборудования. При этом эксплуатация такой схемы возможна только при условии глубины

разработки $H_{г.р.} > H_{техн.мин.}$, где водяной столб высотой H , м, способен обеспечить в трубопроводе 10 гидравлический напор $H_{техн.мин.}$, м, не ниже требуемого по техническим характеристикам применяемого оборудования на основных (бурение, закладка) и вспомогательных (орошение забоев, промывка трубопроводов, обеспыливание) технологических процессах.

Например, если для буровой установки, где в качестве промывочной жидкости применяется вода, необходим напор $H_{техн.мин.}$ не менее 1 МПа, или 102 м вод. ст., то для гидравлического перфоратора необходим рабочий напор $H_{техн.мин.}$ 10 МПа, или 1020 м вод. ст. Следовательно, разработанная схема с обратным водоснабжением для технологических нужд способна применяться преимущественно для обеспечения водой низконапорного оборудования.

Для определения оптимальной схемы водоотлива рудника разработан алгоритм выбора (рис. 6), предусматривающий учет природных и техногенных факторов, применяемую на руднике схему водоотлива и разработку компенсационных мероприятий по регулированию водопритока в рудник.

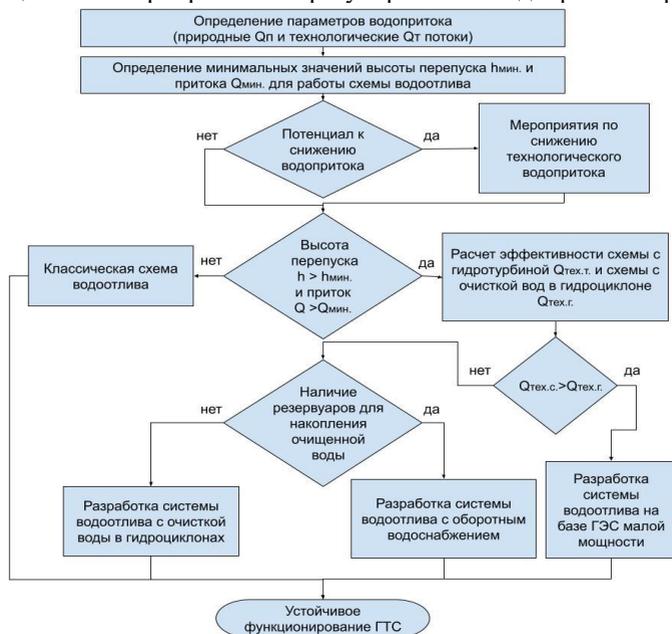


Рисунок 6. Алгоритм выбора схемы водоотлива по параметрам водопритока и минимальному значению высоты перепуска

Выполненный комплексный аудит системы водоотлива шахты «Центральная» АО «ЮГК» показал, что в гидрогеологическом отношении Кочкарское рудное поле характеризуется наличием трещинных вод, питающихся в своей основе преимущественно за счет атмосферных осадков. На базе проведенных исследований по разработанному алгоритму установлено, что

по энергетическим параметрам для условий шахты «Центральная» предпочтительна схема водоотлива с оборотом очищенной рудничной воды, представленная на рисунке 5, б. На этом рисунке показана система перепускных скважин применительно к действующим горизонтам шахты «Центральная». При этом для сохранения энергии гидропотоков скважины располагаются преимущественно перпендикулярно горизонту главного водоотлива гор. 700 м. Гидравлическая обвязка коллектором 7 (см. рис. 3, а) выполняется в машинном зале главной водоотливной станции, а в качестве емкости для хранения очищенной воды выступает водосборник гор. 512 м.

Технико-экономический анализ всех предлагаемых вариантов схем водоотлива, применительно к условиям Кочкарского месторождения, показал, что чистый срок окупаемости инвестиций для схемы с использованием очистки вод составляет 3,6 года, для схемы с использованием водооборота технологической воды – 3,4 года. При этом система водоотлива с ГЭС малой мощности в условиях шахты «Центральная» не окупается, что связано с малым объемом генерации электрической энергии на фоне больших эксплуатационных затрат.

При переходе на разработанные схемы водоотлива необходимо учитывать тот факт, что при строительстве новой системы необходима поддержка работоспособности действующей. Так, на рисунке 7 показаны пути перехода на разработанные схемы водоотлива.

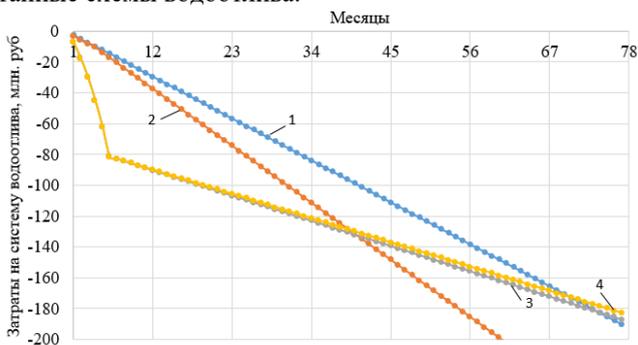


Рисунок 7. Вложения на пути перехода к разработанным схемам водоотлива с поддержанием работоспособности действующей системы: 1 – действующая система; 2 – схема водоотлива с применением малой ГЭС; 3 – схема с очисткой в гидроциклонах; 4 – схема с оборотом очищенной технологической воды

Схема 2 (рис.7) на базе малой ГЭС при горизонте расчета 6,5 года превосходит действующую – 1 по эксплуатационным издержкам, в то время как при переходе на схемы 3 и 4 за время строительства требуется значительно больше первоначальных затрат. Это обусловлено необходимостью поддержки действующей системы водоотлива для исключения риска затопления рудника, что потребует порядка 16 млн руб. в год. В таком случае срок окупаемости разработанных схем возрастает до 5,7 года для схемы с очисткой воды и до 5,3 года для схемы с оборотом технологической воды.

Заключение

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, дано решение актуальной научно-технической задачи: обоснованы параметры энергоэффективной схемы водоотлива подземного рудника с использованием энергии гидропотоков, отличающейся учетом взаимосвязи пространственного расположения и конструктивных параметров горных выработок, объема перемещаемых в них гидропотоков с определением рационального распределения по глубине и в плане горнотехнической системы гидротехнического оборудования для повышения эффективности функционирования подземного рудника.

Основные результаты проведенных исследований заключаются в следующем:

1. В ходе проведения анализа и обобщения мирового опыта использования энергии гидропотоков для повышения энергоэффективности подземных рудников определены новые подходы к снижению общего энергопотребления системой водоотлива путем преобразования потенциальной энергии гидропотоков в электрическую и использования энергии гидропотоков для повышения эффективности работы применяемого оборудования без внешнего энергопотребления путем рациональной взаимосвязи конструктивных параметров горных выработок и гидродинамического оборудования.

2. Разработана методика определения параметров горнотехнической системы с применением гидротехнических установок для преобразования энергии гидропотоков в подземном руднике с учетом влияния природных и техногенных факторов на объем водопритока в подземные выработки, гидрогеологических и климатических условий, глубины ведения горных работ, доли собственной энергии в энергетическом балансе рудника, пространственного расположения горных выработок, содержания взвешенных веществ в локальных гидропотоках подземных горизонтов.

3. Установлены области предпочтительного применения различных типов гидроустановок, и определено, что по условиям эксплуатации предпочтительной для подземного рудника является деривационная структура ГЭС с применением активного типа рабочего колеса в гидротурбине, поскольку потоки рудничных вод обладают небольшим в масштабах гидроэнергетики расходом воды при высоких и сверхвысоких напорах – до 1200 м, недостижимых для других типов турбин. Теоретическими расчетами и лабораторными экспериментами установлена возможность генерации электроэнергии на ГЭС малой мощности в условиях шахты «Центральная» до 119 кВт·ч.

4. Опытными-промышленными испытаниями разработанной конструкции малой ГЭС в условиях шахты «Центральная» на Кочкарском золоторудном месторождении установлено, что генерация электрической энергии в действующей системе водоотлива ниже теоретических оценок потенциала и лабораторных испытаний на 33 и 21% соответственно. Доказано, что в условиях

рудника за счет нестабильности водопритоков, неоднородности и шероховатости стенок канав и скважин нарушаются условия непрерывности потока к гидротурбине, поэтому для увеличения генерируемой мощности микроГЭС необходимо создание сети водосборников на вышележащих горизонтах, рассчитанных на локальный по выработкам объем поступления рудничной воды с учетом времени осаждения взвешенных частиц, при этом перепуск объединенного гидропотока к турбине должен осуществляться по вертикальным или крутонаклонным, обсаженным трубой скважинам.

5. Компьютерное моделирование режимов работы энергоэффективной системы водоотлива с очисткой рудничных вод выявило возможность их очистки в гидроциклонах без внешнего энергопотребления за счет создания достаточного для работы гидроциклонов давления в перепускаемых гидропотоках. Например, для эффективной работы гидроциклона ПВО-ГЦ-1200 требуется входное давление 0,25–0,8 МПа, которое способен обеспечить водяной столб в полости перепускных скважин системы перепуска высотой до 82 м. Увеличение высоты перепуска потока в схемах с использованием гидроциклона на каждые 10 метров создает дополнительное подпорное входное давление, способное увеличить производительность насосных агрегатов на 1% при неизменном потреблении электроэнергии, при этом максимальная величина увеличения производительности определяется техническими характеристиками гидроциклона.

6. Установлено, что незначительное потребление – до 5% очищенной в гидроциклонах технологической воды на бурение, закладку выработанного пространства, промывку трубопроводов, орошение забоев, обеспыливание, пожаротушение и прочие технологические процессы способно снизить требуемую высоту подъема жидкости насосными агрегатами на 3%, при этом целесообразность применения подобной схемы определяется глубиной разработки, при которой необходимо обеспечить высоту водяного столба в перепускных скважинах для образования рабочего напора в технологическом оборудовании.

7. Техничко-экономическая оценка эффективности инновационных схем на базе шахты «Центральная» АО «ЮГК» показала, что величина годовой экономии при реализации схемы с очисткой воды составляет 15 млн руб. в год, а схемы с оборотом рудничной воды для технологических нужд – 15,8 млн руб. в год, при этом схема с применением ГЭС малой мощности характеризуется убытком 7,4 млн руб. в год. Чистый срок окупаемости инновационных схем водоотлива с очисткой и с оборотом воды для технологических нужд составляет 3,6 и 3,4 года соответственно. С учетом постепенного перехода с поддержания в работе действующей системы водоотлива, необходимой для отведения рудничной воды во время внедрения новых схем, срок окупаемости составляет 5,7 года для системы с очисткой и 5,3 года для системы с водооборотом технологической воды.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК России:

1. Рыльникова М.В., Струков К.И., Князькин Е.А., Туркин И.С. Систематизация и закономерности формирования техногенных источников энергии при разработке рудных месторождений – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. Вып. 3. – Тула : Издательство ТулГУ, 2019. – С. 171-183.

2. Князькин Е.А. Перспективы увеличения энергетического потенциала георесурсов при освоении месторождений золотоносных руд компании «ЮГК» – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. Вып. 1. – Тула : Издательство ТулГУ, 2020. – С. 448-458.

3. Туркин И.С., Князькин Е.А., Бондаренко А.А. Исследование технологии производства электроэнергии от потоков гидросмесей для повышения энергоэффективности освоения золоторудных месторождений – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. № 3. – Москва : Горная книга, 2020. – С. 138-150.

4. Князькин Е.А. Бедретдинов Р.Ш. Энергоэффективная схема водоотлива с функцией пополнения подземных резервуаров системы пожаротушения – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. Вып. 1. – Тула : Издательство ТулГУ, 2021. – С. 101-110.

Патент РФ:

5. Патент № 2742480 Российская Федерация, МПК E02D 19/06 (2006.01), E02D 19/06 (2020.08). Способ водоотлива горного предприятия : № 2020122079 : заявл. 03.07.2020 : опубл. 08.02.2021. / Рыльникова М.В., Федотенко В.С., Князькин Е.А. – 4 с. : ил. – Текст : непосредственный.

Статьи в других изданиях:

6. Струков К.И., Князькин Е.А., Туркин И.С. Принципы проектирования рудников с учетом возможности генерации электроэнергии за счет энергии свободных потоков гидросмеси – Текст : непосредственный // Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях: Сборник материалов четырнадцатого международного симпозиума. – Белгород : ИД Белгород НИУ БулГУ, 2019. – С. 162-165.

7. Князькин Е.А., Туркин И.С. Исследование параметров процессов и условий рекуперации энергии гидропотоков в условиях подземных месторождений – Текст : непосредственный // Решение технологических и экологических проблем горных производств на территории России, ближнего и дальнего зарубежья: Сборник материалов VI Международной научно-технической конференции. – Москва : ОА «ВНИПИПромтехнологии», 2019. – С. 114-116.

8. Князькин Е.А. Обоснование структуры горнотехнической системы с возможностью преобразования потенциальной энергии перегочных шахтных вод рудника в электрическую – Текст : непосредственный // Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу: Материалы докладов международной конференции. – Магнитогорск : МГТУ, 2019. – С. 282–287.

9. Князькин Е.А. Обоснование структуры горнотехнической системы в связи с внутрирудничной генерацией электроэнергии от технологических гидросмесей – Текст : непосредственный // Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу: Материалы докладов международной конференции. Тезисы. – Магнитогорск: МГТУ, 2019. – С. 78-79.

10. Князькин Е.А., Бондаренко А.А. Повышение энергоэффективности горнотехнических систем при комплексном освоении месторождений в условиях Севера – Текст : непосредственный // Наука и инновационные разработки – Северу: II Международная научно-практическая конференция: Сборник материалов конференции в 2 частях, часть I. – Мирный : Мирнинская городская типография, 2019. – С. 139-142.

11. Князькин Е.А. Обоснование параметров гидротурбинной установки для генерации электрической энергии в условиях подземного рудника – Текст : непосредственный // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: Материалы 14-й Международной научной школы молодых ученых и специалистов. – Москва : ИПКОН РАН, 2019. – С. 213-215.

12. Струков К.И., Князькин Е.А., Туркин И.С. Энергия шахтной воды как дополнительный источник питания системы электроснабжения подземных рудников золоторудных месторождений – Текст : непосредственный // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность: материалы международной научно-практической конференции. – Севастополь : СевГУ, 2019. – С. 1573-1576.

13. Рыльникова М.В., Гаджиева Л.А., Князькин Е.А. Определение масштабов подсистемы возобновляемой энергетики подземного рудника в зависимости от гидрогеологических условий месторождения – Текст : непосредственный // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: Материалы 14-й Международной научной школы молодых ученых и специалистов. – Москва : ИПКОН РАН, 2019. – С. 221-223.

14. Князькин Е.А. Энергоэффективная схема водоотлива подземного рудника с использованием энергии перепускаемых шахтных вод – Текст : непосредственный // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр: Материалы конференции Международной научной школы академика К.Н. Трубецкого. – Москва : ИПКОН РАН, 2020. – С. 328-330.

15. Rylnikova M., Knyazkin E. Substantiation of parameters of the energy-efficient water outflow scheme of underground mine using energy of hydro-flows // VIII International Scientific Conference «Problems of Complex Development of Georesources»: E3S Web Confirence. Vol. 192, 03004, 2020.

16. Князькин Е.А., Бедретдинов Р.Ш. Энергоэффективная схема водоотлива с комплексным использованием энергии гидропотоков и наполнением подземных резервуаров для пожаротушения – Текст : непосредственный // ЗОЛОТО. ПОЛИМЕТАЛЛЫ. XXI ВЕК: Материалы II Всероссийской научно-практической конференции. – Пласт : ИПКОН РАН 2020. – С. 41-43.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90099.