

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
проблем комплексного освоения недр  
им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук**

*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)»**

**Диссертация**

**на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Научный руководитель:**

**профессор, доктор технических наук  
М.В. Рыльникова**

**Москва 2021**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИЗ МИРОВОГО ОПЫТА РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ ТЕХНОГЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ГЕОТЕХНОЛОГИЙ .	10
1.1. Закономерности изменения энергопотребления при добыче твердых полезных ископаемых .....	10
1.2. Мировой опыт использования потенциальной энергии техногенных водных ресурсов .....	15
1.3. Анализ конструкции гидротурбин в связи с изысканием энергоэффективных схем водоотлива подземных рудников.....	26
1.4. Конструктивные особенности существующих схем рудничного водоотлива и их влияние на устойчивость функционирования подземных рудников .....	34
1.5. Природные и техногенные факторы, определяющие подход к рекуперации энергии гидропотоков.....	43
1.6. Цель, задачи, методы исследований .....	49
2. РАЗВИТИЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ТЕХНОЛОГИИ ВОДООТВЕДЕНИЯ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ ГИДРОПОТОКОВ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ОСВОЕНИИ НЕДР.	53
2.1. Динамика и взаимосвязь объемов притока шахтных вод и водоотведения в различных горногеологических и горнотехнических условиях .....	53
2.2. Исследование и обоснование конструктивных параметров системы водоотлива с применением малых гидроэлектростанций .....	60
2.3. Обоснование структуры и функциональной схемы водоотлива с активной очисткой шахтных вод и обратным водоснабжением.....	66
2.4. Методика проведения диссертационных исследований.....	76
Выводы по главе 2 .....	79
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЙ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ ГИДРОПОТОКОВ.....	80
3.1. Специфика гидротехнических и гидрогеологических условий исследований подземных технологий рекуперации энергии .....	80
3.2. Экспериментальное определение влияния конструктивных параметров системы водоотлива на показатели эксплуатации в условиях подземного рудника .....	86
3.3. Компьютерное моделирование и экспериментальное определение параметров разработанной схемы водоотлива.....	99
3.4. Требования к системе водоотлива при подземной разработке рудных месторождений с рекуперацией энергии гидропотоков.....	113
3.5. Разработка алгоритма выбора способа рекуперации энергии гидропотоков.....	121
Выводы по главе 3 .....	126

4. СПОСОБЫ ВНЕДРЕНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И ОЦЕНКА ИХ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ .....	128
4.1. Разработка технологических решений по совершенствованию схемы водоотлива с обеспечением рекуперации энергии гидропотоков .....	128
4.2. Обоснование параметров системы водоотлива шахты «Центральная» с рекуперацией энергии гидропотоков .....	129
4.3 Энергетическая и технико-экономическая оценка рекомендаций по внедрению разработанных схем водоотлива .....	134
Выводы по главе 4 .....	141
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	143
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	146

## ВВЕДЕНИЕ

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 схемы 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 шахтных гидропотоков и совершенствования схемы водоотведения подземного рудника в целом.

Достижение поставленной цели и реализация идеи обеспечены решением 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 шахтных 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 шахтных гидропотоков в различных режимах работы системы водоотлива, физическое моделирование процесса откачки шахтных 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  $V_{\text{водосб.}} = \frac{N_{\text{гэс}}}{H\rho g} \cdot t_{\text{осажд.}}, \text{ м}^3$ , 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 перепуска;  $\rho$ ,  $кг/м^3$  – плотность воды;  $g$ ,  $м/с^2$  – ускорение свободного падения;  $t_{\text{осажд.}}$ ,  $с$ , – время осаждения взвешенных частиц в гидротоке;  $Q_{\text{ест.}}$ ,  $м^3/с$  – естественный максимальный водоприток;  $Q_{\text{техн.}}$ ,  $м^3/с$  – 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 гидротоков 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 гидротоков системы рудничного водоотлива после очистки воды в гидроциклонах достигается формированием на вышележащих горизонтах накопительных емкостей объемом  $V_{\text{выр.пр.}} \geq Q_{\text{техн.ном.}} \cdot t_{\text{потр.}}$ ,  $м^3$  и при глубине разработки  $H_{\text{г.р.}} > H_{\text{техн.мин.}}$ ,  $м$ , где  $Q_{\text{техн.ном.}}$ ,  $м^3/с$  – 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 шахтной 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); 14й 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); 14я 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, 4 глав, заключения и содержит 69 рисунков, 32 таблицы, библиографический список из 113 наименований.

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

# 1. АНАЛИЗ МИРОВОГО ОПЫТА РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ ТЕХНОГЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ГЕОТЕХНОЛОГИЙ

## 1.1. Закономерности изменения энергопотребления при добыче твердых полезных ископаемых

Принятый в конце 2009 г. Федеральный закон N 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» внес ряд существенных новаций в обязанности потребителей энергоресурсов, в том числе связанных с их учетом на всех стадиях производственного цикла с проведением регулярных обязательных мероприятий по проведению энергоаудита для повышения энергоэффективности горного производства.

Снижение удельной энергоемкости продукции является основой повышения конкурентоспособности отечественных горнодобывающих предприятий. Поэтому эффективное или рациональное использование энергетических ресурсов крайне важно на современном этапе экономического развития и заключается в использовании меньшего количества энергии для обеспечения неизменного, а иногда и увеличенного объема производства.

Помимо стимулирующих действий со стороны правительства РФ, о необходимости снижения энергетической составляющей в единице готовой продукции говорят статистические данные с официального сайта Росстата по изменению динамики потребления электрической энергии в Российской Федерации с 2005 по 2018 год, приведенные на рисунке 1.1 [107]. Из графиков на рисунке 1.1 видно, что электропотребление в России за последний 13-ти летний период характеризовалось положительной динамикой роста, за исключением периодов с негативной экономической ситуацией в мире. Тенденцию роста можно наблюдать, анализируя уравнение линии тренда, которое представляет собой график линейной регрессии на заданном временном отрезке. При положительном коэффициенте регрессии –  $a$ , равном 1,1406, линейная функция возрастает, что соответствует динамике роста энергопотребления на в 14,8% на всем промежутке

времени. В то время коэффициент регрессии электропотребления в промышленном секторе значительно ниже и равен 0,4265, что представляет собой 5,5% роста за анализируемый период, соответственно.

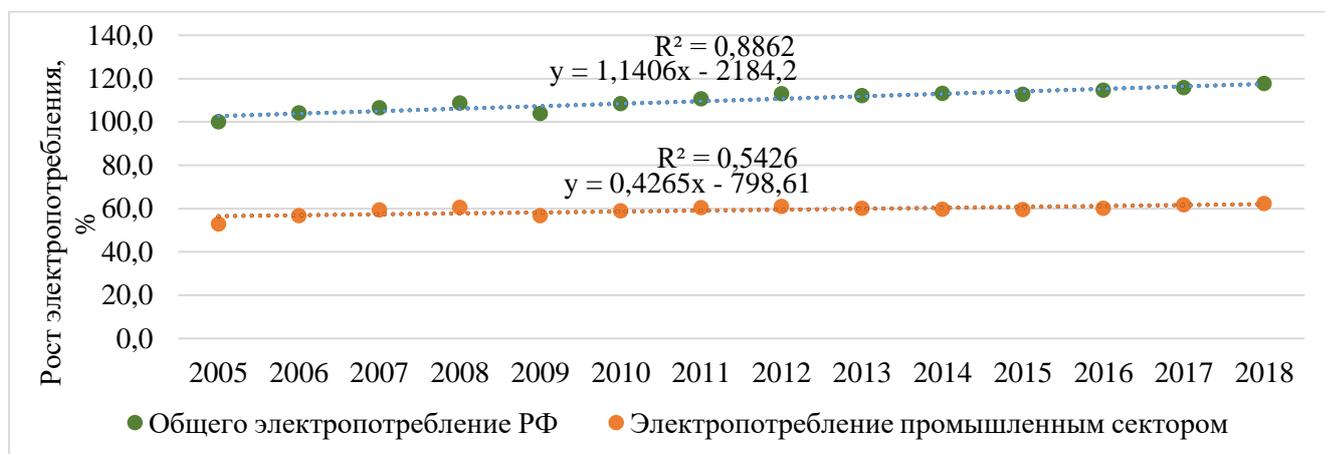


Рисунок 1.1 – Динамика роста общего электропотребления страной и промышленным сектором за временной промежуток с 2005 по 2018 год.

Также стоит отметить, что электропотребление в промышленном секторе составляет, в среднем значении, 53,8% от общего электропотребления РФ и в динамике имеет тенденцию к снижению, о чем говорит отрицательный коэффициент регрессии -0,1662 (рис.1.2). При этом доля горнодобывающей отрасли в промышленном секторе составляет, в среднем, 21,9 % и имеет тенденцию постоянного роста. Так, за рассматриваемый период 2005-2018 гг. доля энергопотребления в горнодобывающей отрасли увеличилась на 5,7 % и составила в общей сложности 24,7% на конец 2018 года.

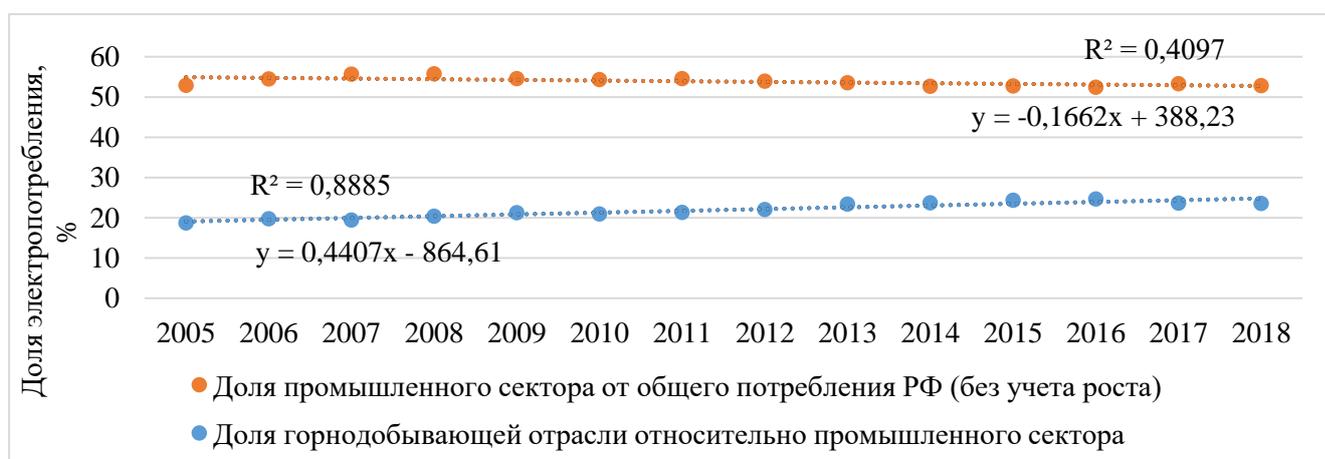


Рисунок 1.2 – Динамика электропотребления промышленным сектором от общего электропотребления РФ и горнодобывающей отрасли от потребления промышленного сектора за временной промежуток с 2005 по 2018 год.

Снижение доли электропотребления в промышленном секторе, о котором свидетельствует рисунок 1.2, обусловлено несколькими причинами: введением энергоэффективных технологий, переходом на эксплуатацию электрооборудования в энергосберегающем режиме, снижением производственных мощностей. Для выявления причины снижения электропотребления использован индекс производства, предоставляемым Росстатом, который представляет собой относительный показатель, характеризующий изменение масштабов производства относительно предыдущего периода. Также индекс производства используется при анализе динамики физических объемов выпущенной продукции.

Так, на рисунке 1.3 представлена динамика индекса производства промышленного сектора за рассматриваемый период. Из анализа уравнения линии тренда становится очевидна причина снижения доли от общего электропотребления РФ, о чем свидетельствует отрицательный показатель коэффициента регрессии, равного  $-0,1758$ , что, в свою очередь говорит о снижении производства физического объема продукции в среднем на  $2,3\%$  за рассматриваемый период.

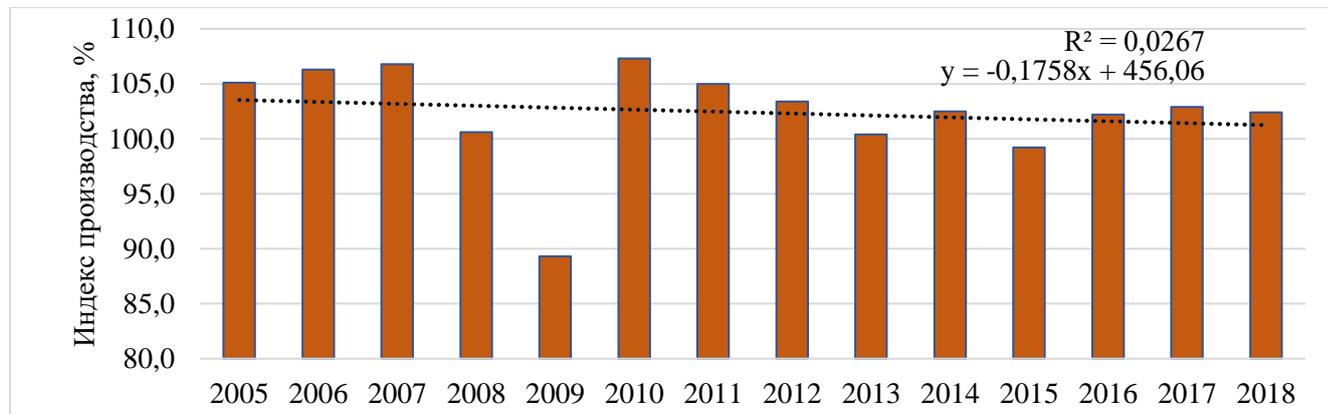


Рисунок 1.3 – Динамика индекса производства промышленного сектора России за период.

В это же время в горной промышленности наблюдается противоположная ситуация: динамика индекса производства за рассматриваемый период растет (рис.1.4).

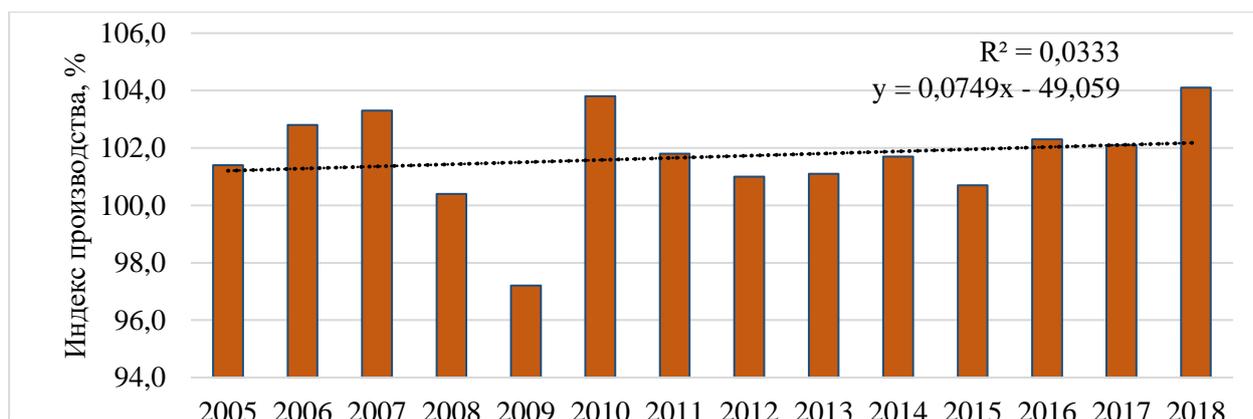


Рисунок 1.4 – Динамика индекса производства горнодобывающей отрасли России за рассматриваемый период.

Анализ динамики индекса производства в горной промышленности России свидетельствует о весьма малом среднегодовом росте – 1%, при неизменном уровне объемов производства товарной продукции.

Более наглядно об этом свидетельствует график динамики роста затрат электроэнергии на выпуск единичного объема товарной продукции, представляющий собой объем производства данного вида продукта в натурально-вещественном выражении, в горнодобывающей отрасли России за тот же промежуток времени (рис.1.5). По данным рисунка 1.5 наблюдается за анализируемый период стабильный 42% рост потребления электроэнергии на единицу выпускаемой товарной продукции, что в среднегодовом значении составляет 3,3%.

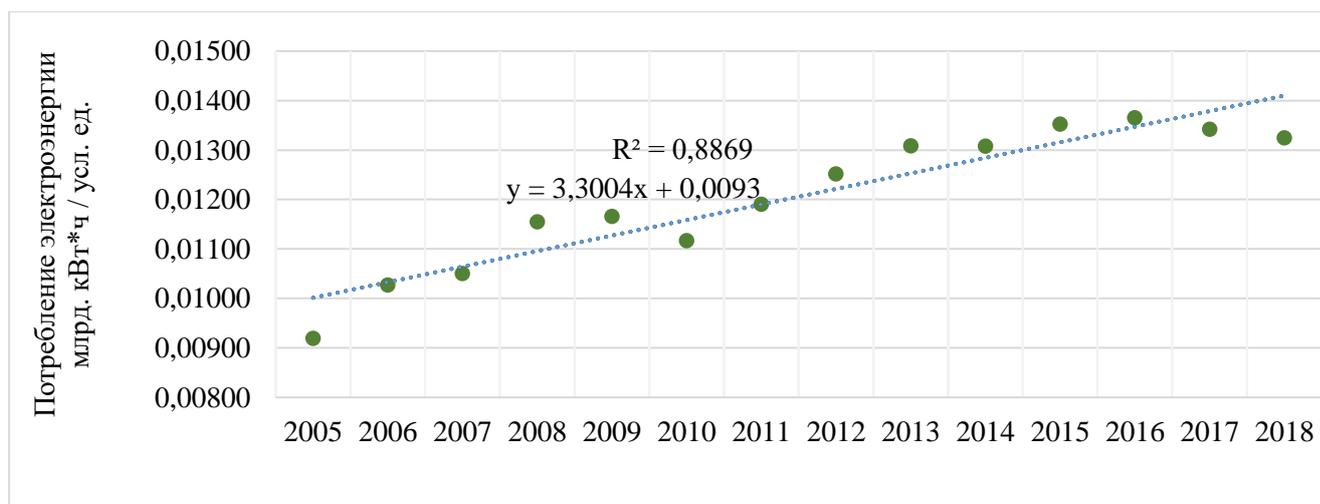


Рисунок 1.5 – Динамика роста затрат электроэнергии на выпуск единичного объема товарной продукции в горнодобывающей промышленности

Учитывая описанные выше факты, видно, что электропотребление в горной промышленности растет, а объемы выпускаемой продукции остаются практически неизменными. Тенденция увеличения энергоемкости в горной промышленности, в первую очередь, объясняется значительным ростом глубины ведения горных работ [57]. В этой связи, наиболее затратными статьями в структуре себестоимости добычи руды становятся:

- расходы на процессы управления состоянием массива, которые на больших глубинах связаны, как правило, с закладкой выработанного пространства;
- процессы доставки и подъема горной массы на поверхность;
- процессы осушения и проветривания глубоких горизонтов.

Снижение энергоемкости указанных процессов возможно за счет совершенствования механизации горных работ, а также за счет применения энергоэффективных технических и технологических решений, которые на больших глубинах приобретают особую значимость.

Вопрос повышения энергоэффективности является крайне важной задачей. Так, например, в исследованиях [74] выявлено, что доля энергетической составляющей в себестоимости готовой продукции на некоторых горнодобывающих предприятиях достигает 37-40%, что неблагоприятно сказывается в период устойчивого роста цен на энергоресурсы.

Первоочередным этапом на пути к повышению энергоэффективности горных предприятий является проведение энергоаудита – комплекса технических, организационных, экономических и иных мероприятий, направленных на выявление возможностей экономически эффективной оптимизации потребления энергетических ресурсов [68].

В 1999 г. в НИИГМ им. М. М. Федорова [50] были определены основные направления в проведении энергоаудита, главным из которых является поиск наиболее энергоемких технологических процессов, так как повышение энергоэффективности у таких энергопотребителей приносит ощутимый экономический эффект даже при незначительной доле снижения потребления электрической энергии.

В результате анализа работ [55,102,37,58,3,18] выявлены наиболее энергоемкие технологические процессы при добычи твердых полезных ископаемых, на основе которых составлена гистограмма (рис.1.6).

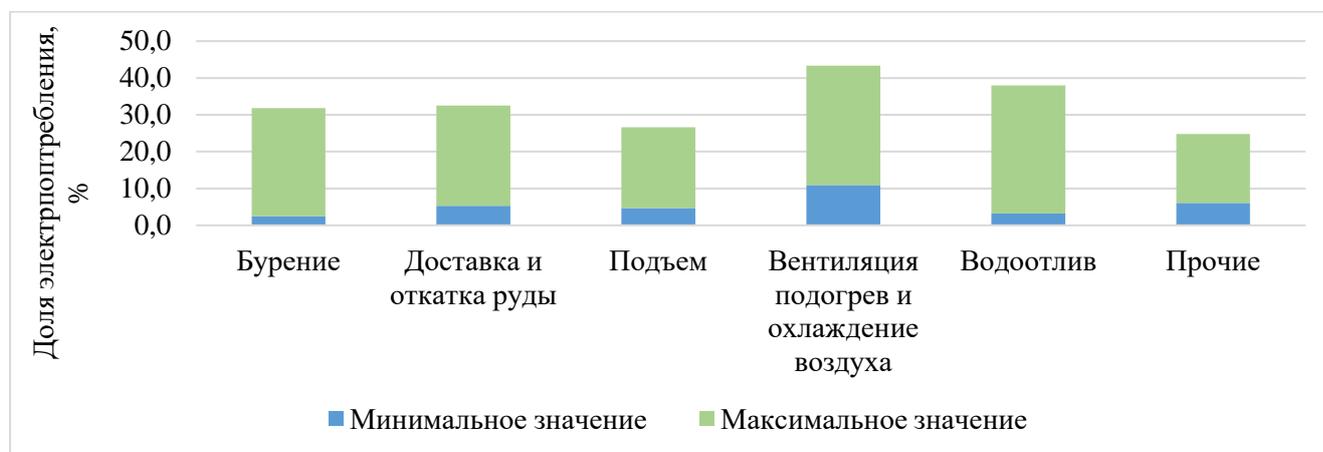


Рисунок 1.6 – Доля потребления электрической энергии технологическими процессами от общего электропотребления горного предприятия.

Проведенный анализ показал, что наиболее энергоемкими технологическими секторами при подземной добыче твёрдых полезных ископаемых являются: производство сжатого воздуха для использования в пневматических установках; доставка и откатка рудной массы; подъем горной массы на поверхность; проветривание и кондиционирование горных выработок; осушение глубоких выработок от шахтных вод; совокупность прочих электропотребителей.

Подход к снижению объема электропотребления выделенными выше технологическими секторами является наиболее эффективным и актуальным на современном этапе ведения горных работ, поскольку внедрение энергоэффективных технологий в ту или иную систему влечет ощутимое снижение доли стоимости электрической энергии в себестоимости единицы готовой продукции [70].

## 1.2. Мировой опыт использования потенциальной энергии техногенных водных ресурсов

В ходе приведенного ранее анализа динамики электропотребления различных технологических процессов установлено, что существенной

энергоемкостью обладает система шахтного водоотлива. Так, в ряде случаев ее доля доходит до 50% от общего электропотребления горного предприятия. Определяющими причинами такой высокой энергоемкости водоотливных систем являются [42,93,47]: значительное содержание твердых частиц в перекачиваемой воде, что ведет к умышленному завышению мощности шахтных насосов; постоянно увеличивающаяся глубина ведения горных работ и, соответственно, рост объемов осушения; растущие объемы поступления шахтной воды; низкие электромеханические показатели гидроустановок; несовершенные системы управления водоотливными установками и др.

Среди перечисленных причин глубина осушения и объемы поступающей шахтной воды, зачастую, имеют первостепенное значение в увеличении энергоемкости систем водоотведения. Но, с другой стороны, с увеличением глубины они же являются потенциальными дополнительными источниками энергии, которую возможно и необходимо использовать для компенсации части энергии, затрачиваемой на осушение горных выработок.

Идея использования потенциала энергии гидротоков, перепускаемых под действием силы тяжести в ходе осуществления технологических процессов, не нова, как в отечественной, так и в зарубежной практике.

Так, например, при одновременной разработке нескольких горизонтов с середины прошлого века на практике применяются схемы водоотлива с использованием напора воды с верхнего горизонта в процессе выдачи ее на дневную поверхность (рис. 1.7) [91, 110].

В представленной на рисунке 1.7 схеме осушение глубоких горных выработок использование энергии осветленной шахтной воды осуществляется в следующей последовательности:

– перепускаемая под действием силы тяжести шахтная вода из водосборника вышележащего горизонта 1 по перепускному трубопроводу 2 поступает в магистральный трубопровод 3;

– шахтная вода из водосборника главного водоотливного горизонта 4 поступает в низконапорную насосную установку 5, откуда под давлением попадает

в магистральный трубопровод 3, где происходит ее объединение с потоком перепускаемой шахтной воды;

– объединенный поток из магистрали 3 поступает в высоконапорную насосную установку 6, благодаря которой гидропоток по вертикальному трубопроводу 5 попадает на дневную поверхность.

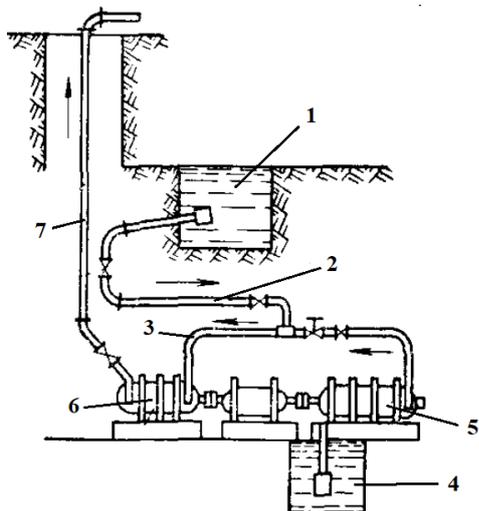
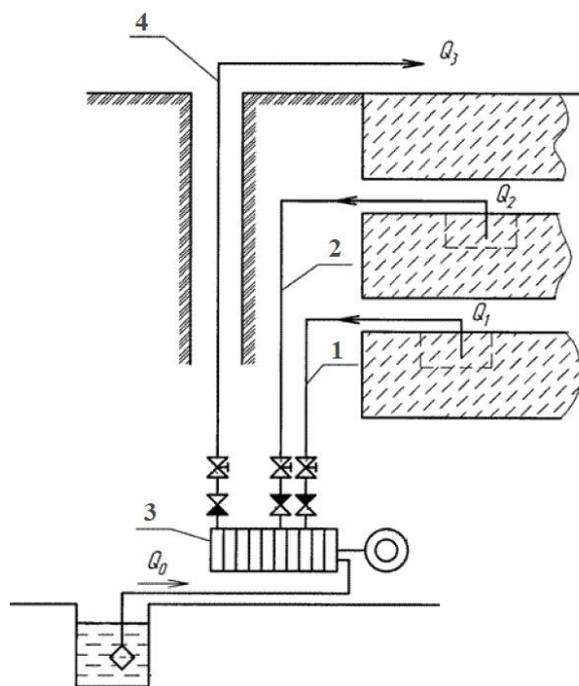


Рисунок 1.7 – Схема водоотлива с использованием энергии перепускаемой шахтной воды.

Представленный вариант использования энергии перепускаемых гидропотоков системы водоотлива горного предприятия имеет существенный недостаток, а именно: использование двух насосных агрегатов на валу одного электродвигателя, что влечет за собой усложнение инженерных коммуникаций для транспортировки гидропотоков на дневную поверхность, и, соответственно, увеличение стоимости конструкции и снижение надежности ее эксплуатации.

Рассмотренная система водоотлива с присущими ей недостатками послужила прототипом к изобретению [85], которое направлено на упрощение конструкции и удешевлению системы водоотлива. Формулой изобретения является система водоотлива горного предприятия (рис.1.8) с перепуском воды по трубопроводам 1 и 2 с промежуточных горизонтов к насосной установке 3, представляющая собой многоступенчатый центробежный насос с подключенными перепускными трубопроводами к входам колес соответствующего гидравлического давления и высоконапорным вертикальным трубопроводом 4, выдающим шахтную воду на дневную поверхность.

Рисунок 1.8 – Модернизированная схема водоотлива с использованием энергии перепускаемой шахтной воды.



Еще одним способом реализации потенциальной энергии гидропотоков в подземных условиях является использование гидротурбинных агрегатов, интегрированных в перепускную часть системы рудничного водоотлива или систему гидрозакладки. Так, выполненные в ИПКОН РАН исследования [56,95,29,53,98,97] показали, что наибольшим энергетическим потенциалом обладают формируемые на рудниках движущиеся вниз самотечные потоки гидросмесей, циркулирующие круглогодично и представленные загрязненными водами в системе водоотлива, стоков закладочных работ с применением твердеющих и гидравлических закладочных смесей на основе отходов добычи и переработки руд. Эти потоки формируются на горизонтах сбора поверхностных и подземных вод, на поверхностных закладочных комплексах, обогатительных фабриках, хвостохранилищах и преимущественно самотеком перемещаются вниз до главных горизонтов водоотлива или закладочных работ подземных рудников. Энергетический потенциал таких потоков достаточно велик и, как показали выполненные расчеты, сбор и преобразование их энергии в электрическую способно компенсировать до 40 – 50 % энергопотребления действующих рудников [56,20].

На основе проведенных исследований в ИПКОН РАН была разработана экспериментальная установка (рис.1.9 - а), смонтированная на фасадной части четырехэтажного здания (рис. 1.9 - б) [95,53,98,97]. Испытуемая часть конструкции

включала в себя гидротурбину 1 с электрогенератором 8, подключенного к щиту электрической нагрузки 10. Для обеспечения заданного потока жидкости на крыше здания разместили три емкости 6 общим объемом 3 м<sup>3</sup>. Жидкость из ёмкости по гибкому трубопроводу самотеком поступала в приемную воронку 5, далее по вертикальному трубопроводу 4 попадала на лопасти гидротурбины через сопло 2. Для соблюдения контроля и безопасности проведения эксперимента в вертикальный трубопровод установили аварийную задвижку 3 и манометр 7.

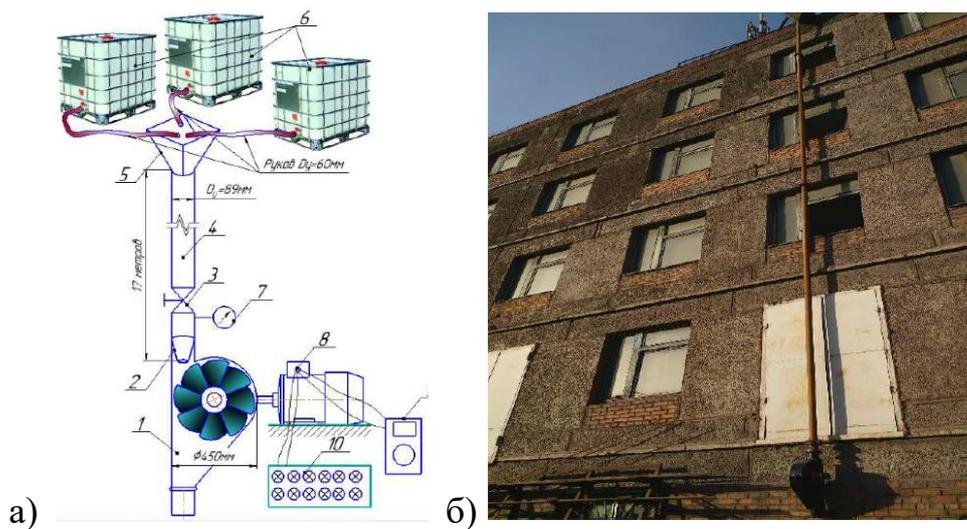


Рисунок 1.9 – Экспериментальная установка в наземных условиях: а – структура схемы, б – общий вид.

В результате проведенного эксперимента доказана возможность воспроизводства электроэнергии при перепуске гидросмесей по вертикальным скважинам в руднике, а также определены электротехнические характеристики для экспериментальной гидроустановки.

Помимо идеи использования энергии движущейся вниз жидкости в системах водоотлива и гидрозакладки, в горной промышленности встречается опыт использования системы рекуперации энергии в системе охлаждения глубоких выработок. Так, в статье [31] американского инженера Robert N. Torbin описан опыт использования энергии воды, перепускаемой вниз под действием силы тяжести в системе водного охлаждения глубоких выработок, посредством применения гидроагрегата. Эксперименты по возможности рекуперирования энергии проводились на территории шахты компании Helca Mining Company «Lucky Friday». Тепло, выделяющееся на глубинных выработках, пагубно влияет безопасность работ, поэтому для поддержания комфортной температуры на шахте

«Lucky Friday» была задействована схема охлаждения глубоких горизонтов. Система охлаждения представляла собой двухуровневую схему (рис.1.10), которая работает по следующему принципу:

- теплая вода из верхнего резервуара 1 поступает в охлаждающую остановку 2;

- охлажденная жидкость перекачивается в верхний резервуар холодной воды – 3, затем накопленная вода самотеком спускается вниз в нижний резервуар холодной воды 4;

- из нижнего резервуара 4 вода самотечно перемещается по наклонным выработкам, тем самым, охлаждая их, и скапливается в водосборнике нижнего горизонта уже будучи теплой – 5;

- из нижнего резервуара с теплой водой насосами жидкость нагнетается на горизонт охлаждения в емкость с теплой водой 1, тем самым, завершая цикл охлаждения выработок.

Затраты на существующую систему охлаждения негативно сказались на себестоимости товарной продукции, в связи с чем была предложена и в дальнейшем реализована идея рекуперации части энергии потоков посредством установки в трубопровод, соединяющий верхний и нижний резервуары с холодной водой, гидротурбины – Т с сочлененным с ней на одном валу генератором – G.

В проектных решениях инженером R. Torbin, помимо традиционной связки гидротурбина-электродвигатель, рассматривались и другие компоновки:

- гидротурбина-привод воздушного компрессора, предназначенного для закачки в резервуары сжатого воздуха, предлагалось использовать для нужд в ходе ведения горных работ;

- гидротурбина-привод гидронасоса, предназначенного для подъема нагретой жидкости в цикле системы охлаждения с нижнего резервуара с теплой водой в верхний;

- гидротурбина-привод гидронасоса-электродвигатель, комбинированная связка агрегатов, предназначенная для снижения электрических затрат на привод насосной установки.

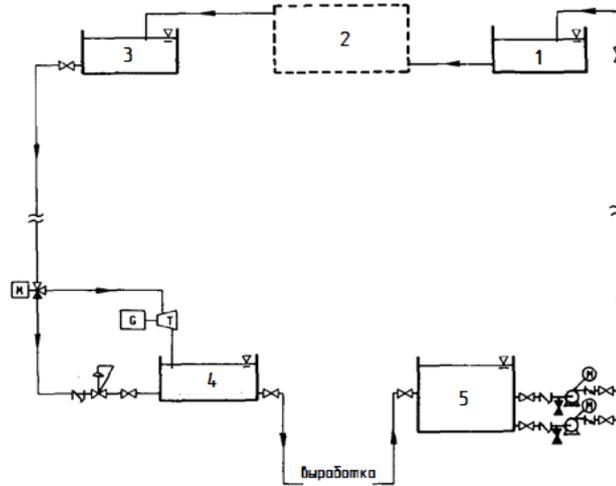


Рисунок 1.10 – Структура системы охлаждения глубоких выработок рудника «Lucky Friday» с внедренным гидроагрегатом.

Согласно выполненным экономическим расчетам, наиболее выгодной компоновкой в условиях рудника «Lucky Friday» оказалась связка гидротурбина – электрогенератор, которая в 1984 году была спроектирована и введена в эксплуатацию, благополучно проработала 12 месяцев, после чего прекратила работу, ввиду падения цен на серебро и, в связи с этим, временного закрытия шахты. За срок активной эксплуатации установка окупала треть от вложенных затрат на ее внедрение, что подтвердило теоретические расчеты Helca Mining Company по полной окупаемости гидроагрегата в течении трех лет.

Идея использования энергии перепускаемых вниз гидропотоков в системах охлаждения глубоких горных выработок активно развивается и на сегодняшний день, прежде всего, в связи с ростом тарифов на электроэнергию.

Так, в период с 2002 по 2017 годы золотодобывающие рудники Южной Африки столкнулись с проблемой увеличения тарифов электрическую энергию на 448%, что значительно снизило конкурентоспособность горных предприятий. В связи с этим снижение электропотребления рудником стало первостепенной задачей. Так как система водоотлива и охлаждения глубоких выработок занимала большую долю в общем электропотреблении рудников, были проведены мероприятия по совершенствованию системы шахтного водоотлива с применением устройств рекуперации энергии ERDs (Energy Recovery Devices). Наиболее перспективным направлением в развитии направления ERDs является система 3х сообщающихся камер 3-CPFS (three-chamber pipe feeder system) [36,11].

Главная идея системы 3-CPFS заключается в снижении электрических затрат на осушение и кондиционирование горных выработок за счёт использования эффекта сообщающихся сосудов. При этом принцип работы системы водоотлива и кондиционирования не имеет существенных отличий от традиционных систем, за исключением способа подключения гидронасосов и дополнительных резервуаров.

На рисунке 1.11 продемонстрировано преимущество системы 3-CPFS на примере каскадной системы водоотлива. Так, с горизонта 66 м происходит откачка теплой шахтной воды при помощи шести насосных установок, в то время как на горизонте 45 м находится три высоконапорных насоса для аварийной откачки шахтной воды, а отвод шахтной воды из выработок происходит за счет системы 3-CPFS.

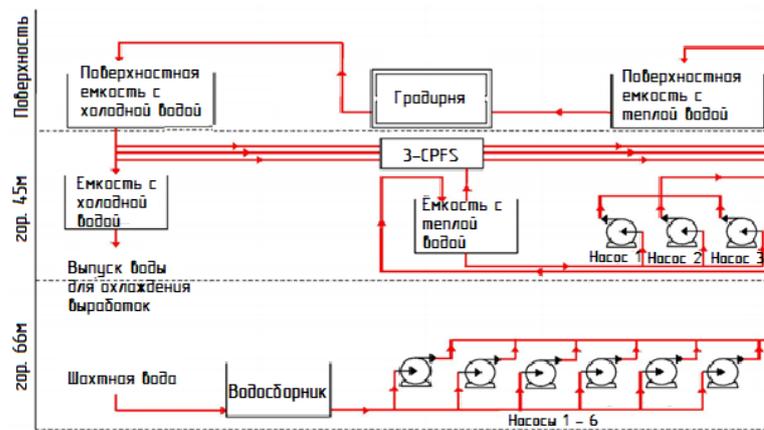


Рисунок 1.11 – Структурная схема водоотлива с применением системы 3-CPFS.

Принцип работы системы 3-CPFS основан на одном из главных законов гидростатики – эффекте сообщающихся сосудов (рис. 1.12). Система состоит из трех камер для хранения воды, симметрично расположенных на одном уровне, каждая из которых осуществляет три действия за полный цикл процесса:

1. Заполнение: камера 1 низконапорными насосами через открытый клапан 4 активно заполняется нагретой от выработок шахтной водой, тем самым вытесняя через клапан 5 охлажденную воду в пространство выработок.

2. Выравнивание: процесс выравнивания давления в камере 2 через клапан 6 между камерой и высоконапорным трубопроводом, осуществляющим перепуск охлажденной воды с поверхности в сторону выработанного пространства. Такое

действие необходимо для снижения риска возникновения гидроудара и разрушения гидроконструкций.

3. Опорожнение: процесс вытеснения нагретой горными выработками шахтной воды в камере 3 через клапан 8 на земную поверхность за счет давления через клапан 7, создаваемого водой, перемещающейся вниз для охлаждения выработанного пространства.

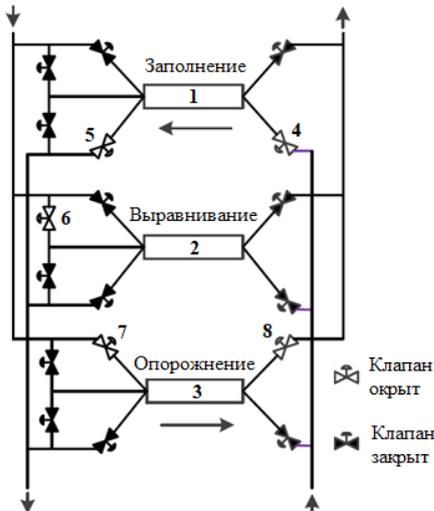


Рисунок 1.12 – Функциональная схема работы системы 3-CPFS.

Описанный цикл поочередно проходит в каждой камере и именно за счет присутствия в системе трех камер осуществляется не только непрерывность процесса выдачи шахтной воды на земную поверхность, но и при этом повышается КПД системы, что подтверждают исследования, выполненные в North-West University (Южная Африка) [22].

Также в исследованиях North-West University проведено сравнение эффективности применения систем водоотлива с возможностью кондиционирования глубоких выработок на основе рекуперации энергии через 3-CPFS и гидротурбинную установку. Основным недостатком системы 3-CPFS является высокая стоимость монтажа и длительность процесса пуско-наладочных работ, об этом свидетельствует график денежных потоков и срока окупаемости системы кондиционирования в сравнении с гидротурбинной установкой (рис. 1.13).

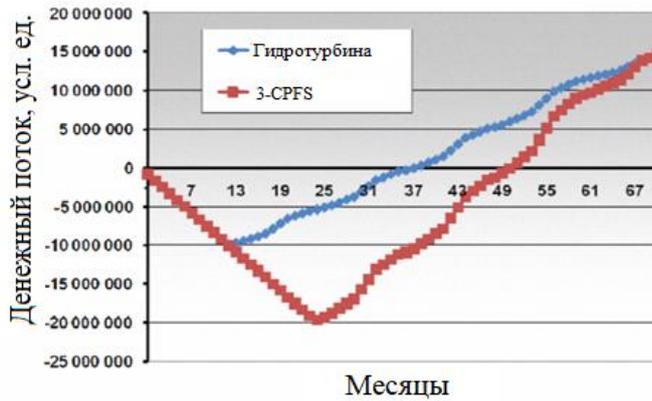


Рисунок 1.13 – График денежных потоков и сроков окупаемости системы 3-CPFS и гидротурбинной установки.

Из графика видно, что капитальные затраты и продолжительность подготовки к пуску системы 3-CPFS выше в два раза, по сравнению с гидротурбинной установкой. Но уже через 72 недели при условии равнозначной и непрерывной эксплуатации экономические показатели системы 3-CPFS превзошли показатели гидротурбинной установки. Такой экономический эффект объясняется различием КПД и коэффициента использования обеих систем. Так, при равном КПД 47%, коэффициент использования системы с 3х сообщающихся камер равен 51%, в то время как у гидротурбинной установки в связке с электрогенератором составляет 90%. Помимо более высокого КПД, гидротурбинная установка проигрывает в стоимости эксплуатации, поскольку в ее конструкции присутствуют подвижные части, подверженные повышенному износу в ходе эксплуатации.

Все вышеперечисленные способы использования энергии перепускаемой жидкости относятся к системам, эксплуатация которых возможна не только на вновь проектируемом, но и на действующем руднике. Также к системам, работающим на основе использования энергии движущейся вниз жидкости, можно отнести гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС), однако эксплуатация таких агрегатов аккумулирования энергии на действующих рудниках невозможна.

Главная задача ГАЭС заключается в выравнивании суточной неоднородности графика электрической нагрузки. Так, во время ночного провала энергопотребления ГАЭС получает из энергосети более «дешёвую» электроэнергию и расходует её на перекачку воды в верхний резервуар. Во время утреннего и вечернего пиков энергопотребления ГАЭС сбрасывает воду из верхнего резервуара в нижний, вырабатывая при этом «дорогую» пиковую электроэнергию, которая поступает в энергосеть.

Недостатком традиционных гидроаккумулирующих электростанций является отчуждение больших земельных площадей под верхний и нижний резервуары. Частично позволяет устранить такой недостаток использование заброшенных горных выработок в качестве нижнего резервуара для хранения водных масс. Идея такого решения, по результату анализа научной литературы, впервые встречается во второй половине XX века в работах [30,19].

В работе [17] представлена структурная схема исполнения ГАЭС с использованием заброшенного рудника (рис.1.14). Как видно из рисунка 1.14, подземная гидроаккумулирующая электростанция представляет собой наличие поверхностного и подземного резервуара с водой, машинный зал и три вертикальные капитальные горные выработки, выполняющие следующие функции:

- главный водовод: необходим для транспортировки водной массы с поверхностного резервуара в машинный зал в режиме генерации электрической энергии в пиковые часы электропотребления и в обратном направлении при насосном режиме в ночные часы;

- вентиляционный ствол: служит для отвода вытесняемого водой воздуха при заполнении нижнего резервуара в режиме генерации и, против, для предотвращения образования вакуума в нижнем резервуаре при насосном режиме машинного зала;

- транспортный ствол: необходим для технического обслуживания машинного зала, а также для спуска обслуживающего персонала.

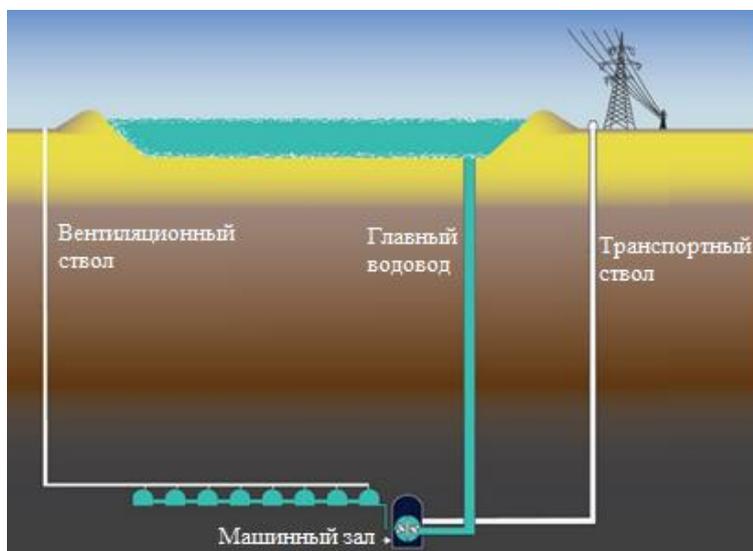


Рисунок 1.14 – Структурная схема функционирования ГАЭС с использованием заброшенного выработанного подземного пространства в качестве нижнего резервуара.

Резюмируя вышесказанное, стоит отметить, что энергия падающей под действием собственной силы тяжести шахтной воды в условиях подземного рудника завоевала высокую популярность в исследованиях, проводимых на современном этапе развития горнодобывающей отрасли. В первую очередь, это связано с ростом энергоемкости процессов добычи из-за увеличения глубины ведения горных работ, истощением запасов минерального сырья, удорожанием тарифов на электроэнергию. Однако, использование упомянутой выше энергии возможно и целесообразно не на всех месторождениях твердых полезных ископаемых, так как существует ряд природных и техногенных факторов, которые необходимо учитывать при проектировании системы рекуперации энергии гидропотоков в условиях подземного рудника.

### **1.3. Анализ конструкции гидротурбин в связи с изысканием энергоэффективных схем водоотлива подземных рудников**

Гидравлической турбиной называют машину, преобразующую механическую энергию потока жидкости в энергию вращения рабочего колеса. Установку, включающую в себя гидротурбину с соединенным с ней генератором электрического тока, называют гидроагрегатом.

Под мощностью потока жидкости, падающего на рабочее колесо гидротурбины, понимают работу в единицу времени, совершаемую водой при падении с верхнего бьефа в нижний, которая определяется по следующей формуле:

$$N_{\text{п}} = H_{\text{бр}} \gamma g Q, \text{ (Дж/с или Вт)}, \quad (1.1)$$

где:  $\gamma$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $Q$  – расход жидкости, м<sup>3</sup>/сек;  $H_{\text{бр}}$  – напор, определяемый из разности высот перепуска жидкости, м;  $g$  – ускорение свободного падения м/с<sup>2</sup>.

Рабочий напор гидротурбины определяется разностью между удельной энергией воды на входе в турбинную камеру и выходе по отводящим каналам:

$$H_{\text{р}} = \frac{p_e - p_k}{\gamma} + z_e - z_k + \frac{a_e v_e^2 - a_k v_k^2}{2g}, \text{ (м)} \quad (1.2)$$

где:  $p$  – среднее давление в сечении, кг/м<sup>2</sup>;  $z$  – высотная отметка оси расчетного сечения, м;  $v$  – средняя скорость течения жидкости в рассматриваемом сечении, м/сек;  $a$  – коэффициент кинетической энергии, учитывающий неравномерность распределения скорости по сечению движущегося потока, дол. ед.; индексы  $e$  и  $k$  соответствуют входу в турбинную камеру и выходу по отводящему каналу.

При работе гидротурбины некоторая часть энергии жидкостного потока теряется внутри самой установки. Полезная мощность, которую можно получить на валу, в этом случае равна:

$$N_{\text{п}} = H_{\text{бр}} \gamma g Q \eta, \text{ (Вт)} \quad (1.3)$$

где:  $\eta$  – полный КПД гидротурбины.

В зависимости от вида энергии, которую использует рабочее колесо, гидротурбины делятся на два типа: активные, преобразующие в механическую работу кинетическую энергию используемого потока  $\frac{a_1 v_1^2 - a_2 v_2^2}{2g}$ , и реактивные, преобразующие энергию давления жидкости  $\frac{p_1 - p_2}{\gamma} + z_1 - z_2$ . Индексы 1 и 2 относятся, соответственно, к входу и выходу рабочего колеса. Стоит отметить, что в активных турбинах  $p_1 = p_2$  и  $z_1 = z_2$  [45].

Типы гидротурбин, в свою очередь, делятся по виду систем на реактивные и активные. Так, из реактивных зачастую применяются системы поворотнлопастные, пропеллерные и радиально осевые, среди активных широко применяются система ковшовых гидротурбин (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Классификация и характеристики применяемых гидротурбин

Тип Системы	Реактивные				Активные		
	Поворотн- лопастные		Пропел- лерные	Радиально- осевые	Ковшо- вые	Наклонно- струйные	Двукрат- ные
	Осевые	Диаго- нальные					
Напор, м	2-80	40-120	2-70	2-500	40-1700	10-400	10-60
Диаметр колеса, м	1-10	1-6,5	0,35-9	0,35-7,5	0,36-5,2	0,3- 3,5	0,5-2.3
Максимальная развиваемая мощность, кВт	250 000	250 000	150 000	500 000	110 000	4000	150

Как видно из таблицы 1.1, для напоров, например, от 30 до 80м или от 300 до 550м, могут применяться различные системы турбин при вариации их конструктивного исполнения. Выбор между возможными вариантами, в первую

очередь, производится на основе учета специфических особенностей гидроэлектростанции (ГЭС) по условиям эксплуатации, а также по характеристикам гидротурбин [99].

Опираясь на результаты, полученные в ходе проведенного анализа и обобщения конструктивных особенностей существующих схем, в таблице 1.2 рассмотрены эксплуатируемые на горных предприятиях системы рудничного водоотлива и характеристики средней высоты перепуска шахтных вод и объемов водопритока. [81,82].

Таблица 1.2 – Сводная таблица характеристик применяемых на подземном руднике схем водоотлива

<b>Объект</b>	<b>Тип организации водоотлива</b>	<b>Высота перепускных скважин, м</b>	<b>Водоприток, м<sup>3</sup>/ч</b>
Учалинский подземный рудник	Многоступенчатая, с перекачкой	460,316,170	180-210
Узельгинский подземный рудник	Многоступенчатая, с перекачкой	131, 300,100	280-350
Молодежное месторождение	Двухступенчатая, с перекачкой	282, 72	350-400
Сибайский подземный рудник	Многоступенчатая, с перекачкой	320,250	350-380
Октябрьский подземный рудник	Многоступенчатая, с перекачкой	50	150-220
Гайский подземный рудник	Многоступенчатая, с перекачкой	150, 180, 245, 145	250-446
Кочкарское месторождение	Многоступенчатая, с перекачкой	300, 188,50	260-340
Рудник «Комсомольский»	Многоступенчатая, с перекачкой	300, 109, 152, 20	650-1250
Рудник «Таймырский»	Многоступенчатая, с перекачкой	---	200-360

В ходе анализа данных таблицы 1.2 установлено, что зачастую используется многоступенчатый тип водоотлива, а перепуск осуществляется по скважинам, сечением до 110 мм, или иным образом. Выявленные структурные параметры эксплуатируемых систем водоотлива препятствуют использованию малых ГЭС с применением гидротурбин реактивного типа, так как горнотехническая система (ГТС), ввиду своего строения не способна обеспечить необходимое давление жидкости.

Также установлено, что средняя высота перепуска в существующих многоступенчатых системах водоотлива изменяется от 79 до 282м. В то время как

предполагаемая суммарная высота перепускных скважин в системе одноступенчатого типа для рассмотренных объектов составляет от 50 до 946 м. Среднее значение из максимальных объемов водопритока по объектам составляет  $439,6 \text{ м}^3/\text{с}$ , а из минимальных –  $296,7 \text{ м}^3/\text{с}$ . Таким образом, установленные характеристики систем водоотлива предполагают использование гидротурбин активного типа.

Также шахтные условия при возможных перепусках 900 м и более определяют применение гидротурбин с ковшовой системой преобразования энергии гидропотоков в механическую. Конструкция типовой ковшовой гидротурбины с одним подающим соплом изображена на рисунке 1.15 [99].

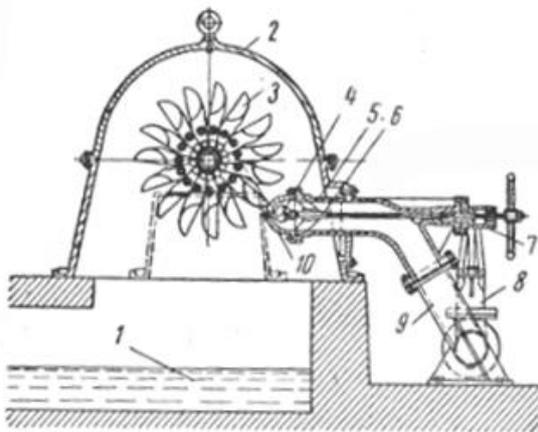


Рисунок 1.15 – Конструкция ковшовой турбины: 1 – водоотливной лоток; 2 – кожух; 3 – рабочее колесо; 4 – наконечник иглы; 5 – сопловой патрубок; 6 – регулирующая игла; 7 – механизм управления; 8 – задвижка на трубопроводе; 9 – патрубок напорного трубопровода; 10 – насадок сопла

Применение ковшовой турбины в горнотехнической системе подземного рудника обусловлено принципом действия и конструкцией элементов проточной части, например, способ подвода жидкости – к турбине вода поступает по напорным трубопроводам 9 (рис.1.15), роль которых в шахтных условиях могут выполнять перепускные скважины, переходящие в затвор 8, далее в сопловой патрубок 5. В этом случае сопло служит не только для регулирования расхода воды внутри кожуха гидротурбины, но и для поддержания водяного столба в перепускных скважинах, во избежание образования воздушных прослоек в потоке.

Рассматривая кривые рабочих характеристик для турбин различных типов (рис. 1.16), видно, что наиболее узкую зону высокого КПД имеют радиально-осевые 2 и пропеллерные турбины 4, в то время как поворотнлопастная 1 имеет более пологую характеристику. Но самой высокоэффективной в диапазоне загрузки от 20% до 100% является ковшовая турбина 3 [45]. Такие рабочие

характеристики особо важны в условиях подземного рудника, в виду постоянно изменяющегося притока шахтной воды. Для примера на рисунке 1.17 приведена динамика водопритока в подземные выработки Учалинского рудника, из которой виден значительный разброс объемов месячных притоков шахтной воды [81].

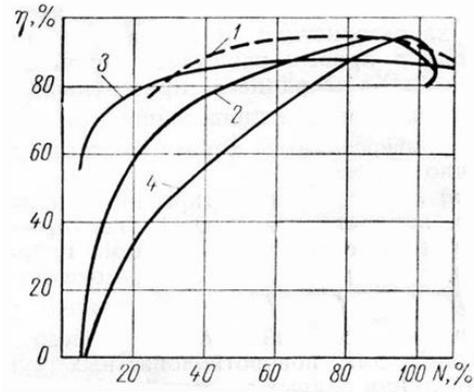


Рисунок 1.16 – Рабочие характеристики широко применяемых систем:  
1 – поворотлопостная;  
2 – радиально-осевая;  
3 – ковшовая; 4 – пропеллерная

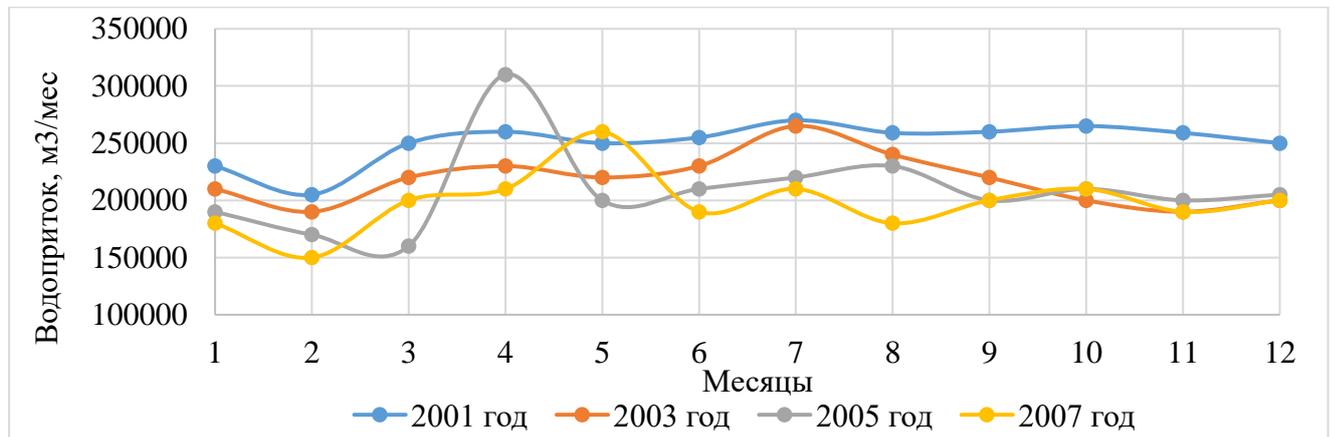


Рисунок 1.17 – Динамика водопритока в подземные выработки Учалинского рудника за 2001, 2003, 2005 и 2007 годы

После выбора типа гидротурбины необходимо определить основные параметры, исходя из заданной номинальной мощности  $N$  и расчетного напора  $H_p$  [45]. Так, максимальный расход воды через ковшовую турбину определяется:

$$Q_{\max} = \frac{N}{\gamma g H \eta}, \text{ (м}^3\text{/с)} \quad (1.4)$$

При этом значение КПД для ковшовой гидротурбины малой мощности принимают в диапазоне от 0,87 до 0,89 [45].

Диаметр напорной струи при максимальном расходе жидкости:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4Q_{\max}}{z_0 \varphi_{\text{ск}} \pi \sqrt{2gH}}}, \text{ (м)} \quad (1.5)$$

где:  $z_0$  – число сопел;  $\varphi_{ск}$  – коэффициент скорости, находящийся в пределах 0,97-0,985;  $H$  – напор, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Оптимальное соотношение диаметра колеса  $D_1$  к диаметру струи  $d_0$  лежит в интервале 10 – 18. В то же время оптимальная приведенная скорость вращения ковшовой гидротурбины составляет около  $n'_1 \approx 39$ . Скорость вращения рабочего колеса турбины рассчитывается по формуле:

$$n = \frac{n'_1 \sqrt{2gH}}{D_1}, (с^{-1}) \quad (1.6)$$

По полученным значениям  $n'_1$  и синхронной скорости вращения  $n$  определяется диаметр рабочего колеса:

$$D_1 = \frac{n'_1 \sqrt{2gH}}{n}, (м) \quad (1.7)$$

Приведенный максимальный расход жидкости определяется по формуле:

$$Q'_1 = \frac{Q_{max}}{D_1^2 \sqrt{2gH}}. \quad (1.8)$$

При выборе основных параметров конструктивных решений – диаметра рабочего колеса и числа сопел необходимо учитывать не только их значения, но и решать вопросы, связанные с определением размера турбины, затрат на строительство, прочности, удобства эксплуатации устройств, производственной возможности и надежности.

Однако, производство традиционных типов гидротурбин малой мощности зачастую не рентабельно, что подталкивает производителей завышать стоимость гидротурбин малой мощности, по сравнению с классическими мощными гидроустановками, где соотношение стоимости гидроагрегата и его мощности соизмеримо выгоднее [22]. Учитывая этот факт, в мировой практике активно ведутся поиски альтернативных низко затратных подходов к рекуперации энергии с использованием установок малой мощности. Одним из активно развивающихся способов рекуперации энергии гидропотоков является адаптация для работы в обратном направлении центробежных насосов, что является экономически выгодным и жизнеспособным решением [28].

Однако, главная проблема использования такого инженерного подхода заключается в сложности подбора гидроагрегата, так как заводы изготовители не прилагают технических характеристик насоса при его работе в режиме

гидротурбины. В мировой практике проведено достаточно исследований по выявлению коэффициентов для преобразования характеристик насосных агрегатов в характеристики гидротурбины на их основе. К числу наиболее значимых относятся работы следующих авторов: Alatorre-Frenk and Thomas 1990 [1]; Childs 1962 [4]; Grover 1980 [12]; Hancock 1963 [14]; Hergt и др. 1982 [15]; Schmiedl 1988 [33]; Sharma 1985 [34]; Stepanoff 1957 [35]. Разработанные экспериментальным путем вышеперечисленных исследований переходные коэффициенты представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Переходные соотношения для перехода от характеристик насоса к характеристикам гидротурбины на его основе

Автор	Соотношение давления водяного столба	Соотношение объемного расхода жидкости
Stepanoff (1957)	$\frac{H_t}{H_p} = \frac{1}{\eta_p}$	$\frac{Q_t}{Q_p} = \frac{1}{\sqrt{\eta_p}}$
Childs (1962)	$\frac{H_t}{H_p} = \frac{1}{\eta_p}$	$\frac{Q_t}{Q_p} = \frac{1}{\eta_p}$
Hancock (1963)	$\frac{H_t}{H_p} = \frac{1}{\eta_t}$	$\frac{Q_t}{Q_p} = \frac{1}{\eta_t}$
Grover (1980)	$\frac{H_t}{H_p} = 2,693 - 0,0229N_{st}$	$\frac{Q_t}{Q_p} = 2,379 - 0,0264N_{st}$
Hergt et al. (1982)	$\frac{H_t}{H_p} = 1,3 \frac{6}{N_{st} - 3}$	$\frac{Q_t}{Q_p} = 1,3 \frac{1,6}{N_{st} - 5}$
Sharma (1985)	$\frac{H_t}{H_p} = \frac{1}{(\eta_p)^{1,2}}$	$\frac{Q_t}{Q_p} = \frac{1}{(\eta_p)^{0,8}}$
Schmiedl (1988)	$\frac{H_t}{H_p} = -1,4 \frac{2,5}{\eta_p}$	$\frac{Q_t}{Q_p} = -1,5 \frac{2,4}{(\eta_p)^2}$
Alatorre-Frenk (1990)	$\frac{H_t}{H_p} = \frac{1}{0,85\eta_p^2 + 0,385}$	$\frac{Q_t}{Q_p} = \frac{0,85\eta_p^2 + 0,385}{2\eta_p^{9,5} + 0,205}$

где:  $H_t$  и  $H_p$  – высота водяного столба (м), необходимая для работы насоса в режиме гидротурбины и высота водяного столба, нагнетаемая насосом, соответственно;  $Q_t$  и  $Q_p$  – объемный расход жидкости (м<sup>3</sup>/с) для турбо режима и режима насоса, соответственно;  $\eta_t$  и  $\eta_p$  – КПД насоса в турбо режиме и насоса, соответственно;  $N_{st}$  – угловая скорость (с<sup>-1</sup>) насоса в режиме гидротурбины.

Ученые из Университет Калабрии (Италия) [2], провели масштабные исследование, в котором установили высокую сходимость выведенных ранее переходных соотношений с результатами экспериментов, а также выявили эффективную рабочую точку насоса при работе в режиме реверса (рис. 1.18).

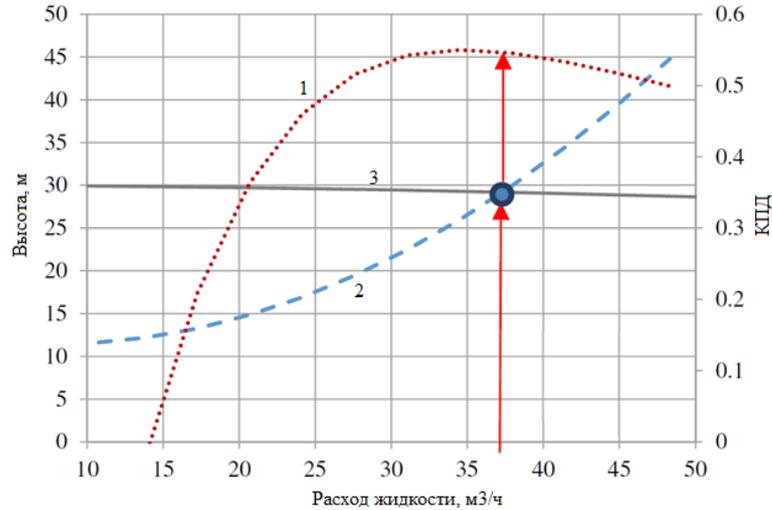


Рисунок 1.18 – Выбор эффективной рабочей точки насоса в турбо режиме: 1 – эффективность работы насоса в режиме реверса; 2 – расчетная характеристика насоса в турбо режиме; 3 – давление водяного столба

Из анализа графиков на рисунке 1.18 видно, что наибольшая эффективность работы насоса в режиме турбины достигается при пересечении заданными условиями давления высоты водяного столба с расчетной характеристикой насоса в турбо режиме, рассчитанной по переходным соотношениям табл. 1.3. На практике это означает, что для использования центробежного насоса в режиме гидротурбины необходимо оценить амплитуду изменений водного притока  $Q$  и высоты водяного столба  $H$ , на основе чего следует рассчитать характеристики турбинного режима для серийно выпускаемых насосов по переходным соотношениям, а затем выбрать модель, наиболее широко покрывающую своими характеристиками диапазон изменений притока и высоты водяного столба.

Таким образом, к выбору типа и системы гидроагрегата необходимо подходить не только основываясь на гидравлических параметрах потока, но и учитывать условия, в которых будет происходить строительство и эксплуатация гидроагрегатов. Также условия подземного рудника диктуют необходимость применения турбин активного типа с ковшовой системой, либо центробежного

насоса для режима реверса, основываясь, в первую очередь, на технико-экономических расчетах.

Кроме того, действующие системы рудничного водоотлива, как показал анализ, не позволяют в полной мере реализовать потенциал энергии перепускаемой шахтной воды, в первую очередь, из-за относительно низкого перепада высот между верхним и нижнем бьефом и рассредоточения по подземным горизонтальным и пологим выработкам потоков в перепускных скважинах. В связи с этим, необходимо обосновать новые требования к системам водоотлива, которые бы способны обеспечить рекуперацию энергии гидропотоков в целях повышения энергоэффективности подземной разработки рудных месторождений [112].

#### **1.4. Конструктивные особенности существующих схем рудничного водоотлива и их влияние на устойчивость функционирования подземных рудников**

Используемые на практике схемы водоотлива по типу движения отводимых гидропотоков условно можно разделить на две категории: самотечные и с принудительным подъемом воды.

К самотечным относятся схемы с использованием для стока воды действующих штолен 1 и 2 (рис. 1.19). Одним из основных преимуществ самотечных систем водоотлива является высокая надежность, даже при внезапных проявлениях повышенных водопритоков, так как при надлежащем в размере водоотводных канав легко достигается высокая пропускная способность системы водоотлива.

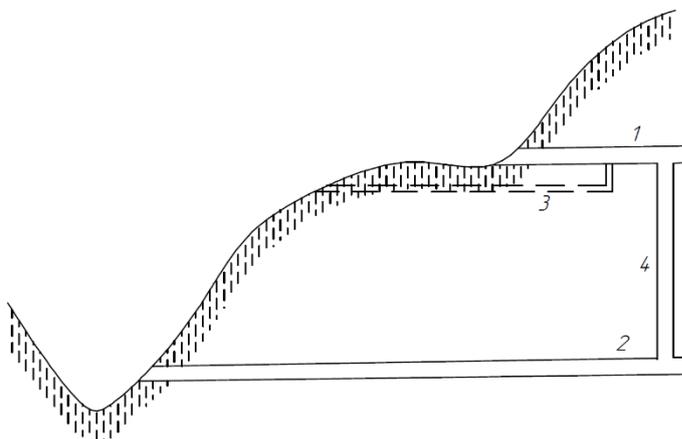


Рисунок 1.19 – Схема расположения водоотливных штолен: 1,2 – транспортные штольни; 3 – водоспускная штольня; 4 – вентиляционный восстающий

Недостаток подобной системы – ограниченная область применения – районы с гористой местностью и зависимость от климатических условий, что явно проявляется в районах с суровым климатом, где вода, протекающая по канаве штольни, замерзает, образуя наледи в выработке, мешающие нормальной эксплуатации штольни. Во избежание таких проблем применяют ряд мер: на расстоянии 100-200 м от устья штольни водоотводящую канаву делают глубокой и утепляют на зимний период; устанавливают регулирующие двери для исключения проникновения в штольни струи холодного воздуха, способствующего замерзанию воды; проводят водоспускную штольню для осушения соответствующего участка главной штольни (поз. 3 на рис 1.19).

Рассмотренные меры, предусматривающие вмешательство в структуру откаточных штолен, такие как утепление канав или установка дверей, негативно сказываются на производительности шахты, ввиду неудобства функционирования транспортного оборудования. В случае использования водоспускной штольни (поз. 2 на рис. 1.19) подобные неудобства отсутствуют, но проходка такой отдельной выработки удорожает систему водоотлива [111].

Несмотря на высокую пропускную способность и низкие эксплуатационные затраты на содержание самотечных водоотливных систем, их применение ограничено особенностями геологического строения разрабатываемого месторождения.

Несравненно чаще для осушения глубоких подземных выработок применяют водоотлив с принудительным подъемом воды на земную поверхность. В этом случае различают водоотлив прямой и с перекачкой.

Под прямым понимается такой водоотлив, когда шахтные притоки транспортируются по высоконапорным трубопроводам непосредственно на земную поверхность, причем подъемные водоотливные установки в данном случае могут быть как на одном горизонте (рис. 1.20, а), так и на нескольких (рис.1.20, б).

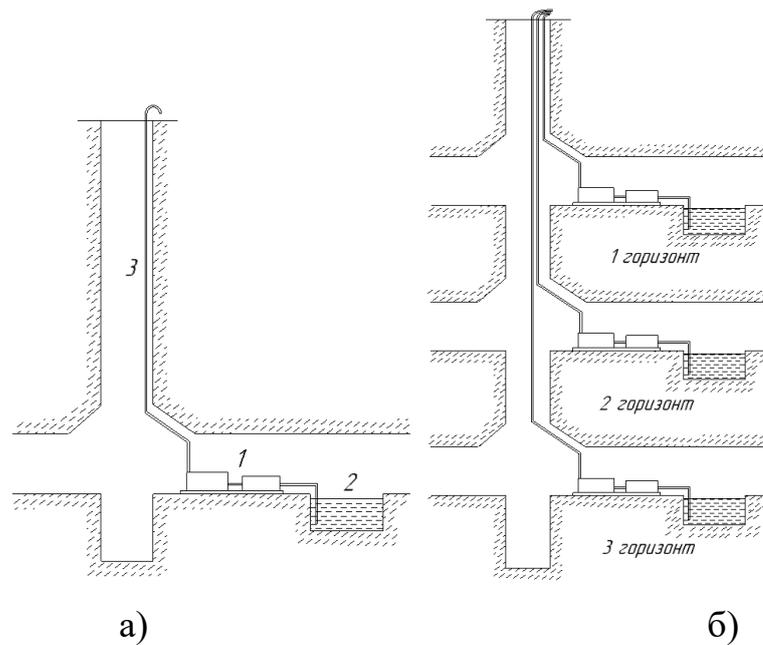


Рисунок 1.20 – Схема прямого водоотлива: при одном горизонте главного водоотлива – а; при нескольких водоотливных горизонтах – б; 1 – насосная установка, 2 – водосборник, 3 – высоконапорный трубопровод.

Водоотлив с перекачкой отличается от прямого тем, что вода, прежде чем попасть на земную поверхность, перекачивается один или несколько раз на вышележащие горизонты (рис. 1.21). В случае, когда работы в шахте ведутся на одном горизонте, то для перекачки шахтных потоков может быть установлена вспомогательная водоотливная установка с водосборником 2 (рис.1.21, а).

Выбор той или иной схемы водоотлива осуществляется, исходя из количества рабочих горизонтов и от интенсивности их притоков. Так, например, в случае большого притока шахтной воды на нижнем горизонте, предпочтительнее применять непосредственную одноступенчатую схему водоотлива (рис. 1.20, а), если же притоки верхних горизонтов более большие по сравнению с нижним, то лучше воспользоваться схемой на рис.1.21, б, присоединяя малые количества воды с низу к большим притокам, откачиваемыми насосами, установленными на вышележащих горизонтах.

Сравнивая достоинства и недостатки рассмотренных выше схем, стоит отметить, что при эксплуатации систем прямого водоотлива требуются меньшие эксплуатационные затраты и более простой надзор за насосными агрегатами. С другой стороны, при прочих равных условиях, необходимо устанавливать насосные агрегаты более высокого давления и высоконапорных трубопроводов на

соответствующий увеличенный напор. Однако, достоинства прямого водоотлива настолько велики, что он является приоритетным, когда есть возможность установить соответствующие насосы и трубы высокого давления [111].

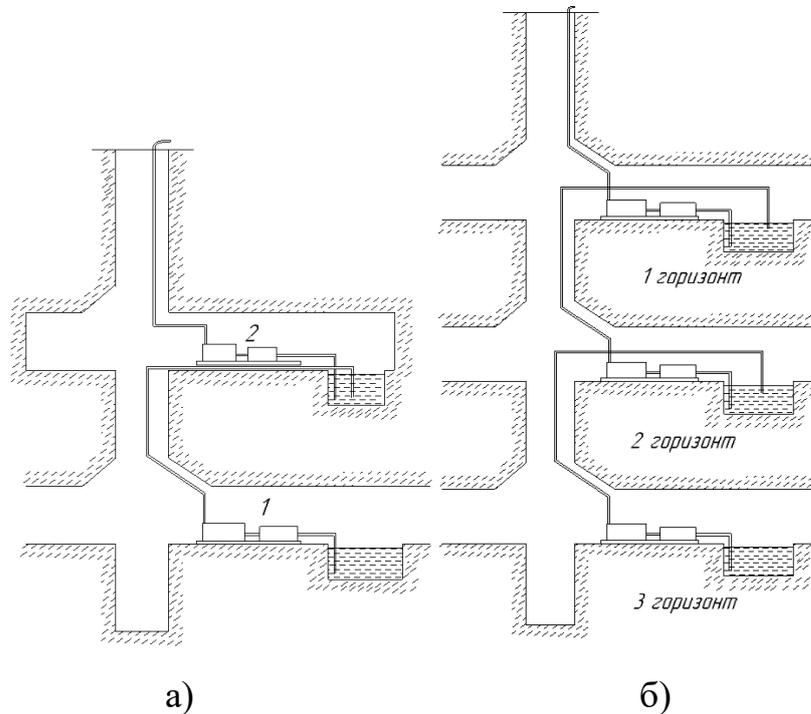


Рисунок 1.21 – Схема водоотлива с перекачкой: через вспомогательную водоотливную установку – а; с перекачкой на несколько вышележащие горизонты – б; 1 – главная водоотливная станция, 2 – вспомогательная водоотливная установка

Анализ структуры существующих систем водоотлива, так или иначе влияющих на устойчивость функционирования подземных горнотехнических систем, позволил выделить следующие особенности:

- откачиваемая шахтная вода содержит в себе абразивные механические примеси, зачастую твердые частицы минерального происхождения различного размера и твердости, оказывающие влияние на долговечность проточной части схемы водоотлива;

- высокое содержание в воде химически активных компонентов – свободных кислот, щелочей, солей, растворенных газов и окислов металлов, – также негативно сказывается на долговечности работы составных частей проточной части водоотлива;

– с учетом постепенного снижения рабочих характеристик, происходящего в результате гидроабразивного и коррозионного износа элементов проточной части, насосные установки при проектировании выбираются с завышенным напором, что предопределяет эксплуатацию насоса в кавитационном режиме, ввиду несоответствия его напорных характеристик трубопроводной сети;

– отклонение напорных характеристик насосов в процессе эксплуатации сопровождается также снижением их всасывающей способности, что чревато быстрым выходом из строя и отказом автоматических уравнивающих устройств;

– для откачки больших шахтных притоков зачастую используется параллельная схема работы нескольких насосов, имеющих различную наработку и износ, вследствие чего насосы имеют различные напорные характеристики, что обуславливает возможность возникновения гидроударов.

Одним из основных факторов, определяющих долговечность компонентов проточной части водоотлива, является содержание твердых абразивных частиц минерального происхождения в перекачиваемой на дневную поверхность шахтной воде.

Проведенные в [84,105] исследования свидетельствуют, что даже применение увеличенных по протяженности или объему водосборников не обеспечивает в полной мере эффективное осаждение взвешенных частиц, в результате чего они в значительном количестве попадают в приемные колодцы насосных установок. В исследованиях [84] утверждается, что до 90% твердого осадка составляют фракции менее 0,2 мм, представляющие собой частицы минерального происхождения: зерна сернистого колчедана, кварца, полевого шпата, песчаника и другие породы, имеющие микротвёрдость более 6 ГПа. Так, при концентрации в шахтной воде уже 5% твердых абразивных частиц, срок службы насосных агрегатов снижается до 2-3 месяцев, а разгрузочные кольца работают до отказа всего 17 часов [83]. В исследованиях [51,75,49] отмечено, что на золоторудных и медно-колчеданных месторождениях, на рудниках с гидрозакладкой, а также при системах с обратным водоснабжением гидрошахт гидроабразивное изнашивание деталей насосов носит преобладающий характер.

Помимо абразивной составляющей в шахтной воде, на надежность и устойчивое функционирование работы системы водоотлива влияют высокие эксплуатационные затраты, среди которых особое место занимают затраты на очистку водосборников [79]. Для очистки водосборников в настоящее время практически не применяют скреперные установки, а очистку осуществляют при помощи погрузочных самоходных машин, подземных автосамосвалов и вагонеток локомотивного транспорта. В свою очередь, отвлечение погрузочно-доставочных машин, автосамосвалов и другого рудничного технологического транспорта на очистку водосборников приводит к ощутимому снижению производительности рудника или к увеличению парка технологических машин [89,88].

Также на устойчивость функционирования подземных рудников в той или иной мере оказывает влияние энергоемкость системы водоотлива, на долю операций по откачиванию подземных вод приходится до 50% от общего расхода электрической энергии горным предприятием [44,73,87]. Одним из способов компенсации увеличенного количества потребляемой энергии является использование энергии свободно перемещающихся вниз гидротоков при помощи гидротурбинных агрегатов малой мощности.

На основе проведенного обзора существующих схем водоотлива нами были проанализированы параметры действующей системы водоотлива в условиях шахты «Центральная» АО «Южуралзолото Группа Компаний» («ЮГК»). В результате детального изучения проектной документации установлено, что подземные горные работы на Центральном рудном поле Кочкарского месторождения ведутся шахтой «Центральная» по 15 жилам на шести горизонтах: 470, 550, 600, 650, 700 и 750м. Неэксплуатируемые верхние горизонты 250, 300, 412м, находятся в стадии консервации, в связи с чем доступ к ним отсутствует. Изучение шахтного водооборота в пределах эксплуатируемых горизонтов показало, что главным водоотливным горизонтом является неэксплуатируемый гор. 512м, откуда шахтная вода выдается на дневную поверхность. Насосная станция гор. 512м одновременно является и перекачной, так как с гор. 700м шахтная вода подается насосами в водосборник гор. 512м. В свою очередь, по аналогичной схеме, водосборник гор.700м принимает воду с нижележащего гор. 750м (рис.1.22). Кроме горизонтов с установленными водоотливными насосными

станциями, для совершенствования системы водоотлива представляет значение влияние водоотведения с горизонтов 600, 650м, перепускающих шахтную воду на нижележащие горные выработки.

Требования к системе водоотлива в области перепуска шахтных вод на нижележащие горизонты недостаточно регламентированы нормативной документацией. К перепускным скважинам применимы лишь следующие требования [100,46]:

- схему расположения дренажных скважин следует проектировать с учетом существующих выработок на различных горизонтах шахты, а также выработанного пространства;

- при выборе сечений следует учитывать пропускную способность, рассчитанную на максимально возможный приток воды;

- в целях недопущения разбрызгивания воды и размыва почвы в камере водоперепускных скважин следует предусматривать: трубы или рукава для отвода воды в канавку; легкоочищаемые от шлама водобойные колодцы; устойчивую крепь самих камер;

- перепускные скважины следует применять в том случае, когда водопроницаемость поглощающего горизонта выше, чем водопроницаемость дренирующего водоносного горизонта.

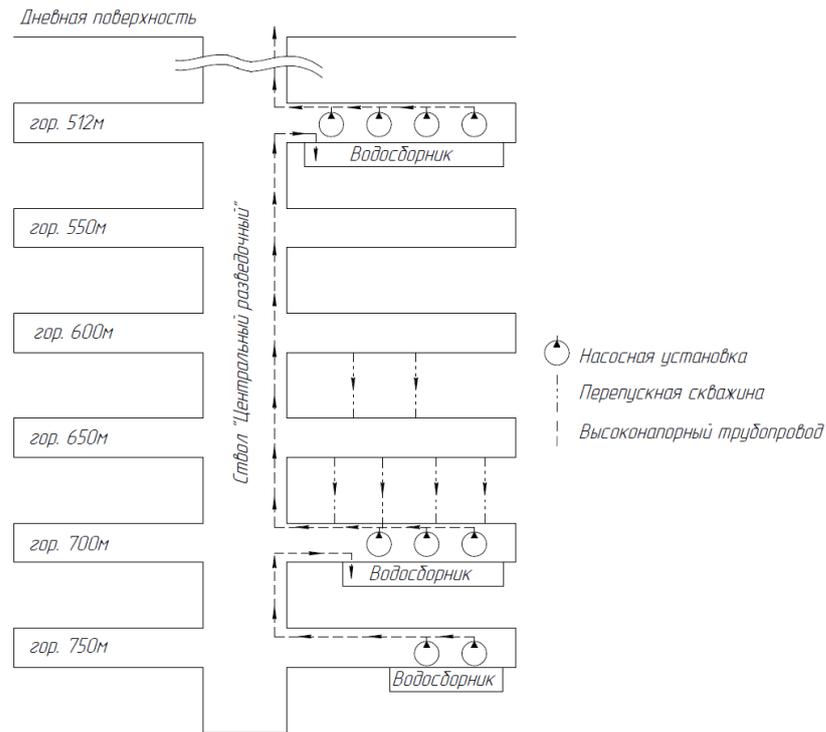


Рисунок 1.22 – Схема водоотлива шахты «Центральная» АО «ЮГК»

В этой связи, расположение перепускных скважин не отображено в проектной документации, что привело к проведению натурных исследований по определению местонахождения дренирующих сооружений и замеру расхода шахтной воды в них. Для определения положения перепускных скважин в пространстве была выполнена аксонометрическая проекция на вертикальную плоскость с указанием горных выработок, совмещенных по координатной сетке с межгоризонтным расстоянием в масштабе 1:5000 (рис.1.23).

Установлено, что шахтная вода на гор. 600м с восточного и западного крыльев месторождения по водоотливным канавам направляется в сторону дренажных скважин №1' и 2', а затем перепускается на нижележащий гор. 650м (рис.1.23). Попадая в полость выработок гор. 650м, вода по приемным трубопроводам и водоотливным канавам направляется в сторону скважин №1 и 2 на гор.700м, которые являются логическим продолжением пути движения шахтной воды с гор. 600м, так как водные потоки с этого горизонта полностью изолированы от внутренних притоков с гор. 650м.

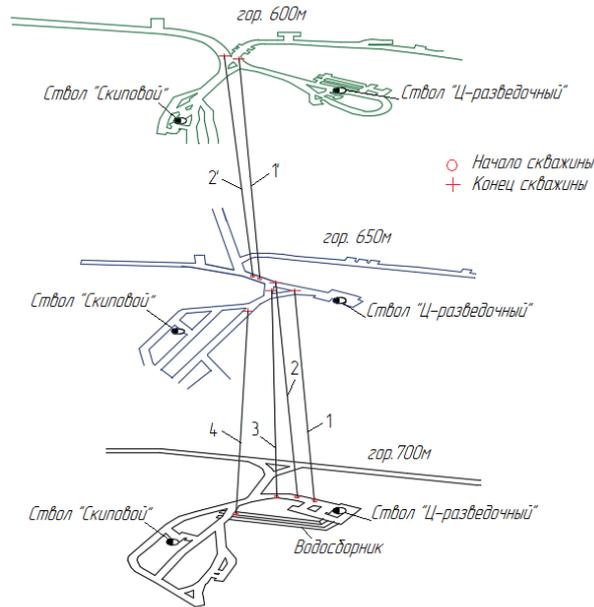


Рисунок 1.23 – Аксонометрическая проекция расположения перепускных скважин между горизонтами 600, 650 и 700м: 1',2',1-4 – перепускные скважины

Собственный водоприток гор. 650м формируется с южного и западного крыльев месторождения, поэтому для дренажа вод пробурены скважины №3 и 4 до водоотливного гор. 700м (рис.1.23). Собранная скважинами №1-3 на гор. 700м шахтная вода транспортируется по трубопроводам и водоотливным канавам до водосборника. Скважина №4 пробурена непосредственно в начало водосборника с гор. 650м. Собственные водные притоки горизонта 700м незначительны и протекают с восточной стороны.

Из анализа месторасположения скважин видно, что отсутствует системный подход к выбору места расположения скважин: скважины пробурены преимущественно из соображений снижения вероятности затопления выработок, как того требует нормативная документация [100,46].

Стоит отметить, что перепускные скважины присутствуют только на эксплуатационных горизонтах, в пределах других горизонтов притоки шахтной воды либо незначительны, либо дренируют сквозь тектонические разломы и трещины, образованные в течении 140 летнего периода эксплуатации месторождения.

Используемые насосные установки с указанием электротехнических характеристик приведены в таблице 1.4. Следует отметить, что представленные в таблице значения коэффициента использования водоотливного оборудования

представляют собой отношение установленного суммарного среднего времени работы каждой насосной установки к максимальному возможному количеству часов работы всех насосов.

Таблица 1.4 – Сведения об используемом оборудовании на действующей системе водоотлива шахты «Центральная»

Горизонт	Марка используемого насоса	Мощность электропривода насоса, кВт	Количество, шт.	Коэффициент использования в сутки	Суммарная потребляемая мощность в сутки, кВт
512	ЦНС 300/600	800	4	0,40	1280
700	ЦНС 300/240	320	4	0,35	448
750	ЦНС 180/170	132	1	0,33	44
	К100/80	15	1	резерв	0

Установлено, что суммарное потребление электрической мощности в действующей системе водоотлива составляет 1772 кВт в сутки. Кроме того, в ходе исследования системы водоотлива шахты установлено, что на фоне высокого содержания абразивной составляющей в шахтной воде средний срок службы насосной установки до капитального ремонта составляет 3 месяца, после ремонта, через тот же промежуток времени насос полностью выходит из строя и уже не подлежит восстановлению.

### **1.5. Природные и техногенные факторы, определяющие подход к рекуперации энергии гидротоков**

Согласно гидрогеологии, горные работы условно можно разделить относительно уровня горных работ: выше или ниже водоносного (фреатического) горизонта [5,8]. Во многих горных выработках водоносный горизонт более или менее изолирован защитными водонепроницаемыми породами, которые находятся под водоносным горизонтом, накапливая большие запасы воды, защищенные от прямого проникновения под действием силы тяжести в нижележащий массив, а также от непосредственного контакта с поверхностной водой. Поэтому в случае скопления больших запасов воды в системе водоносного

горизонта и при чрезмерной или бессистемной эксплуатации этого горизонта возникает необходимость в извлечении больших объемов шахтной воды, скорость притока которой разнится от одного месторождения к другому [26].

Большие водные притоки зачастую соответствуют областям с высоким уровнем осадков, что подтверждают исследования, проведенных в Китае, где было обследовано свыше 157 месторождений полезных ископаемых и сделан вывод о том, что влияние осадков на дренаж в шахтах имеет первостепенное значение [26]. Также в работе [21] проведен анализ влияния снежного покрова в горных районах на фильтрацию вод в выработки и установлено значение временной задержки между моментом выпадения осадков и моментом проникновения таких вод в горные выработки. Вместе с тем, определено количество времени, необходимое для таяния снега в весенний период, что поможет в дальнейшем точнее прогнозировать динамику инфильтрации воды прежде всего на предприятиях, находящихся в условиях снежных зим.

На объемы притоков в выработки, наряду с осадками, также оказывают влияние следующие климатические факторы: температура, испарение, скорость ветра, относительная влажность воздуха, солнечная радиация, а также природные: задерненность и залесованность почв, наличие природных или техногенных водоемов, состав и структура налегающих пород [27]. Но в работах [16,27] продемонстрировано, что это не единственные параметры, так эвапотранспирация — количество влаги, переходящее в атмосферу в виде пара в результате десукции и последующего физического испарения с поверхности растительности, играет важную роль в водообильности местности и это при определённых обстоятельствах даже сопоставимо с ролью осадков. Помимо этого, в работе [24] приведено сравнение индексов засушливости почвы, рассчитанных по уровню выпавших осадков и по параметрам эвапотранспирации. Предположение подтвердилось, индексы засушливости, где используют только данные эвапотранспирации, показали лучшие результаты, чем показатели засухи на основе осадков. Данная тема активно развивается в современном научном сообществе, об этом свидетельствуют масштабные гидрологические исследования во всем мире [6,25], доказывающие, что насаждение деревьев в качестве «естественных насосов» приносит большую выгоду, чем пастбища и более короткая растительность.

Подобные исследования доказывают, что на обильность подземных вод оказывает влияние не только уровень осадков и климатические параметры, но также и растительный покров в пределах влияния депрессионной воронки, формируемой горными работами.

Помимо климатических параметров и свойств эвапотранспирации, на скорость проникновения воды в горные выработки значимое влияние оказывают слои с низкой проницаемостью, чаще всего состоящие из мелкозернистых осадочных отложений, таких как сланцы или глины. В свою очередь, кристаллические породы считаются относительно водопроницаемыми из-за наличия обширной трещиноватости. Однако, на глубине они могут иметь низкую проницаемость за счет заполнения трещин и полостей минеральным веществом или горной породой [25,39]. Наиболее водопроницаемыми породами являются пески, песчаники, аркозы, гравий и вулканические туфы, известняки, а также нарушенные трещинами изверженные породы, в результате вода проникает по диаклазам или по трещинам, образовавшимся от сжатия [78,41].

Климатические явления, такие как интенсивные осадки или низкое испарение, в сочетании с местными гидравлическими условиями часто приводят к повышению уровня грунтовых вод, однако, только на короткий период времени. Долгосрочные изменения уровня грунтовых вод чаще всего обусловлены деятельностью человека. Поэтому при долгосрочном рассмотрении режимы изменения притока воды в горные выработки можно классифицировать по следующим признакам [9]: изменение темпов притока в соответствии с стандартным нормальным распределением Гаусса; увеличение притока во времени; неизменность притока; уменьшение притока со временем; смешанные показатели притока.

К распределению водного притока в соответствии с стандартным нормальным распределением Гаусса можно отнести продолжительную эксплуатацию месторождений, что приводит к постепенному увеличению объемов водопитока во времени, главным образом, из-за техногенного нарушения массива горных пород трещинами, углубления горных выработок и увеличения площади нарушенной горными работами земной поверхности. Также эти факторы в значительной степени влияют на конусность депрессионной воронки,

оказывающей воздействие на поверхностные воды, которые, в свою очередь, вызывают значительное увеличение притока от других, ранее не затронутых горными работами водоносных горизонтов. Подобный процесс может проходить и в обратном направлении, как за короткий, так и за длительный период времени в случае, если объемы горных выработок уменьшаются как по протяженности, так по глубине. Например, в работе [40] представлен метод прогнозирования диаметра подобных депрессионных воронок, как для шахты, так и для карьера, в зависимости от их параметров, а также рассчитаны гипотетические радиусы влияния площади подработки на водоносный слой. Так, радиус депрессионной воронки в случае неограниченного водоносного горизонта варьирует от 963 до 1700м, а в случае ограниченного водоносного горизонта – от 61 до 146м. Подобный метод является полезным инструментом для прогнозирования водного притока в выработки, так как с помощью радиуса возможно оценивать взаимодействие поверхностных и подземных вод и, исходя из этого, корректировать численные модели оценки водопритока.

Еще один типичный пример влияния размеров депрессионной воронки на объемы водопритока приведен по подземному руднику Reocin, Испания, где среднегодовой прирост потока 126 м<sup>3</sup>/ч был замечен в течение длительного периода времени [27]. Детальное изучение записей об осадках показало, что изменение скорости водного притока связано, прежде всего, с осадками и их инфильтрацией через высоко развитую карстовую систему и через старые шахтные выработки. Также было установлено, что в зоне влияния депрессионной воронки оказалось эксплуатируемое хвостохранилище, откуда вода активно проникала в шахтные выработки [27].

Подобный пример не является единичным случаем. Так, в работе [23] приведены результаты исследований внезапного увеличения потока воды в осушаемую шахту. 100-летний период разработки месторождения создал излишние напряжения в слоях зоны разрыхления, что привело к серьезному изменению ландшафта, попадающего в зону осушения рудника. Также отмечено, что длительные периоды откачки создают изолированные зоны высокого напора грунтовых вод в верхнем водоносном горизонте. В целом, в исследованиях показано, что до 50 % воды в выработки попадает в результате ее просачивания из

эксплуатируемого на дневной поверхности хвостохранилища, а остальная часть воды поступает из неглубокого водоносного горизонта и от прямой подпитки осадками. Такие выводы подтвердил анализ площади депрессионной воронки, которая с севера ограничивалась хвостохранилищем. По полученным результатам дан подробный анализ развития конусообразности депрессионной воронки в случае закрытия хвостохранилища, который показал, что развитие конусообразности будет проходить в сторону севера по мере осушения хвостохранилища и в течение последующих 10 лет присутствует вероятность полного пересыхания неглубоких скважин близлежащих фермерских хозяйств.

Помимо хвостохранилищ, в зоне влияния депрессионной воронки могут оказаться и другие техногенные гидрообразования, например, некачественно гидроизолированные водные отстойники очистных сооружений, эксплуатируемые для хозяйственного применения откаченной на поверхность шахтной воды; искусственно созданные дамбы; законсервированные горные выработки; заболоченность участков поверхности, создаваемая техногенным вмешательством деятельности человека и пр. [9]

Кроме того, помимо поверхностных водотоков, к объемам шахтной воды, отводимой с глубоких горизонтов, добавляется промышленная вода, применяемая для буровых работ или для гидравлических операций. Так, например, на руднике Невес-Корво (Португалия), поток технической воды превышает поток водоносного горизонта [10].

Промышленные водные притоки в своем роде возникают при следующих основных и вспомогательных процессах подземной добычи [77]: промывке шпуров и скважин при мокром пылеподавлении; орошении отбитой горной массы при погрузке и перегрузке; мойке оборудования и помещений; приготовлении закладочной смеси; плановой и аварийной промывке закладочного трубопровода с последующим сбросом воды в камеры или горные выработки.

Но даже, владея полной информацией по влиянию вышеперечисленных факторов в исследуемой местности, трудно предсказать приток воды в районах со сложной топографией и геологией [8]. Эти условия обычно связаны с нерегулярной структурной трещиноватостью в горных массивах, что сильно влияет на циркуляцию подземных вод и, как известно, эти условия сложно достоверно

смоделировать или интерпретировать. Помимо естественной трещиноватости массива, сложности в моделировании добавляют разрушения, образованные техногенным вмешательством: ведением буровзрывных работ, в результате чего развивается сеть формирования трещиноватости под действием динамических нагрузок [76]; перераспределением давления в горной породе, вследствие образования пустот, что вызывает разломы, провалы, иные нарушения в целостности массива и приводит к техногенному нарушению горных пород и к дальнейшему увеличению притока воды [13].

Еще одним значимым техногенным фактором увеличения инфильтрации талых и дождевых вод является формирование промышленных площадок с нарушенным поверхностным слоем. Так, например, в работе [20] представлены исследования, которые показывают степень влияния лесоперерабатывающего завода, строящегося в 8 км от горнодобывающего предприятия, на изменение шахтного водопритока. В результате установлено, что увеличенный поток в горные выработки был вызван следующими причинами:

- неверно определение при проектировании параметров водонепроницаемого покрытия вокруг здания, проходящего по периметру с уклоном в направлении от объекта, предназначенного для защиты фундамента от дождевых вод и предотвращения намокания грунта у основания здания;

- ошибочное формирование инженерно-технического сооружения, предназначенного для сбора и удаления инфильтрованных и грунтовых на прилегающей территории к зданиям;

- масштабное строительство в зоне влияния депрессионной воронки в совокупности с разрушением почвенного слоя, что увеличило инфильтрацию поверхностных вод.

Резюмируя все вышеперечисленные факторы, можно утверждать, что на объемы поступающей в выработки шахтной воды влияют в равной степени как техногенные, так природные факторы. К техногенным факторам относятся: размеры депрессионной воронки и факторы, их определяющие; размеры рудоносного поля; нарушенность фреатического горизонта; сильнообводненные техногенные объекты в зоне влияния депрессионной воронки; водные притоки,

появляющиеся в результате ведения технологических процессов; искусственная трещиноватость пород, вызванная взрывными работами и разломами, образовавшихся в результате перераспределения давления; строительство промышленных объектов в зоне влияния депрессионной воронки.

К природным факторам относятся: инфильтрационные свойства зоны разрыхления; климатические условия местности; обильность растительного покрова в зоне влияния депрессионной воронки; природные водные ресурсы в зоне влияния депрессионной воронки; естественная трещиноватость водопроницаемость пород; свойства фреатического горизонта.

На основе проведенного анализа литературных источников сделан вывод, что и природные и техногенные факторы в равной степени оказывают масштабное влияние на изменение объемов водного притока в горные выработки. Однако, техногенные факторы влияют в течение большего промежутка времени, нежели природные.

Рассмотренные способы проникновения вод в выработки крайне важно учитывать в равной степени при проектировании системы водоотлива с возможностью рекуперации энергии. Так, например, при значительном преобладании техногенных факторов имеет смысл проводить мероприятия по уменьшению притока воды в шахту, воздействуя на источник водоотделения. А в случае преобладания естественного притока, необходимо активно применять системы с рекуперацией энергии водного потока.

Выполненный анализ мирового опыта по рекуперации энергии техногенных источников позволил сформулировать цели, задачи и методы диссертационных исследований.

## **1.6. Цель, задачи, методы исследований**

Одним из основных направлений развития научно-методических основ проектирования подземных рудников, обеспечивающих устойчивое функционирование горнотехнических систем при комплексном освоении месторождений, является повышение энергоэффективности горного предприятия,

в том числе и за счет воспроизводства электроэнергии в ходе реализации геотехнологических процессов. Разработка и обоснование параметров технологии производства электроэнергии на подземном руднике за счет использования энергии технологических потоков, формируемых и перемещаемых в горнотехнической системе, представляет, несомненно, актуальную задачу.

Особую значимость вопросы энергоэффективности и ресурсосбережения обретают применительно к условиям освоения месторождений твердых полезных ископаемых. Поэтому актуальность работы также состоит в том, что для вовлечения в эксплуатацию месторождений, расположенных на больших глубинах, в отдаленных слаборазвитых районах, для существенного повышения эффективности функционирования действующих горных предприятий необходимо создание задела в области теоретических основ проектирования энергоэффективных горнотехнических систем. В прикладном аспекте это обеспечит устойчивое развитие горнодобывающей промышленности России.

На основании проведенного анализа, представленного в разделах 1.1 – 1.4 настоящей диссертации, сделаны следующие выводы:

– доля электропотребления отрасли добычи твердых полезных ископаемых от промышленного сектора страны составляет 25%. При этом наблюдается устойчивая тенденция к росту удельных энергетических затрат при незначительном изменении уровня производства товарной продукции, что говорит о серьезном повышении энергоемкости горного производства;

– осушение глубоких выработок от шахтных вод является наиболее энергоемким технологическим сектором при подземной добыче твердых полезных ископаемых, что определяет высокую актуальность исследований в данной области;

– среди наиболее перспективных на сегодняшний день направлений развития нетрадиционных возобновляемых энергетических источников рассматриваются: горное давление и упругие колебания горного массива; энергия силы тяжести большегрузного горнотранспортного оборудования; энергия отработанных воздушных струй системы вентиляции рудников, а также ее рекуперация;

потенциальная энергия «падающих» закладочных смесей и жидкостей в процессах водоотлива и закладки выработанных пространств.

– выявлены способы проникновения вод в выработки, которые крайне важно учитывать при проектировании системы водоотлива с рекуперацией энергии. Так, например, при значительном преобладании техногенных факторов имеет смысл проводить мероприятия по уменьшению потока в шахту, воздействуя на источник водоотделения. А в случае обратного варианта, с преобладанием естественного притока, необходимо активно применять системы с рекуперацией энергии водного потока.

В связи с этим, цель работы состоит в разработке и обосновании параметров схемы 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 шахтных гидропотоков и совершенствования схемы водоотведения подземного рудника в целом.

Достижение поставленной цели и реализация идеи обеспечены решением 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 шахтных вод.

Достоверность выводов и рекомендаций, полученных в результате диссертационной работы, подтверждает применение совокупности системных методов исследования:

– мнений квалифицированных специалистов мирового масштаба – для составления обзора существующих подходов к формированию сбора и преобразованию энергии рудничных гидропотоков;

– аналитических расчетов в виде исчисления объемов шахтной воды, способных проникнуть в подземные горные выработки под влиянием природных и техногенных факторов в различных гидрогеологических условиях месторождений;

– схематических представлений и обоснований структуры инновационных схем водоотлива, базирующихся на основе использования энергии перепускаемых шахтных гидропотоков для повышения эффективности работы системы водоотлива;

– гидродинамического моделирования процессов откачки шахтных вод в программном комплексе SOLIDWORKS Flow Simulation, позволяющего оценить характеристики потока жидкости для вычисления гидравлических возможностей инновационных схем водоотлива;

– практическим подтверждением в виде проведения экспериментальной апробации в лабораторных и шахтных условиях базовых элементов инновационных схем водоотлива;

– графического представления полученных теоретических и экспериментальных результатов по определению параметров схем водоотлива в виде построения схем и графиков для наглядной и достоверной обработки данных.

Основу теоретической и методической базы составили авторитетные мнения и экспертные заключения, отраженные в научных публикациях общероссийских, мировых и отраслевых журналах, выступлениях на тематических конференциях.

## 2. РАЗВИТИЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ТЕХНОЛОГИИ ВОДООТВЕДЕНИЯ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ ГИДРОПОТОКОВ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ОСВОЕНИИ НЕДР

### 2.1. Динамика и взаимосвязь объемов притока шахтных вод и водоотведения в различных горногеологических и горнотехнических условиях

Увеличение темпов разработки месторождений твердых полезных ископаемых за счет применения высокопроизводительной горной техники обуславливают постоянное повышение естественных и технологических водных притоков и производственной мощности системы водоотлива подземного рудника. Динамика и взаимосвязь формирования водных потоков, проникающих в горные выработки, и процессов отведения шахтных вод насосами на дневную поверхность оказывает существенное влияние на экономическую составляющую добычи твердых полезных ископаемых. Поэтому для оценки показателей процессов водоотлива был исследован баланс соотношения объемов естественных шахтных водных притоков и объемов используемых технических вод при выполнении основных и вспомогательных процессов производственного цикла с объемами водоосушения горных выработок насосными установками.

Полный объем откачиваемой насосами на поверхность воды состоит из естественных притоков  $Q_{\text{ест}}$  и притоков технической воды  $Q_{\text{техн}}$ , используемой в производственном цикле добычи руды:

$$Q_{\text{отк}} = Q_{\text{ест}} + Q_{\text{техн}}, \text{ (м}^3\text{/ч)} \quad (2.1)$$

В ходе гидрогеологических исследований широко применяют расчетный метод оценки ожидаемого притока в буровые скважины, проводимые через рыхлые пористые породы. Подобный метод подчиняется закону фильтрации жидкостей и газов в пористой твердой среде – закону Дарси, так как рыхлая горная порода (галечник, песок) состоит из равномерного состава зерен. Аналогичный метод применяется и когда стволы, шурфы или скважины пересекают безнапорные водоносные слои рыхлых пород (рис. 2.1.).

Согласно исследованиям Дарси [111], движение подземных вод по рыхлым породам подчиняется следующему выражению:

$$Q = Fu, \text{ (м}^3\text{/ч) } , \quad (2.2)$$

где:  $Q$  – объемный расход жидкости (м<sup>3</sup>/ч);  $F$  – эффективная площадь рассматриваемого объема рыхлой горной породы, м<sup>2</sup>;  $u$  – скорость фильтрации жидкости, м/ч.

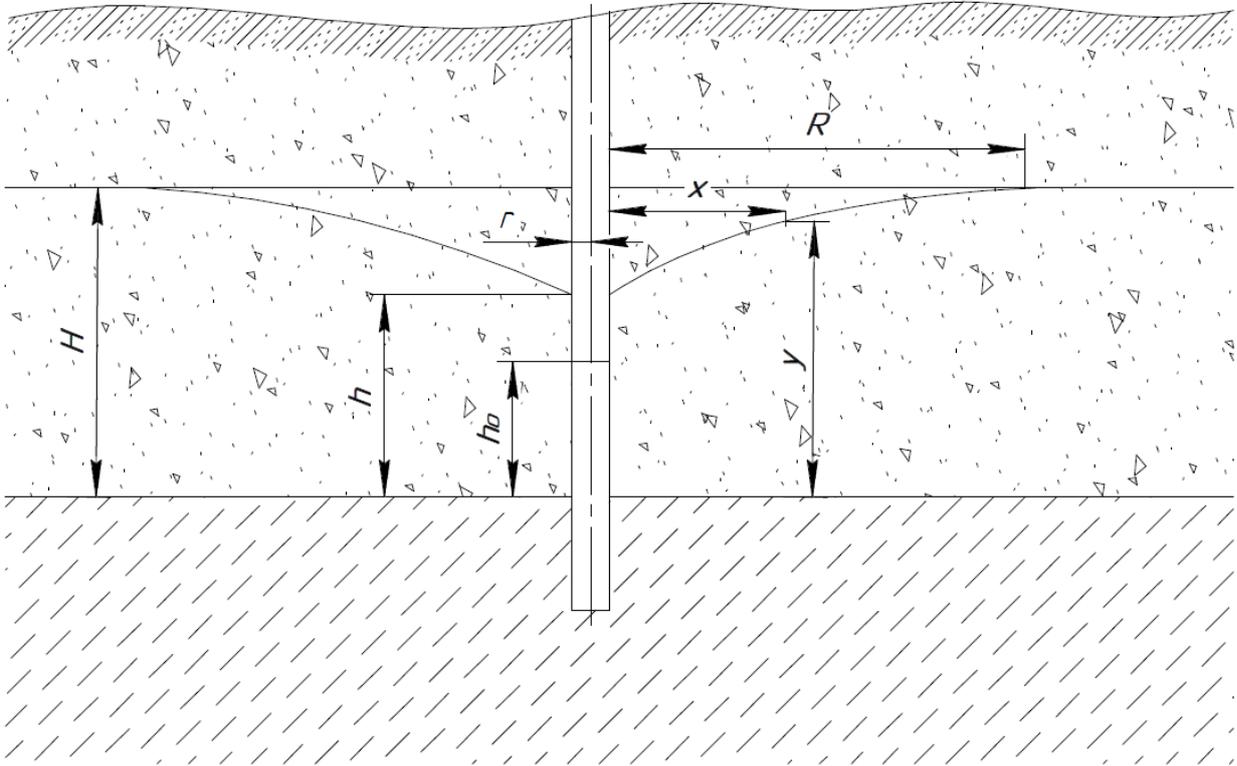


Рисунок 2.1 – Влияние ствола шахты, пересекающего полость безнапорного водоносного пласта, на параметры депрессионной воронки:  $Q$  – количество воды, откачиваемое из ствола в единицу времени, м<sup>3</sup>/с;  $k$  – коэффициент фильтрации;  $u, x$  – координаты случайной точки депрессионной кривой, м;  $h$  – уровень основания депрессионной воронки относительно основания водоносного пласта, м;  $h_0$  – уровень воды в стволе, м;  $r$  – радиус ствола шахты, м;  $R$  – радиус влияния депрессионной воронки, м;  $H$  – уровень воды в водоносном горизонте над непроницаемым слоем до откачки, м.

В соответствии с рисунком 2.1, закон Дарси представлен в дифференциальной форме:

$$Q_{\text{ест}} = Fk \frac{dy}{dx}, \text{ (м}^3\text{/ч)}. \quad (2.3)$$

В данном случае площади поперечного сечения потока жидкости соответствует площадь водоносного горизонта, ограниченного радиусом  $x$  и высотой  $y$  и представляющего собой кругло цилиндрическое сечение площадью  $F$ :

$$F = 2\pi \cdot xy \text{ (м}^2\text{)}; \quad (2.4)$$

откуда:

$$Q_{\text{ест}} = 2\pi x y \cdot k \frac{dy}{dx}, \quad (\text{м}^3/\text{ч}). \quad (2.5)$$

или, получим дифференциальное уравнение:

$$y dy = \frac{Q}{2\pi k} \cdot \frac{dx}{x}. \quad (2.6)$$

Проинтегрировав уравнение 2.6, определим уравнение:

$$\frac{y^2}{2} = \frac{Q}{2\pi k} \ln x + C. \quad (2.7)$$

Значение постоянной интегрирования для стенок ствола шахты, где  $x = r$ ,  $y = h$ , составит:

$$C = \frac{h^2}{2} - \frac{Q}{2\pi k} \ln r; \quad (2.8)$$

подставив выражение 2.8 в 2.7, получим:

$$y^2 = \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{x}{r} + h^2. \quad (2.9)$$

Для приведения выражения к законченному виду и определения количества воды, откачиваемой из ствола в единицу времени, примем  $x = R$ ,  $y = H$  (рис.2.1):

$$Q_{\text{ест}} = \pi k \frac{H^2 - h^2}{\ln \frac{R}{r}}, \quad (\text{м}^3/\text{ч}). \quad (2.10)$$

Или, выражая через десятичный логарифм  $\ln(x) = l g(x) \cdot 2.3$ , получим:

$$Q_{\text{ест}} = 1,36 \frac{k(H^2 - h^2)}{\lg \frac{R}{r}}, \quad (\text{м}^3/\text{ч}). \quad (2.11)$$

При ведении горных работ уровень воды в стволе принимают как  $h_0 = 0$ , что приводит к отрыву от уровня высоты основания депрессионной воронки  $h$ . В таком случае, для оценки притока на практике принимают  $h \approx \frac{1}{2} H$ .

Если же водоносный горизонт имеет поверхностное давление со стороны вышележащего водоупорного, то может существовать вероятность возникновения напора в водоносном слое. Для такого случая приток шахтной воды может быть рассчитан по следующей формуле:

$$Q_{\text{ест}} = 2,73 \frac{km(H-h)}{\lg \frac{R}{r}}, \quad (\text{м}^3/\text{ч}); \quad (2.12)$$

где:  $m$  – мощность водоносного пласта, м.

Рассмотренная формула 2.12 справедлива в случае, когда горные выработки пересекают водоносный горизонт рыхлых пород, обладающих равномерностью свойств и, следовательно, более определенными коэффициентами фильтрации, что в конкретных условиях ведения горных работ мало вероятно. В горных массивах форма, распределение и сочетание систем трещин, по которым проникает вода в шахты, настолько разнообразны, что математические расчеты являются условными и неточными. Поэтому на практике зачастую используют способ, связанный с обработкой статистических данных натуральных наблюдений, собранных в реальных условиях эксплуатации подземных рудников. Суммарный естественный приток при этом определяется функцией:

$$Q_{\text{ест}} = f(Q_{\text{норм}}, Q_{\text{макс}}); \quad (2.13)$$

где:  $Q_{\text{норм}}$ ,  $Q_{\text{макс}}$  – нормальный и максимальный приток шахтной воды в подземные горные выработки, м<sup>3</sup>/с;

Нормальный водоприток в подземные горные выработки рассчитывается, исходя из производительности рудника:

$$Q_{\text{норм}} = \frac{A_p k_B}{p D_k}, \text{ (м}^3\text{/ч)}; \quad (2.14)$$

где:  $A_p$  – производительность рудника, т/ч;  $p$  – плотность выдаваемого сырья, кг/м<sup>3</sup>  
 $k_B$  – коэффициент, показывающий степень водообильности месторождения;  $D_k$  – единица времени, за которое производится расчет, ч.

В свою очередь, коэффициент водообильности определяется отношением:

$$k_B = \frac{Q_B}{A_p}; \quad (2.15)$$

где:  $Q_B$  – количество шахтной воды, выкачиваемой на поверхность, м<sup>3</sup>/ч,  $A_p$  – объем добытого полезного ископаемого в рассматриваемую единицу времени, м<sup>3</sup>/ч.

Максимальный приток в шахту, образующийся в период паводков, таяния снегов и интенсивного выпадения осадков в переходные времена года, определяется кратностью нормального водопритока  $k_{\text{кр}}$ :

$$k_{\text{кр}} = \frac{Q_{\text{шах}} + Q_{\text{пов}}}{Q_{\text{шах}}}; \quad (2.16)$$

где:  $Q_{\text{шах}}$  – постоянный водоприток в шахту, определяемый из статистических наблюдений, м<sup>3</sup>/ч;  $Q_{\text{пов}}$  – повышенный водоприток в подземные горные выработки в водообильные периоды, м<sup>3</sup>/ч.

$$Q_{\text{макс}} = Q_{\text{норм}} \cdot k_{\text{кр}} = \left( \frac{A_p \cdot k_B}{p D_K} \right) \cdot \left( \frac{Q_{\text{шах}} + Q_{\text{пов}}}{Q_{\text{шах}}} \right), (\text{М}^3/\text{ч}). \quad (2.17)$$

Помимо поверхностных вод, естественным образом проходящих сквозь водоносный слой с земной поверхности, в подземные горные выработки для использования при выполнении основных и вспомогательных процессов производственного цикла с поверхности по трубопроводам подается техническая вода  $Q_{\text{техн}}$ , объемы которой определяются выражением:

$$Q_{\text{техн}} = Q_{\text{пром}} + Q_{\text{орош}} + Q_{\text{мойка}} + Q_{\text{закл.раб}}, (\text{М}^3/\text{ч}); \quad (2.18)$$

где:  $Q_{\text{пром}}$ ,  $Q_{\text{орош}}$ ,  $Q_{\text{мойка}}$ ,  $Q_{\text{закл.раб}}$  – объем технической воды, затрачиваемый соответственно: на промывку шпуров, скважин при бурении с мокрым пылеподавлением; орошение горной массы на перегрузочных, загрузочных пунктах и при дроблении руды на дробильно-сортировочный комплекс; мойку машин, оборудования, помещений камер насосных станций, электроподстанции и других; на закладочные работы,  $\text{М}^3/\text{ч}$ .

Расход технической воды ( $Q_{\text{техн}}$ ), используемой при выполнении основных и вспомогательных процессов производственного цикла, определяется дифференцировано по видам технологических процессов:

– промывка шпуров, скважин при бурении с мокрым пылеподавлением:

$$Q_{\text{пром}} = \frac{q_{\text{шп}}}{v_{\text{шп}}} \cdot Q_{\text{шп}} + \frac{q_{\text{скв}}}{v_{\text{скв}}} \cdot Q_{\text{скв}}, (\text{М}^3/\text{ч}); \quad (2.19)$$

где:  $q_{\text{шп}}$ ,  $q_{\text{скв}}$  – общая длина пробуренных шпуров за рассматриваемый промежуток времени, скважин, м/ч;  $v_{\text{шп}}$ ,  $v_{\text{скв}}$  – погонная скорость бурения шпуров, скважин, м/ч;  $Q_{\text{шп}}$ ,  $Q_{\text{скв}}$  – удельный расход технической воды на бурение шпура, скважины,  $\text{М}^3/\text{ч}$ ;  
– орошение горной массы на перегрузочных, загрузочных пунктах и при дроблении руды на дробильно-сортировочный комплекс:

$$Q_{\text{орош}} = Q_{\text{руд}} \cdot (q_{\text{ор.пр}} + q_{\text{ор.др}}), (\text{М}^3/\text{ч}); \quad (2.20)$$

где:  $Q_{\text{руд}}$  – объем добываемой руды за промежуток времени, т/ч;  $q_{\text{ор.пр}}$  – удельный расход технической воды на орошение руды при погрузочно-разгрузочных работах,  $\text{М}^3/\text{т}$ ;  $q_{\text{ор.др}}$  – удельный расход технической воды на орошение руды при дроблении,  $\text{М}^3/\text{т}$ .

– мойка горных машин, оборудования, помещений камер насосных станций, электроподстанции и других:

$$Q_{\text{мойка}} = N_{ij} \cdot q_{ij}, (\text{м}^3/\text{ч}) \quad (2.21)$$

где:  $N_{ij}$  – количество  $i$ -ых горных машин, помещений, оборудования и пр., подлежащих мойке в ходе ведения  $j$ -го технологического процесса, шт;  $q_{ij}$  – удельный расход технической воды на мойку  $i$ -ой машины, помещения, оборудования и пр.  $j$ -го технологического процесса,  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

– закладочные работы:

$$Q_{\text{закл.раб}} = Q_{\text{др.}} + Q_{\text{пр.тр}}, (\text{м}^3/\text{ч}) \quad (2.22)$$

где:  $Q_{\text{др.тр}}$  – объем дренируемой воды из закладываемого массива камеры через дренажные трубы в изолирующей перемычке,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $Q_{\text{пр.тр}}$  – объем технической воды, используемой для промывки закладочного трубопровода,  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

Общий объем дренируемой воды из закладываемого массива камеры через дренажные трубы в изолирующих перемычках, трещины и поры в окружающем рудном, породном массивах и в соседнем заложеном массиве, а также через верхний слив воды из образовавшегося «прудка» отстоя, определяется из выражения:

$$Q_{\text{др.}} = k_y \cdot Q_{\text{зм}}, (\text{м}^3/\text{ч}) \quad (2.23)$$

где:  $k_y$  – коэффициент усадки закладочной смеси, характеризующий уменьшение ее объема в выработанном пространстве за счет водоотдачи массива и дренажа избыточной воды;  $Q_{\text{зм}}$  – объем возводимого закладочного массива в рассматриваемый период,  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

При прекращении подачи закладочной смеси в выработанное пространство или после завершения процесса закладки выработки по аварийной, технической или технологической причине, производятся мероприятия по очистной промывке закладочного трубопровода залповым пуском фиксированного количества воды из соответствующего резервуара.

Суммарный поток технической воды  $Q_{\text{пр.тр}}$ , подаваемый в подземные горные выработки для промывки закладочного трубопровода, определится:

$$Q_{\text{пр}} = \sum (n_{\text{зп}1} Q_{\text{зп}1} + n_{\text{зп}2} Q_{\text{зп}2} + \dots + n_{\text{зп}i} Q_{\text{зп}i}), (\text{м}^3/\text{ч}), \quad (2.24)$$

где:  $n_{зпi}$  – число залповых пусков в закладочный трубопровод;  $Q_{зпi}$  – единичный залповый поток воды в промываемый трубопровод, (м<sup>3</sup>/ч).

Прогнозное значение нормального притока для оценки объемов водоотлива получим, подставив значения из формул (2.11, 2.18) в формулу (2.1) и выполнив преобразования:

$$Q_{\text{отк.норм.теор}} = 1,36 \frac{k(H^2-h^2)}{\lg \frac{R}{r}} + \frac{q_{\text{шп}}}{v_{\text{шп}}} \cdot Q_{\text{шп}} + \frac{q_{\text{скв}}}{v_{\text{скв}}} \cdot Q_{\text{скв}} + Q_{\text{руд}} \cdot (q_{\text{ор.пр}} + q_{\text{ор.др}}) + N_{ij} \cdot q_{ij} + k_y \cdot Q_{\text{зм}} + \sum (n_{зп1} Q_{зп1} + n_{зп2} Q_{зп2} + \dots + n_{зпi} Q_{зпi}), \text{ (м}^3\text{/ч)}. \quad (2.25)$$

Максимальный теоретический приток определяется подстановкой значений из формул (2.12, 2.18) в формулу (2.1):

$$Q_{\text{отк.макс.теор}} = 2,73 \frac{km(H-h)}{\lg \frac{R}{r}} + \frac{q_{\text{шп}}}{v_{\text{шп}}} \cdot Q_{\text{шп}} + \frac{q_{\text{скв}}}{v_{\text{скв}}} \cdot Q_{\text{скв}} + Q_{\text{руд}} \cdot (q_{\text{ор.пр}} + q_{\text{ор.др}}) + N_{ij} \cdot q_{ij} + k_y \cdot Q_{\text{зм}} + \sum (n_{зп1} Q_{зп1} + n_{зп2} Q_{зп2} + \dots + n_{зпi} Q_{зпi}), \text{ (м}^3\text{/ч)}. \quad (2.26)$$

Проектное значение нормального водопритока получим, подставив значения из формул (2.14, 2.18) в формулу (2.1) и выполнив преобразования:

$$Q_{\text{отк.норм.практ}} = \frac{A_p \cdot k_B}{pD_k} + \frac{q_{\text{шп}}}{v_{\text{шп}}} \cdot Q_{\text{шп}} + \frac{q_{\text{скв}}}{v_{\text{скв}}} \cdot Q_{\text{скв}} + Q_{\text{руд}} \cdot (q_{\text{ор.пр}} + q_{\text{ор.др}}) + N_{ij} \cdot q_{ij} + k_y \cdot Q_{\text{зм}} + \sum (n_{зп1} Q_{зп1} + n_{зп2} Q_{зп2} + \dots + n_{зпi} Q_{зпi}), \text{ (м}^3\text{/ч)}. \quad (2.27)$$

Практическое значение максимального водопритока получим, подставив значения из формул (2.17, 2.18) в формулу (2.1) и выполнив преобразования:

$$Q_{\text{отк.макс.практ}} = \left( \frac{A_p \cdot k_B}{pD_k} \right) \cdot \left( \frac{Q_{\text{шах}} + Q_{\text{пов}}}{Q_{\text{шах}}} \right) + \frac{q_{\text{шп}}}{v_{\text{шп}}} \cdot Q_{\text{шп}} + \frac{q_{\text{скв}}}{v_{\text{скв}}} \cdot Q_{\text{скв}} + Q_{\text{руд}} (q_{\text{ор.пр}} + q_{\text{ор.др}}) + N_{ij} q_{ij} + k_y Q_{\text{зм}} + \sum (n_{зп1} Q_{зп1} + n_{зп2} Q_{зп2} + \dots + n_{зпi} Q_{зпi}), \text{ (м}^3\text{/ч)}. \quad (2.28)$$

Описанная методика прогнозной оценки ожидаемого водопритока в систему шахтного водоотлива позволяет определить прогнозное значение максимального притока в подземные выработки.

Однако, такие расчеты справедливы лишь для тех случаев, когда горные выработки пересекают водоносный горизонт рыхлых пород с установившимся коэффициентом фильтрации. В реальных условиях разработки рудных месторождений в скальных массивах горных пород притоки воды в шахты зависят от комплекса изменяющихся во времени и в пространстве взаимодействующих

природных и техногенных факторов: в связи с развитием трещиноватости и сдвижений в массиве горных пород над вырабатываемыми пространствами, что косвенно учитывается в формулах 2.27 и 2.28 на основе анализа результатов статистических наблюдений.

Альтернативным способом определения объемов водопритока в подземные горные выработки является разработка регламента работы водоотливных станций [111]. Общий откачиваемый на поверхность приток шахтной воды определяется согласно выражению:

$$Q_{\text{отк.}} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_n \cdot H_n}{3600 \cdot 10^3 \cdot \eta_n \cdot \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{э}}} (n \cdot T_{\text{нор}} \cdot N_{\text{нор}} + n_{\text{н.макс}} \cdot T_{\text{макс}} \cdot N_{\text{макс}}), \quad (2.29)$$

где:  $\rho$  – плотность шахтной воды, кг/м<sup>3</sup>;  $Q_n$ ,  $H_n$ ,  $\eta_n$  – соответственно, производительность, напор и КПД насоса;  $\eta_{\text{дв}}$ ,  $\eta_{\text{э}}$  – КПД электродвигателя и электросети;  $n_{\text{нор}}$ ,  $n_{\text{макс}}$  – количество рабочих насосов для откачки нормального и максимального водопритоков, шт;  $T_{\text{нор}}$ ,  $T_{\text{макс}}$  – время работы насосов на откачке нормального и максимального водопритоков, ч;  $N_{\text{нор}}$ ,  $N_{\text{макс}}$  – количество дней в году с нормальным и максимальным водопритоком, шт.

Рассмотренные способы оценки притоков воды в шахту, основанные на данных статистических наблюдениях и теоретических расчетах позволяет выявить зависимости притока в горные выработки от влияния природных или техногенных факторов в различных гидрогеологических и горнотехнических условиях, что позволяет спрогнозировать динамику притока шахтной воды в подземные выработки для повышения эффективности применения систем рекуперации энергии гидропотоков.

## **2.2. Исследование и обоснование конструктивных параметров системы водоотлива с применением малых гидроэлектростанций**

Анализ мирового опыта преобразования энергии гидропотоков показал, что на практике существуют системы для рекуперации энергии перепускаемых самотечно гидропотоков в подземных условиях. При этом, общей отличительной чертой таких систем является то, что источником гидравлических потоков служит

искусственно созданный резервуар, расположенный на дневной поверхности, а перепуск жидкости осуществляется по заранее спроектированным путепроводам.

Вариант использования в условиях подземного рудника энергии гидропотоков, попавших в выработанное пространство естественным или технологическим маршрутами, предопределил выполнение специальных теоретических и экспериментальных исследований в области аккумуляирования, эффективного перераспределения и преобразования энергии шахтной воды.

Из анализа литературных источников установлено, что тип гидроэлектростанции выбирают в зависимости от ее назначения и параметров гидроузла, топографических, инженерно-геологических, климатических условий и различают по способу создания напора:

- русловые – здания ГЭС непосредственно участвуют в создании напора;
- приплотинные – водоподводящий тракт расположен в теле плотины, а здание ГЭС у нижней отметки плотины;
- деривационные – водоприемные устройства, деривация и здания ГЭС расположены независимо от водоподпорных сооружений гидроузла [101].

Из вышеприведенного списка к условиям применения в горнотехнической системе (ГТС) наиболее близок деривационный тип ГЭС, так как напор в ней образуется путем создания сосредоточенного перепада гидропотока за счет отвода воды из реки по искусственному водоводу, в качестве которого применяются открытые каналы (безнапорная деривация); напорные туннели или трубопроводы (напорная деривация). В таком типе ГЭС зачастую используются ковшовые гидротурбины, ввиду большого перепада высотных отметок. Такая гидроэлектростанция относится к безнапорному типу и использует сравнительно небольшой участок 2 реки (рис 2.4), где плотина 1 создает подпор лишь для направления воды в деривационный канал 3. Очистка воды от наносов, шуги и иного мусора осуществляется схожим способом, применяемым в классических системах подземного водоотлива – отстаиванием жидкости в водосборниках 4. Затем станционный узел включает в себя резервуар 5, служащий для уравнивания давления и защиты гидроагрегатов, расположенных в здании ГЭС 7, от гидравлического удара. Соединяется здание ГЭС с уравнительным резервуаром

посредством турбинных трубопроводов 6, в то время как отвод потока осуществляется через канал 8. Также на схеме отображен канал 9, служащий для холостого сброса напора в аварийных случаях или при плановом ремонте [72].

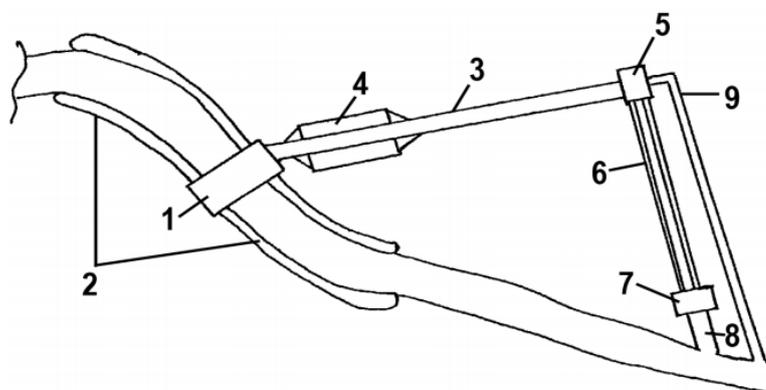


Рисунок 2.2 – Схема ГЭС деривационного типа.

Зачастую, в таком виде гидроэлектростанций используется лопастной тип рабочего колеса гидротурбины, так как при деривационном перепуске образуется большой перепад высот между верхним и нижним бьефом. Выполненный ранее анализ также указал на необходимость использования в условиях подземного рудника гидротурбин активного типа, собственно, к которым и относится лопастная гидротурбина.

Основываясь на анализе конструктивных особенностей, принципах функционирования малой ГЭС деривационного типа и лопастной гидротурбины, сформирована схема системы водоотлива с учетом условий применения гидротурбинных агрегатов, представленная на рисунке 2.3.

В отличие от классической схемы малой ГЭС деривационного типа, в условиях подземного рудника напор потока воды для функционирования гидроагрегата создается за счет вертикального перепуска шахтной воды, в то время как очистка потока осуществляется также посредством применения водосборника 1 (рис. 2.3). В качестве деривационного канала выступают перепускные скважины – рабочая 2 и резервная 3, оснащенные ремонтно-аварийными задвижками 4. Функцию уравнивания давления и защиты гидроустановки выполняет устройство 5, представляющее собой клапан защиты от гидроудара. Далее по движению потока устанавливается сопло 6, управляющее струей, попадающей на лопатки рабочего колеса 7. Отдавший свою энергию гидропоток попадает в водоотливной лоток 8,

откуда шахтная вода поступает в главный водосборник 9, и по трубопроводу 10 она нагнетается насосом 11 в напорную вертикальную магистраль 12, откуда выдается на дневную поверхность.

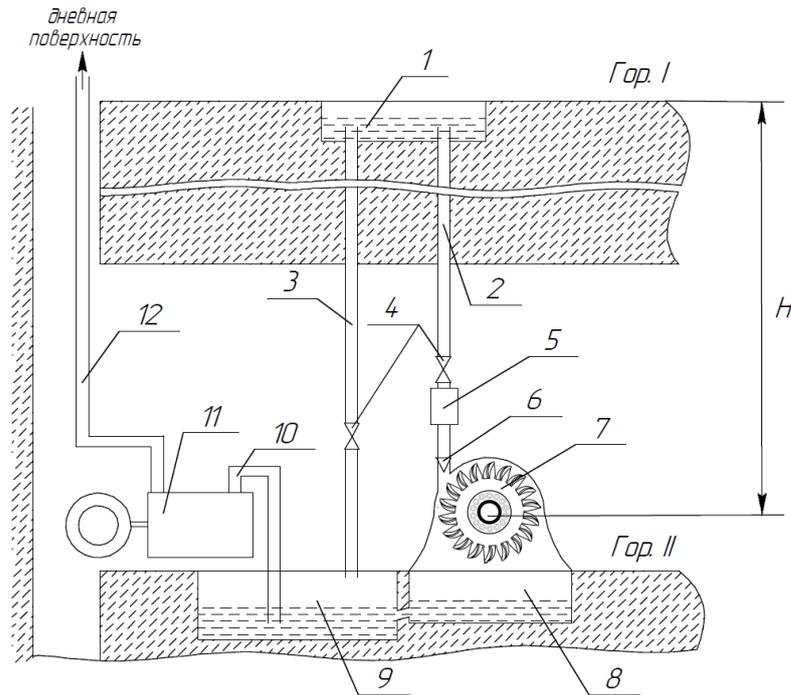


Рисунок 2.3 – Схема одноступенчатой системы водоотлива с рекуперацией энергии гидропотоков на базе использования малой ГЭС

Принцип работы схемы заключается в следующем:

- шахтная вода, попадающая на гор. I поступает в водосборник 1, где она отстаивается для осаждения твердых взвешенных частиц;
- поддержание неизменного уровня жидкости в водосборнике 1 и рабочей высоты  $H$  производится гидротурбинным соплом 6, регулировочная игла которого управляется с использованием программного обеспечения, основываясь на показаниях датчиков уровня воды в водосборнике и давления у подножья перепускной скважины 2;
- вследствие того, что лопастная гидротурбина относится к активному типу гидротурбин и подразумевает функционирование рабочего органа в воздушном пространстве, отработанная вода попадает в водоотливной лоток 8, освобождая рабочую полость гидроагрегата;
- водоотливной лоток гидравлически связан с главным водосборником, откуда шахтная вода классическим способом выдается на дневную поверхность.

При этом высота перепуска  $H$  в комплексе с объемами притока шахтной воды (рис. 2.3) являются базовыми величинами, на основе которых рассчитываются параметры рабочего колеса гидротурбины по формулам 1.4 – 1.8. Также полезная мощность, которая рассчитывается по формуле 1.3 на валу рабочего колеса, и она прямо пропорционально зависит от высоты перепуска и объемного притока шахтной воды в единицу времени. В этой связи, учитывая изменчивость гидрогеологических и горно-геологических условий месторождений, необходимо варьировать и оптимизировать базовые величины. Рассмотрим возможные случаи распределения притока шахтных вод с различной высотой их перепуска, опираясь на расчеты по формуле 1.3. Результаты расчета представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Расчетная мощность, генерируемая гидротурбиной в зависимости от величины шахтного водопритока и глубины выработок

		Шахтный приток, м <sup>3</sup> /ч												
		0	35	70	105	140	175	210	245	280	315	350		
Глубина, м	50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	100	4,7	9,5	14,2	18,9	23,6	28,4	33,1	37,8	42,5	47,3	47,3	47,3	47,3
	150	9,5	18,9	28,4	37,8	47,3	56,7	66,2	75,6	85,1	94,5	94,5	94,5	94,5
	200	14,2	28,4	42,5	56,7	70,9	85,1	99,2	113,4	127,6	141,8	141,8	141,8	141,8
	250	18,9	37,8	56,7	75,6	94,5	113,4	132,3	151,2	170,1	189,0	189,0	189,0	189,0
	300	23,6	47,3	70,9	94,5	118,1	141,8	165,4	189,0	212,6	236,3	236,3	236,3	236,3
	350	28,4	56,7	85,1	113,4	141,8	170,1	198,5	226,8	255,2	283,5	283,5	283,5	283,5
	400	33,1	66,2	99,2	132,3	165,4	198,5	231,5	264,6	297,7	330,8	330,8	330,8	330,8
	450	37,8	75,6	113,4	151,2	189,0	226,8	264,6	302,4	340,2	378,0	378,0	378,0	378,0
	500	42,5	85,1	127,6	170,1	212,6	255,2	297,7	340,2	382,7	425,3	425,3	425,3	425,3
	550	47,3	94,5	141,8	189,0	236,3	283,5	330,8	378,0	425,3	472,5	472,5	472,5	472,5
	600	52,0	104,0	155,9	207,9	259,9	311,9	363,8	415,8	467,8	519,8	519,8	519,8	519,8
	650	56,7	113,4	170,1	226,8	283,5	340,2	396,9	453,6	510,3	567,0	567,0	567,0	567,0
	700	61,4	122,9	184,3	245,7	307,1	368,6	430,0	491,4	552,8	614,3	614,3	614,3	614,3
	750	66,2	132,3	198,5	264,6	330,8	396,9	463,1	529,2	595,4	661,5	661,5	661,5	661,5

В гидроэнергетике принята классификация ГЭС по их мощностным характеристикам: до 100 кВт – микро ГЭС, до 2 000 кВт – мини ГЭС, до 25 000 кВт – малая ГЭС. По этому принципу разделения в таблице 2.1 – красным выделена зона мощностных характеристик, присущих микроГЭС, остальная зона представляет собой класс малых ГЭС. Таким образом, анализируя полученные данные из таблицы 2.1, видим, что микроГЭС в большей степени попадают в диапазон притока до 105 м<sup>3</sup>/ч. Они вырабатывают ощутимые объемы энергии лишь при большой высоте перепуска. В то время, как, начиная с притока 105 м<sup>3</sup>/ч и выше, заметно снижается требуемая высота перепуска для генерации энергии свыше 100

кВт. Причем, этот фактор существенно снижает капитальные затраты на монтаж системы перепускных скважин или других инженерных сооружений для перемещения жидкости, что в совокупности положительно влияет на экономические показатели эксплуатации микроГЭС [104].

Как говорилось ранее, альтернативой для микроГЭС служит центробежный насос, работающий в режиме гидротурбины. Однако, технические характеристики гидроагрегата в таком представлении несколько ниже классической гидротурбинной установки. Полезная мощность, которую можно получить на валу рабочего колеса центробежного насоса в режиме реверса (табл. 2.2), также просчитывается по формуле 1.3, но значение КПД, согласно проведённому анализу, в этом случае снижается до 0,7.

Таблица 2.2 – Расчетная мощность, генерируемая насосом в режиме гидротурбины, в зависимости от величины шахтного водопритока и глубины расположения выработок

		Шахтный приток, м <sup>3</sup> /ч										
		0	35	70	105	140	175	210	245	280	315	350
Глубина, м	50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	100	3,2	6,3	9,5	12,6	15,8	18,9	22,1	25,2	28,4	31,5	
	150	6,3	12,6	18,9	25,2	31,5	37,8	44,1	50,4	56,7	63,0	
	200	9,5	18,9	28,4	37,8	47,3	56,7	66,2	75,6	85,1	94,5	
	250	12,6	25,2	37,8	50,4	63,0	75,6	88,2	100,8	113,4	126,0	
	300	15,8	31,5	47,3	63,0	78,8	94,5	110,3	126,0	141,8	157,5	
	350	18,9	37,8	56,7	75,6	94,5	113,4	132,3	151,2	170,1	189,0	
	400	22,1	44,1	66,2	88,2	110,3	132,3	154,4	176,4	198,5	220,5	
	450	25,2	50,4	75,6	100,8	126,0	151,2	176,4	201,6	226,8	252,0	
	500	28,4	56,7	85,1	113,4	141,8	170,1	198,5	226,8	255,2	283,5	
	550	31,5	63,0	94,5	126,0	157,5	189,0	220,5	252,0	283,5	315,0	
	600	34,7	69,3	104,0	138,6	173,3	207,9	242,6	277,2	311,9	346,5	
	650	37,8	75,6	113,4	151,2	189,0	226,8	264,6	302,4	340,2	378,0	
	700	41,0	81,9	122,9	163,8	204,8	245,7	286,7	327,6	368,6	409,5	
750	44,1	88,2	132,3	176,4	220,5	264,6	308,7	352,8	396,9	441,0		

Сопоставив данные таблиц 2.2 и 2.1, видно смещение красной зоны выработки электрической энергии вниз и вправо. Таким образом, зона уменьшенной высоты перепуска шахтной воды возможна только с притоком шахтных вод не менее 140 м<sup>3</sup>/ч, а для выработки электроэнергии гидротурбиной высота перепуска должна быть увеличена на 50 м или на один горизонт.

Несмотря на пониженные характеристики центробежного насоса при использовании его в качестве гидротурбины, такая гидроустановка имеет несомненные преимущества над классической микроГЭС:

- широкое распространение центробежных насосов в промышленном секторе;

- высокая ремонтпригодность, в том числе благодаря отсутствию необходимости дополнительного обучения обслуживающего персонала, в связи со схожестью с центробежными насосами в классическом исполнении;

- доступность и разнообразие модификаций, подходящих для решения большинства задач.

В конечном итоге выбор в пользу той или иной модификации микроГЭС необходимо осуществлять не только основываясь на расчетах эффективности производства электроэнергии, но и на логистической доступности того или иного решения.

По своему назначению гидротурбинная установка подразумевает непосредственное использование энергии гидропотоков, преобразуя ее в механическую. Однако, это не единственный способ использования этой полезной энергии. Так, существует подход к рекуперации энергии гидропотоков, где давление, создаваемое водяным столбом, используется для снижения нагрузки на совершаемое механическое действие.

### **2.3. Обоснование структуры и функциональной схемы водоотлива с активной очисткой шахтных вод и оборотным водоснабжением**

Рассмотренные в обзорной главе схемы водоотлива, описывающие способы использования энергии перепускаемой шахтной воды, имеют один существенный недостаток, который состоит в необходимости формирования на поверхности водных резервуаров. Наличие абразивных частиц в откачиваемой воде пагубно влияет на срок службы насосных установок. Указанный недостаток присущ всем известным системам водоотлива, прежде всего, из-за применяемого способа очистки шахтных вод – необходимости отстаивания твердых частиц в

водосборнике [80]. Ввиду того, что водосборники являются проточными, содержащиеся в воде твердые частицы не успевают полностью осесть до того момента, когда они попадают в приемные колодцы насосных установок [52].

Помимо этого, факт использования водосборников в качестве устройства для очистки шахтных вод обязывает выносить базовую плоскость насосного агрегата, построенную, как правило горизонтально, через ось вращения рабочего колеса, над поверхностью воды на геодезическую высоту подачи  $H_{ггo}$ , обеспечивая при этом всасывающий режим работы насосной установки (рис.2.4).

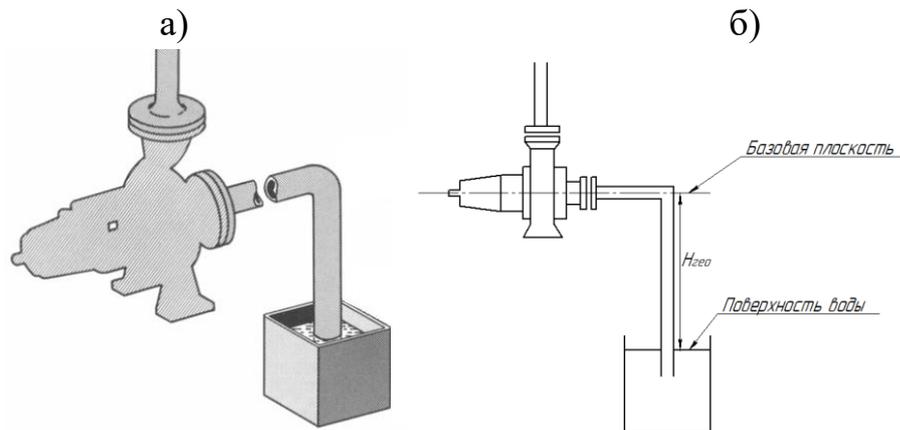


Рисунок 2.4 – Насосная установка при эксплуатации в режиме всасывания: а – общий вид; б – вид в разрезе

Упомянутая геодезическая высота подачи – разница высот между уровнями жидкости со всасывающей и с напорной стороны негативно сказывается на мощности насоса, определяемой по формуле:

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta}, \text{ (Дж/с или Вт)}, \quad (2.30)$$

где:  $\rho$  – плотность откачиваемой жидкости ( $\text{кг/м}^3$ );  $g$  – гравитационная постоянная ( $\text{м/с}^2$ );  $Q$  – производительность насоса ( $\text{м}^3/\text{с}$ );  $H$  – требуемый напор, м;  $\eta$  – КПД насоса.

Напор от установки открытых емкостей, в свою очередь, рассчитывается:

$$H = H_{ггo} + \sum H_v, \text{ (м)}, \quad (2.31)$$

где:  $H_v$  – сумма всех потерь напора в трубопроводах и соединяющей арматуре во всасывающем и нагнетательных трубопроводах, м.

В рассмотренном режиме работы гидроустановка испытывает отрицательный напор  $H_{ггo}$  (рис.2.4), который негативно влияет на

производительность насосных установок, это доказывает расчёт по формулам 2.30 и 2.31.

Помимо этого, возвращаясь к упомянутому выше главному препятствию использования микроГЭС в шахте, в виду присутствия абразивных частиц в шахтной воде, при длительной эксплуатации насосных агрегатов в подобных условиях происходит интенсивный износ оборудования в рабочей области, что непременно влечет снижение производительности  $Q$  гидронасосов. Для поддержания необходимого напора жидкости на практике прибегают к искусственному увеличению производительности с расчетом механического износа насоса, что приводит к умышленному увеличению потребляемой мощности  $P$ .

Устранение рассмотренных негативных проявлений возможно при использовании энергии жидкости, которую перепускают с верхних горизонтов шахты на горизонт главного водоотлива. В подобной конфигурации схемы водоотлива энергию гидротоков возможно использовать не только для повышения КПД насосных установок подпорным давлением, как это показано на рисунке 1.8, но и для очистки шахтной воды от шлама путем ускорения процесса седиментации за счет воздействия центробежных сил.

Процесс седиментации твердых частиц за счет использования силы гравитации активно применяется в центробежном сепараторе – гидроциклоне. Величина скорости сепарации частиц в центробежном поле гидроциклона превышает скорость осаждения эквивалентных частиц в поле гравитации в сотни раз. Диапазон производительности промышленных серийных установок варьирует от 2,5 до 370 м<sup>3</sup>/ч, а рабочее давление достигает 10 бар [48].

Опираясь на проведенный анализ характеристик водоотлива (см. табл. 1.2), высота перепуска шахтных вод варьирует от 50 до 460 м, что приблизительно соответствует давлению в 4,9 – 45 бар, а водоприток изменяется от 150 до 1250 м<sup>3</sup>/ч. Таким образом, диапазон рабочих характеристик гидроциклона вписывается в условия, определяемые системами шахтного водоотлива. В определенных случаях созданные условия превосходят по гидравлическим показателям характеристики гидроагрегата. Опираясь на результаты проведенного анализа, была спроектирована новая схема водоотлива (рис. 2.5), включающая в себя, в отличные

от классической, три главных признака: автоматизированная очистка шахтных вод с удалением твердых частиц в потоке, размер которых достигает до 50 микрон; увеличение срока службы насосных установок вплоть до срока, установленного заводом изготовителем; повышение КПД насосов за счет использования подпорного давления, создаваемого перепускными скважинами [86,64,32].

По своей структуре схема шахтного водоотлива с активной очисткой вод является одноступенчатой. Шахтная вода Q1–Q3 (рис. 2.5), с изменяющимся объемом потока, перепускается на нижний горизонт 4, а затем выдается на дневную поверхность. Однако, отличительной особенностью работы разработанной схемы является отсутствие водосборников 6 на промежуточных горизонтах 1 – 3, находящихся на высотах Н1, Н2 и Н3, соответственно, относительно главного горизонта водоотлива 4. Такой подход стал возможным, благодаря очистке вод от шламовых отложений за счет сепарации частиц твердой фазы в гидроциклоне 8. Для его эффективной работы обеспечивается заданное входное гидравлическое давление, которое в данной схеме создает водяной столб, высотой Н4, определяемое в соответствии с техническими характеристиками гидроциклона. Давление водяного столба создается в полости перепускных скважин 5 за счет аккумулирующего коллектора 7 и поддерживается динамично в заданном диапазоне, благодаря заданному количеству эксплуатируемых одновременно «связок» гидроциклон – насос.

Стоит отметить, что созданное водяным столбом Н4 давление снижается при прохождении потока сквозь гидроциклон на величину, находящуюся в пределах 1-2 бар, в зависимости от конструкции гидроустановки и гидравлических потерь в проточной части, что составляет до 50% полного давления. Таким образом, остаточное давление потока, поступающего в насосную установку 10 по трубопроводу 9, выполняет роль подпорного давления, тем самым повышая КПД насоса.

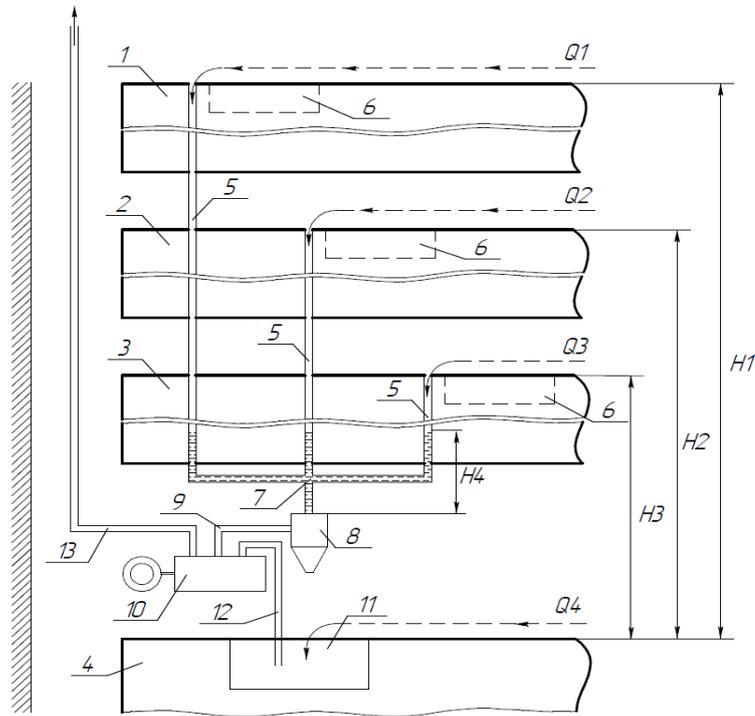


Рисунок 2.5 – Схема шахтного водоотлива с активной очисткой перепускаемой шахтной воды

Осушение горизонта 4 от водопритока  $Q_4$  осуществляется традиционным способом с использованием водосборника 11, рассчитанного на вмещающий объем шахтной воды, равный 4-х часовому нормальному притоку в шахту, как того требует нормативная документация [108].

Отличительной особенностью в разработанной схеме от классической является способ подключения входных трубопроводов 9 и 12 к насосной установке 10, представляющей собой секционный центробежный насос. Таким образом, трубопровод 12 подключается в первую, безнапорную секцию, а трубопровод 9 – в напорную секцию, при этом должно соблюдаться условие соответствия номинального гидравлического давления, развиваемого в полости центробежного насоса, с остаточным давлением со стороны гидроциклона. Такой способ подключения насосной установки способен снизить затраты электрической энергии на откачку шахтной воды из водосборника 11. Поступающая вода из трубопроводов 9 и 11 в полость гидронасоса 10 нагнетается в высоконапорный трубопровод 13, по которому выдается на поверхность.

Важно отметить, что недостатком разработанной схемы водоотлива является оставление эксплуатируемых ранее водосборников 6 на промежуточных горизонтах 1 – 3. Так в работе член-корр. РАН Д.Р. Каплунова с соавторами [54,71] обоснована необходимость эффективного использования выработанного пространства в различных функциональных назначениях для реализации полного цикла комплексного освоения месторождений твердых полезных ископаемых. В связи с этим была разработана расширенная версия схемы водоотлива с активной очисткой шахтных вод, где выбывшие из эксплуатации водосборники используются в качестве накопителей воды и для технологических и противопожарных нужд (рис. 2.6) [65,59].

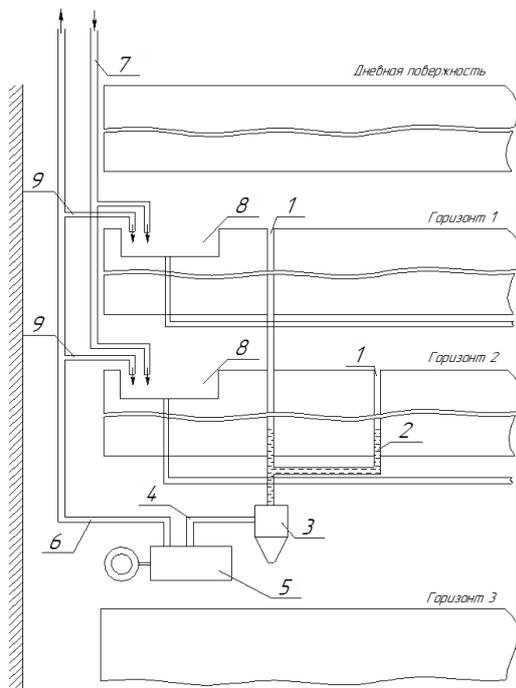


Рисунок 2.6 – схема шахтного водоотлива с оборотным техническим водоснабжением

Принцип работы данной схемы водоотлива с функцией пополнения подземных резервуаров 8, представленной на рисунке 2.6 схож с рассмотренной ранее схемой, где используется энергия перепускаемой по скважинам 1 жидкости 2 для автоматизации очистки гидроциклоном 3 и повышения КПД насосных установок 5, за счет использования подпорного давления из приемного трубопровода 4. Отличительной особенностью от разработанной схемы, показанной ранее на рисунке 2.6, является конструкция высоконапорного трубопровода 6, который оснащен трубными отводами 9 для наполнения подземных резервуаров очищенной шахтной водой.

Использование аккумулируемой воды в подземных резервуарах 8 возможно как для технологических нужд, так и в качестве источника в системе пожаротушения. Однако, при эксплуатации подобных комплексов в составе противопожарной системы на них накладываются дополнительные требования, определяемые нормативной документацией [109], которые устанавливают, что противопожарное водоснабжение подземного рудника должно осуществляться из двух и более независимых источников, объем которых определен из расчета 50% объема воды, необходимого для функционирования системы пожаротушения. Источником водоснабжения шахтной системы пожаротушения могут служить: поверхностные воды (реки, хранилища, озера, каналы); существующие хозяйственно-питьевые трубопроводы (районные, городские и т.п.); подземные воды (естественный и технологический приток).

При использовании в качестве источника пожаротушения шахтных вод, действующая нормативная документация предлагает рассмотреть следующие варианты проектных решений [92]: использование прудков для очистки шахтных вод; применение средств очистки трубопроводов от внутренних отложений; корректирование сроков службы трубопровода в связи с ростом сопротивления трубопровода из-за нарастающих внутренних отложений и усилением коррозионного износа труб за счет повышенной агрессивности воды.

Таким образом, с учетом предъявляемых нормативных требований, в схему водоотлива добавлен трубопровод 7, исходящий от поверхностных источников водоснабжения и играющий роль второго источника воды для противопожарных резервуаров 8. В этой связи полный цикл работы системы водоотведения состоит из следующих этапов:

1. Аккумуляция и очистка: шахтная вода с промежуточных горизонтов попадает по перепускным скважинам 1 (рис.2.6) в водный коллектор 2, давление водного столба в котором обеспечивает эффективную работу гидроциклона 3.

2. Откачка: очищенная шахтная вода попадает в насосную установку 5, которая подает шахтную воду в высоконапорный трубопровод 6.

3. Наполнение резервуаров: поток из высоконапорного трубопровода 6 по трубным отводам 9 поступает в резервуары 8 при условии пониженного в них

уровня воды, в противном случае шахтная вода выдается на поверхность. Трубопровод 7 является резервным и постоянно находится в готовом к работе состоянии.

Энергоэффективность схемы водоотлива с обратным водоснабжением, помимо использования энергии перепускаемой жидкости, обеспечивается расположением резервуаров пожаротушения 8 в эксплуатируемых ранее водосборниках на промежуточных горизонтах. Это позволяет снизить потребление электроэнергии на осушение выработок глубоких горизонтов за счет снижения высоты подъема жидкости в процессе наполнения этих подземных резервуаров. Однако, следует отметить, что ограничением применения данной схемы является мощность междуэтажных целиков, значение которой играет роль в определении допустимого давления в противопожарном трубопроводе. Так, исходя из нормативной документации, требования к давлению воды в данном трубопроводе составляют от 0,5 до 1,0 МПа, что соответствует высоте водяного столба не менее 51 – 102 м.

Если требования к эксплуатации обратного водоснабжения в схеме для противопожарных нужд устанавливаются требованиями нормативной документации, то для технологических нужд требования определяет оборудование, используемое данную шахтную воду. Например, при использовании очищенной шахтной воды для промывки закладочных трубопроводов необходима условно чистая вода, а для использования ее для орошения контура выработок требуется более чистая, избавленная от крупных взвешенных частиц, которые способны засорить сопла оросительной установки. Помимо качества очищенной воды, в зависимости от требований технологических устройств, различается необходимое минимальное используемое давление. Если для буровой установки, где в качестве промывочной жидкости применяется вода, необходимо давление не менее 1 МПа, то для гидравлического перфоратора необходимо рабочее давление 10 МПа. Таким образом, схема с обратным водоснабжением для технологических нужд подходит только для низконапорного оборудования.

В классической схеме водоотлива логика работы насосных установок достаточно проста и базируется лишь на одном параметре – уровне шахтной воды в водосборниках, то в разработанной схеме существует несколько базовых

опорных параметров, в которых изменение каждого параметра влияет на эффективность функционирования всей системы. Такими параметрами являются:

–  $P$ , (бар) - давление столба шахтной воды в онлайн режиме (бар), создаваемое водяным столбом в коллекторе 2 (см. рис. 2.6);

–  $P_{\max}$ ,  $P_{\min}$ , (бар) - максимальное и минимальное допустимое давление в коллекторе 2, определяемое диапазоном рабочих характеристик выбранного гидроциклона 3;

–  $V, (м^3)$  - объем наполняемого подземного резервуара 8, измеряемый в режиме реального времени;

–  $V_{\max}, (м^3)$  - максимальный объем наполняемого резервуара 8;

–  $k$  - коэффициент уставки, определяющий порог подключения или отключения дополнительных насосов в случаях подтопления или засухи;

–  $N$ , (шт.) - количество действующих в режиме реального времени насосных установок;

–  $s$  - шаг повышения или понижения коэффициента уставки в случае изменения числа действующих насосов.

Основываясь на перечисленных параметрах разработана логика работы программного обеспечения по управлению разработанной системой водоотлива (рис. 2.7).

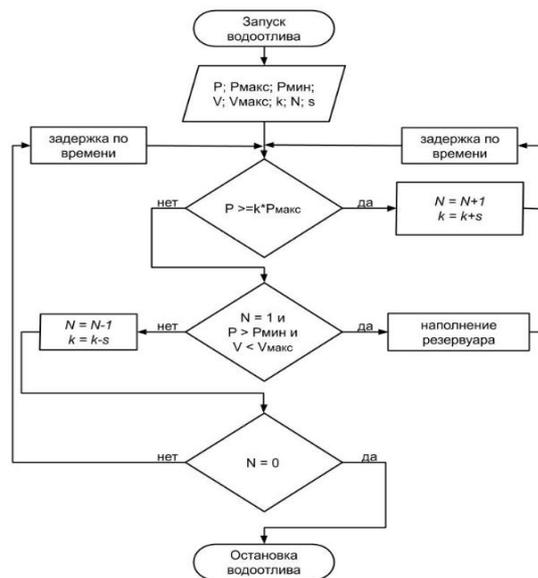


Рисунок 2.7 – Блок-схема работы энергоэффективной схемы шахтного водоотлива с функцией автоматического наполнения резервуаров пожаротушения

Таким образом, логика работы, представленная в блок-схеме на рисунке 2.7, заключается в последовательном выполнении трех этапов:

1. При получении входных опорных данных работа программы начинается со сравнения реального давления в коллекторе  $P$  с заданной изначально уставкой  $k * P_{\text{макс}}$ . В случае превышения первого или равенства сравниваемых параметров, программа подает сигнал на подключение дополнительного насосного агрегата  $N+1$  и на увеличение уставки срабатывания условия  $k+s$ . В цикле также предусмотрена функция «задержка по времени», необходимая для работы насосного агрегата, по окончании работы которой, цикл замыкается и переходит к сравнению «нового» давления в коллекторе  $P$  с измененной уставкой  $k$  на шаг увеличения  $s$ .

2. В случае невыполнения условия  $P \geq k * P_{\text{макс}}$ , т.е. когда давление в коллекторе  $P$  ниже заданной изначально уставкой  $k * P_{\text{макс}}$ , программа переходит к проверке второго условия, которое заключается в определении количества работающих насосов  $N$ , сравнении реального давления в коллекторе  $P$  с минимально допустимым для работы гидроциклона  $P_{\text{мин}}$  и выявлении уровня заполнения резервуара  $V$  в сравнении с его максимальной вместимостью  $V_{\text{макс}}$ . При условии, что в работе находится один насосный агрегат и выполняются условия неравенства по давлению и объему, программа переходит в режим пополнения резервуаров 8 (см. рис. 2.6) в энергоэффективном режиме, ввиду снижения требуемой высоты подъема жидкости, с задержкой на время, предусмотренное уставкой функции «задержка по времени».

3. После заполнения резервуара или истечения временной задержки, цикл повторяется. В том случае, если не выполнены вышеперечисленные условия, программа переходит к снижению количества одновременно работающих насосных агрегатов и изменению коэффициента уставки срабатывания первого условия  $k$  на шаг понижения  $s$ . Следующим шагом программа проверяет количество работающих насосов. В случае невыполнения указанных условий водоотлив останавливается и переходит к начальным условиям, определенным базовыми параметрами. Если число работающих насосов отлично от нуля, то цикл

возвращается к первоначальному условию через задержку по времени с уменьшенной уставкой срабатывания  $k$ .

В итоге, разработанная схема позволяет снизить требуемую мощность насосных агрегатов по следующим причинам: используется подпорное давление жидкости на входе в насос; снижается высота подъема за счет использования промежуточных водосборников как резервуаров для хранения шахтных вод; осуществляется механическая очистка шахтных вод, что дает возможность снизить запас гидроагрегата по фактору абразивного износа.

Также следует отметить, что применение водосборников в качестве пожарных резервуаров придает системе пожаротушения следующие достоинства: отсутствует необходимость возведения пожарных резервуаров большого объема на земной поверхности; снижается риск разрушения подземного пожарного резервуара по сравнению с его надземным исполнением; хранение воды осуществляется на разных уровнях, что позволит «разнести» резервуары 8 (см. рис. 2.6) по выработкам и тем самым повысить надежность системы пожаротушения.

Для определения параметров инновационных систем водоотлива была разработана методика проведения исследований.

#### **2.4. Методика проведения диссертационных исследований**

Опираясь на результаты, полученные в 2018 году в ходе проведения исследований микроГЭС, изготовленной для использования в подземном руднике, на базе наземных технических построек промышленного предприятия [98] была разработана методика, органично продолжающая последовательную серию натуральных испытаний гидроустановки в системе шахтного водоотлива. Методика проведения исследований условно разделена на два этапа: испытания разработанной установки в условиях подземного рудника и лабораторная апробация центробежного насосного агрегата в режиме реверса в имитационных условиях подземного рудника. Первый этап:

– выбор объекта исследований, анализ и обобщение его гидрогеологических условий, а также определение корреляционной зависимости объемов притока в

подземные выработки шахт «Центральная» и «Восточная» от динамики осадков региона через сопоставление времени работы насосных установок и данных метеослужбы за определенный промежуток времени;

- выявление природных и техногенных факторов, влияющих на объемы притока шахтных вод в подземные выработки Кочкарского месторождения;

- определение типа и структуры действующей системы водоотлива для оценки потенциала для систем рекуперации энергии шахтных гидротоков;

- проведение экспериментального и аналитического расчета расхода шахтной воды в системе перепуска подземного рудника с целью выявления места установки микроГЭС, а также для установления высоты водяного столба и объемов спускаемой жидкости, необходимые для теоретического прогнозирования мощности гидроустановки в идеальных условиях.

- разработка методики снятия электромеханических характеристик с узлов собранной гидроэлектрической установки с учетом изменения режимов ее работы в зависимости от нагрузочных характеристик;

- монтаж и запуск микроГЭС в условиях действующей классической схемы водоотлива в режимах, предусмотренных программой-методикой;

- снятие электротехнических характеристик и их сравнительный анализ с расчетными теоретически полученными данными для идеальных условий применительно Кочкарского месторождения.

Второй этап, связанный с лабораторными испытаниями центробежного насоса в режиме реверса:

- выбор насоса, способного развить давление водяного столба и объемный расход воды до значений, полученных в ходе испытаний микроГЭС в условиях подземного рудника;

- подбор насоса, работающего в режиме реверса, по гидротехническим параметрам, заданных условиями давления высоты водяного столба с расчетной характеристикой насоса в турбо режиме, определенной по переходным соотношениям табл. 1.3,

- разработка методики снятия электротехнических показателей, основанная на программе-методике для испытаний микроГЭС в условиях подземного рудника;
- монтаж и запуск насоса в режиме реверса в лабораторных условиях, эквивалентных с шахтными по давлению и расходу воды, в различных нагрузочных режимах, предусмотренных методикой;
- получение электротехнических характеристик и их сравнение с вычисленным ранее теоретическим прогнозом по генерации энергии в идеальных условиях и с результатами испытаний микроГЭС.

На фоне проведенных натурных испытаний микроГЭС и насоса в режиме реверса, где видоизменение схемы водоотлива осуществляется лишь в части перепускной системы скважин, применение схемы с активной очисткой и обратным водоснабжением влечет за собой полную модернизацию системы и влечет за собой большие трудозатраты, в связи с чем была разработана методика, позволяющая оценить потенциал данной схемы в лабораторных условиях:

- разработка 3D моделей классической и с активной очисткой (рис.2.5) схем водоотлива в программном комплексе SOLIDWORKS в масштабе 1:1000;
- вычисление характеристик потоковых процессов через симуляцию работы насосных установок с одинаковыми входными и выходными параметрами в условиях созданных 3D моделей на основе главных уравнений гидродинамики: неразрывности, сохранения импульса, сохранения энергии;
- создание лабораторного стенда, способного подтвердить полученные результаты в ходе выполнения потоковой симуляции и определяющего влияние подпорного давления в результате активной очистки воды в гидроциклоне на величину потребления насосом электрического тока;
- разработка программы-методики лабораторных испытаний, представляющей собой набор экспериментальных схем, позволяющих оценить зависимость величины электропотребления насосным агрегатом от изменения входных параметров в классической, с активной очисткой и с обратным водоснабжением схемах водоотлива.

– снятие гидравлических и электротехнических характеристик при работе лабораторного стенда в различных режимах с схемах, предусмотренных методикой, анализ полученных данных и сопоставление их с результатами компьютерного моделирования.

Разработанный методологический подход к установлению закономерностей инновационных схем водоотлива предназначен для выбора эффективного, надежного и безопасного способа осушения глубоких выработок рудных месторождений.

## **Выводы по главе 2**

1. Доказано, что при подходе к проектированию системы водоотлива с рекуперацией энергией оценка притоков воды в шахту должна быть основана на статистическом наблюдении и математическом подходе с выявлением степени влияния природных и техногенных факторов в различных гидрогеологических и горнотехнических условиях.

2. На основе анализа существующих типов конструкций гидротурбин, их технических характеристик и подземных условий глубоких рудников, которые предполагают большой перепад высот (до 900м), определено, что предпочтительной для подземного рудника является деривационная структура ГЭС с применением лопастного типа гидротурбины.

3. На основе проведенного анализа недостатков существующих схем водоотлива разработана концептуальная технология применения энергии гидротоков для автоматизированной активной очистки дренирующих вод с созданием подпорного давления для повышения КПД насосных установок.

4. Доказано, что существуют перспективы повышения эффективности работы системы водоотлива с сообщающимися сосудами путем применения используемых ранее водосборников в качестве подземного резервуара для технологической воды.

5. Разработана методика исследования инновационных технологических решений по снижению затрат на эксплуатацию системы водоотлива, позволяющая установить закономерности, влияющие на подход к рекуперации энергии гидротоков.

### **3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЙ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ ГИДРОПОТОКОВ**

#### **3.1. Специфика гидротехнических и гидрогеологических условий исследований подземных технологий рекуперации энергии**

Анализ мирового опыта производства и рекуперации электрической энергии показал, что используются два способа: преобразование энергии гидропотоков в электрическую при помощи механических устройств и способ снижения электропотребления насосных установок путем создания подпорного водяного столба через изменение системы перепуска в подземных условиях. Однако, так или иначе, все рассмотренные способы применимы только к искусственно созданным условиям перепуска, например, система охлаждения глубоких выработок, принудительный спуск воды в подземное пространство в гидроаккумулирующей электростанции и др., где для перемещения из резервуаров подготовленной воды применяются разного вида инженерные сооружения, предназначенные для транспортировки жидких веществ. Совершенно иные условия присущи естественной горнотехнической системе, где изменчивыми источниками шахтных вод могут быть как природные, так и техногенные факторы.

Для определения параметров разработанных инновационных схем необходим объект исследований, расположенный в районе с развитой гидросетью. К числу таких объектов на территории Южного Урала относится Кочкарское месторождение, представленное Пластовским массивом (рис.3.1). Массив является водоносным, а повышенная обильность притоков наблюдается в местах развития золоторудных и арсенопиритовых жил с повышенной трещиноватостью и кавернозностью (за счёт выщелоченных сульфидов), являющихся основными путями циркуляции подземных вод. Кроме того, на исследуемой территории имеются относительно водоупорный верхнемиоценово-среднеплиоценовый и водоносный четвертичный аллювиальный, озёрно-аллювиальный горизонты.

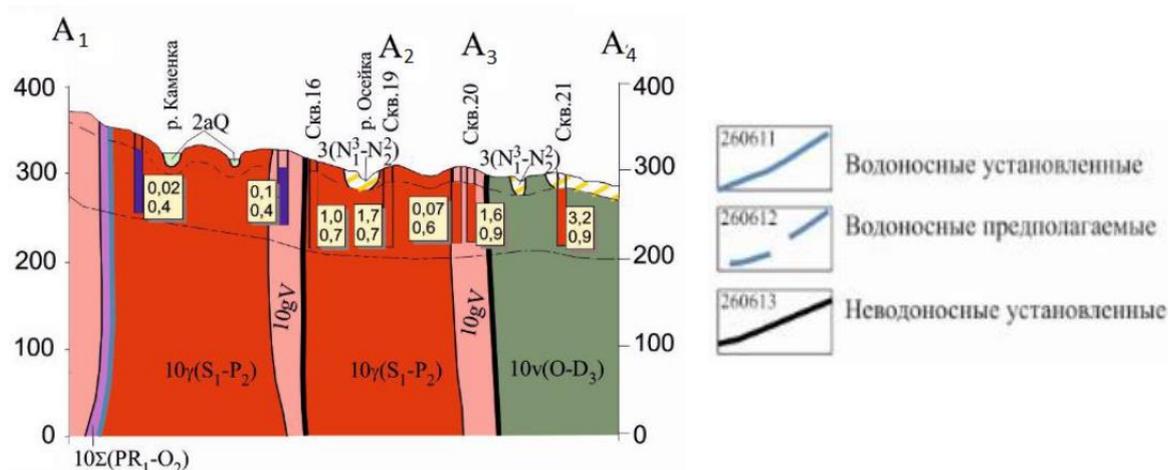


Рисунок 3.1 – Фрагмент гидрогеологической карты Пластовского района

Относительно водоупорный верхнемиоценово–среднеплиоценовый горизонт предоставлен бурыми, охристо-бурыми глинами с прослоями и линзами разнозернистых бурых песков и галечников в верхней части разреза. Мощность не превышает 8–10 м. Водоносными являются линзы и прослойки песка и галечника мощностью до 20–30 см с суммарной мощностью до 2,5–3,0 м. Водопроницаемость пород незначительная. Расход редких родников 1,03–0,1 л/с, дебит колодцев – до 0,27 л/с, при понижении до 0,49 м, коэффициент фильтрации – 1,25 м/сут.

Водоносный четвертичный аллювиальный, озерно-аллювиальный горизонт представлен преимущественно песчано-гравийным материалом с прослойками глин и суглинков. Мощность отложений не превышает 8 м, глубина залегания водного зеркала от 0,5 до 2–4 м. Водопроницаемость пород слабая. Расход родников

0,01 – 0,3 л/с, дебит колодцев 0,05 – 0,6 л/с, скважин 0,08 – 0,6 л/с. Коэффициент фильтрации глин – 0,2 м/сут., суглинков – 0,5 м/сут., супесей – 2,8 м/сут.

Кочкарское месторождение обрабатывается двумя действующими шахтами «Центральная» и «Восточная» АО «Южуралзолото Группа Компаний» («ЮГК»), расположенными в черте города Пласт, в 2х км от него в восточном направлении, соответственно (рис. 3.2).

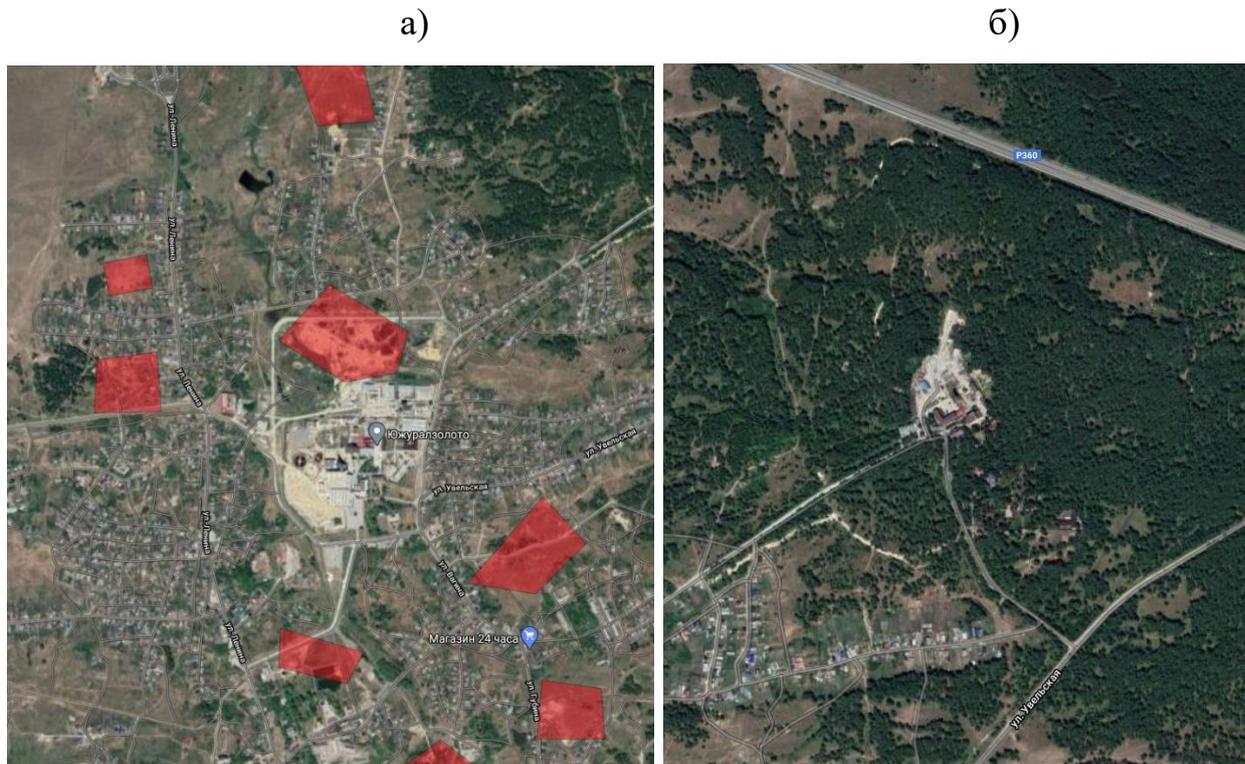


Рисунок 3.2 – Спутниковый снимок шахт а) «Центральная» и б) «Восточная»; красные зоны – пастбища, вызванными старогодними отходами горного производства

Из анализа гидрогеологической карты Пластовского района (см.рис.3.1) установлено, что шахта «Восточная» находится в пограничной зоне расположения верхних, маломощных относительно водоупорного верхнемиоценово-среднеплиоценового и водоносного четвертичного аллювиального, озёрно-аллювиального горизонтов. В свою очередь, шахта «Центральная» расположена большей своей частью в пределах водоносной нижнесилурийска-верхнепермской зоны экзогенной трещиноватости, характерной для Пластовского массива. Такое географическое расположение шахт напрямую влияет на их обводнённость, так как верхнемиоценово-среднеплиоценовый и озёрно-аллювиальный горизонты представлены глинистыми породами, которые являются водоупором для

атмосферных осадков. Выход на поверхность трещиноватого и кавернозного Пластовского массива в области расположения шахты «Центральная» обеспечивает прямую гидравлическую связь подземных выработок с выпадающими атмосферными осадками. Такую закономерность подтвердили и проведенные на местности исследования, где установлено, что приток в шахту «Восточная» равномерен и составляет  $45\text{ м}^3/\text{ч}$ , а приток в шахту «Центральная» в среднем значении равен  $90\text{ м}^3/\text{ч}$  и имеет колебания относительно динамики влияния атмосферных осадков [90,63,94]. На рисунке 3.3 представлены результаты замеров времени работы насосных установок в условиях «Центральной» шахты за 2018 год.

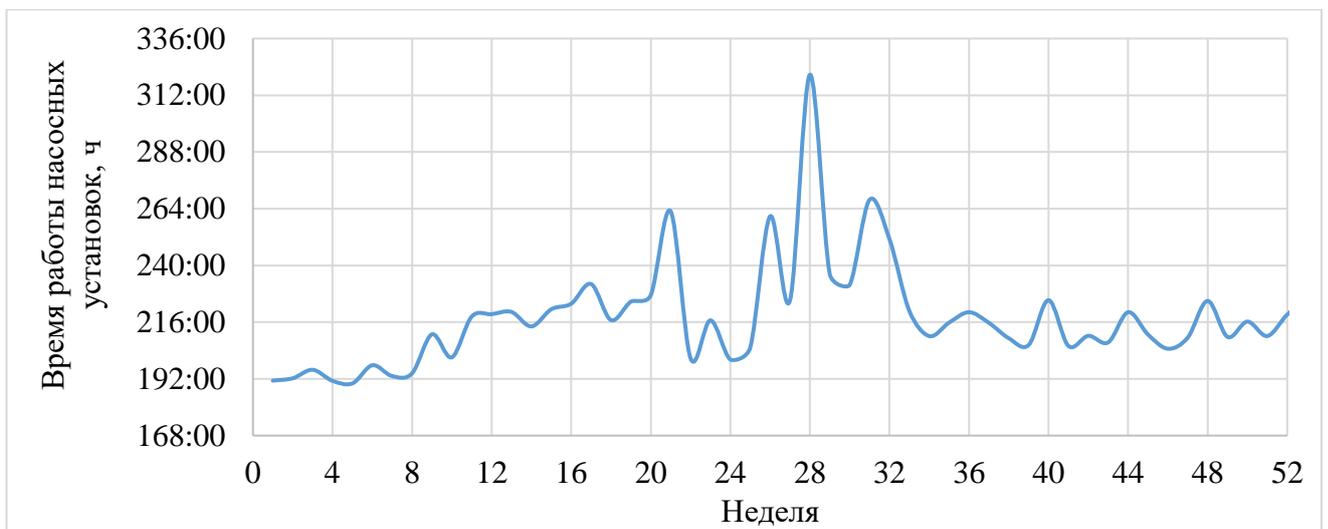


Рисунок 3.3 – Динамика времени работы насосных установок на шахте «Центральная» в зависимости от времени года

Из полученного графика видно, что наибольшее время работы насосных установок требуется в теплое время года и, наоборот, в зимнее время график работы насосных установок более пологий и стабилен на уровне ниже среднего. Также, из анализа времени работы насосов установлено, что минимальное значение времени работы, равное 192 часа в неделю, не зависит от времени года [96]. Это говорит о достаточно стабильной части водопритока в шахту по массиву водоносной нижнесилурийска-верхнепермской зоны экзогенной трещиноватости.

Для подтверждения влияния осадков на время работы насосных установок, в центре метеонаблюдений по Челябинской области в г. Пласт были собраны материалы по распределению осадков в течение рассматриваемого периода (рис.3.4)

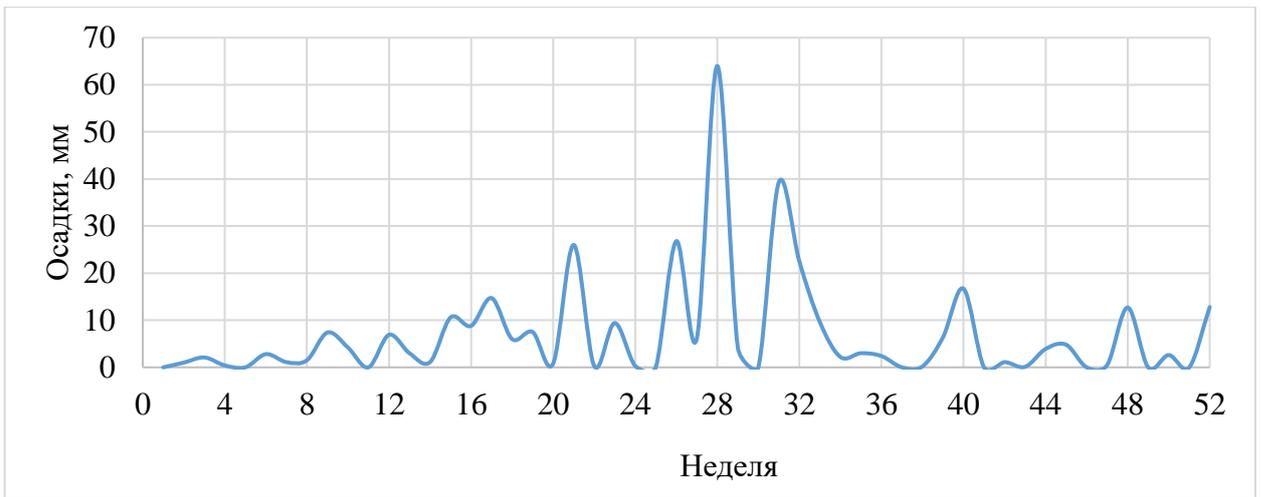


Рисунок 3.4 – Динамика осадков в зависимости от времени года в г. Пласт за 2018 год

Из графика на рисунке 3.4 видно, что выпавшие осадки достаточно сильно коррелируют с временем работы насосных установок. Такая тесная корреляция объясняется, в первую очередь, отсутствием водоупорных горизонтов.

Другой причиной такой зависимости является зона плотной городской застройки, которая возведением подземных коммуникаций, водозаборных колодцев, скважинных фундаментов и слабо развитой ливневой системой нарушает поверхностный почвенный слой и увеличивает проницаемость верхних слоев. Помимо городской застройки, на территории «Центральной» шахты имеются значительные площади с хранением старогодних отходов, вызванных длительной эксплуатацией месторождения (см. рис.3.2, а). Такие отходы горного производства золото-мышьяковистых руд Кочкарского месторождения имеют высокие фильтрационные свойства, что способствует ускоренному проникновению атмосферных вод в подземные выработки [113]. Иная картина наблюдается вокруг расположения шахты «Восточная», где отсутствует техногенная нарушенность верхнего почвенного слоя и наблюдается густая залесованность (см.рис.3.2, б).

При этом техногенные факторы в условиях шахт практически отсутствуют, так как технологическая вода используется только для промывки шпуров в процессе бурения, а старогодние хвосты обогащения, расположенные в зоне влияния депрессионной воронки, являются осушенными.

Основываясь на полученной зависимости времени работы насосных установок, на рисунке 3.5 по формуле 1.1 спрогнозирована максимальная мощность ГЭС малой мощности в условиях шахты «Центральная» с учетом и без учета осадков.

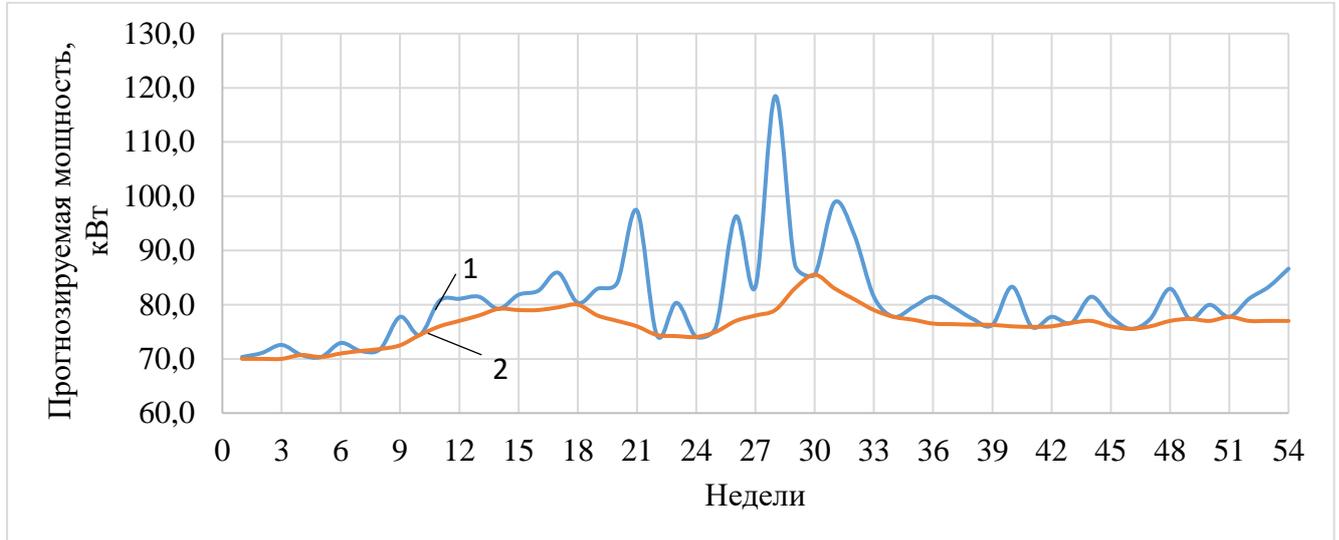


Рисунок 3.5 – Максимальная прогнозируемая мощность ГЭС малой мощности в условиях шахты «Центральная»: 1 – с учетом влияния атмосферных осадков; 2 – без влияния осадков

Из анализа рисунка 3.5 установлено, что средняя прогнозируемая мощность ГЭС малой мощности с учетом осадков составляет 80,7кВт, когда без учета осадков – 76,4кВт. Диапазон прогнозируемой мощности лежит в диапазоне до 100кВт, значит в условиях «Центральной» шахты по мощностной классификации применима только микрогидроэлектростанция (микроГЭС)

Полученный результат говорит о том, что оценка энергетического потенциала рудничного водоотлива с эффективным использованием энергии гидротоков посредством установки ГЭС малой мощности должна проводиться с учетом влияния климатических и гидрогеологических условий, а также глубины ведения горных работ, объема технологической воды, используемой в основных и вспомогательных геотехнологических процессах.

Таким образом, на основе анализа гидрогеологических условий шахт Кочкарского месторождения, установлено, что шахта «Центральная» имеет в 2 раз больше приток воды в подземные выработки, по сравнению с шахтой «Восточная». На этом фоне обладаемый ею водный баланс более привлекателен для внедрения схемы водоотлива с рекуперацией энергии гидротоков, а оцененные

гидрогеологические параметры подходят под внедрение всех предлагаемых инновационных схем водоотлива, так как в подземных условиях присутствуют высокие перепуски, прогнозируемый объем водного притока, условно чистая шахтная вода, которая особо положительно скажется на долговечности схемы на базе микроГЭС [103].

### **3.2. Экспериментальное определение влияния конструктивных параметров системы водоотлива на показатели эксплуатации в условиях подземного рудника**

Для определения приоритетного расположения микрогидроэлектростанции (микроГЭС) в условиях эксплуатируемой системы водоотлива шахты «Центральная» был проведен анализ системы перепускных скважин на подземном руднике. Горизонтом водосбора шахты является гор. 700м с притоком  $90\text{м}^3/\text{ч}$  при высоте перепуска 50м и 100м. Весь объем шахтной воды на гор. 700м поступает по системе перепускных межэтажных скважин (см.рис.1.23), что в конечном итоге определило его как место испытаний гидротурбинной установки.

Так, на выбранном горизонте присутствуют четыре перепускные скважины №1, №2, №3 (рис.3.6) и пробуренная с вышележащего горизонта непосредственно в пространство водосборника 5 скважина №4, не имеющая приемного трубопровода и физического доступа к ней. Отличительной особенностью скважин №1-3 является то, что поток шахтной воды протекает сквозь однотипные вертикальные скважины с гор.650 (участок 1), а затем происходит изменение направления потока при переходе в приемных трубопроводах (участок 2). Длина каждого горизонтального участка приемного трубопровода скважин №1-3 (рис.3.4, а – 1 и 3, рис.3.4, б – 2) составляет 130м, 95м, 85м соответственно [106].

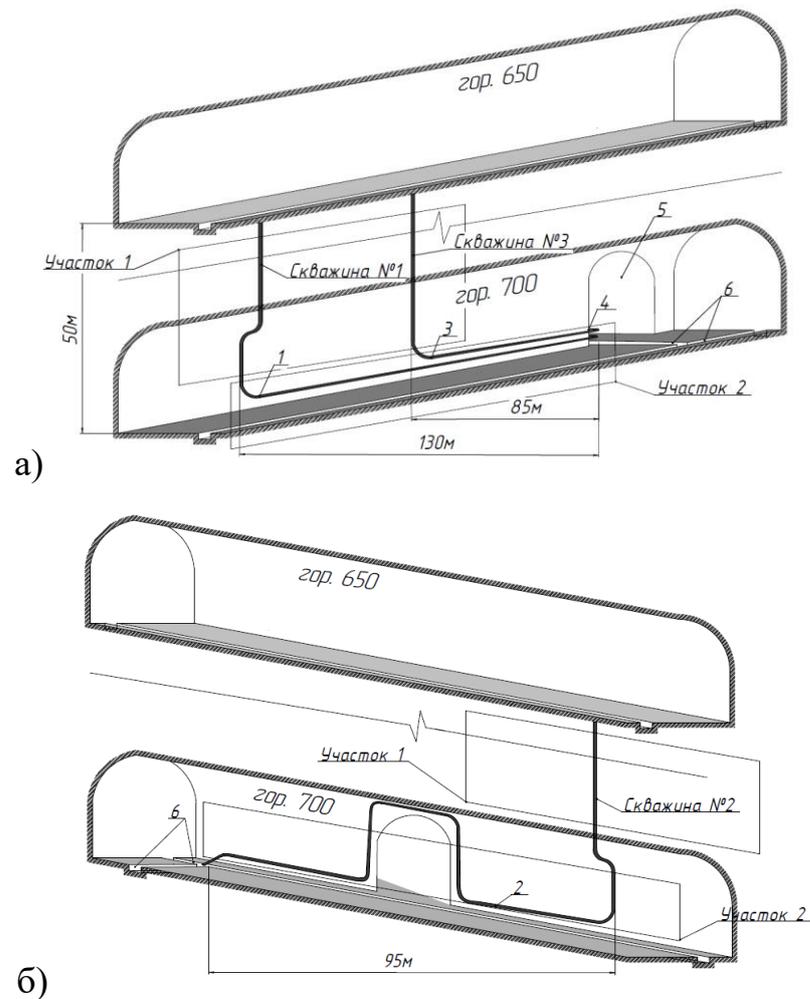


Рисунок 3.6 – Схема расположение приемных трубопроводов и перепускных скважин с гор. 650 на гор. 700: а) левый борт выработок; б) правый борт выработок; 1-3 приемные трубопроводы скважин №1-3; 4 – выбранное место установки гидротурбины; 5 – начало водосборника; 6 – водоотливные каналы

Для определения расхода шахтной воды, проходящей через поперечное сечение каждого перепускного инженерного сооружения 1-3 (рис.3.6) за единицу времени, использовался прибор – расходомер. Выбору типа расходомера предшествовал анализ существующих типов приборов. С учетом особенностей конструкции системы перепускных скважин были рассмотрены следующие типы расходомеров: механические; переменного перепада давления; оптические (лазерные); электромагнитные; ультразвуковые.

Для условий эксперимента большинство рассмотренных моделей расходомеров различных типов было исключено по ряду причин: несоответствие диаметра трубопровода с диаметром входного отверстия прибора; турбулентный

режим течения жидкости; неполное заполнение поперечного сечения трубопровода шахтной водой; налет на стенках трубопровода; высокое давление водяного столба.

В сложившейся ситуации было принято решение об использовании емкости установленного объема для заполнения ее жидкостью в расчетный период времени. По данному принципу определение расхода жидкости проводилось с использованием емкости, объемом  $90\text{дм}^3$  с замером времени ее полного заполнения шахтной водой. Для чистоты эксперимента количество измерений для каждой из скважин принято не менее трех.

Так как скважина №4 впадает непосредственно в водосборник гор.700м и доступ к ее устью физически затруднен, поэтому расчет расхода воды велся применительно к условиям гор. 650м с подсчетом расхода воды в водоотливной канаве по формуле:

$$Q = Fv, \text{м}^3/\text{с}; \quad (3.1)$$

где:  $F$  – площадь сечения воды в канаве,  $\text{м}^2$ ;  $v$  – скорость течения воды, определяемая путем наблюдения,  $\text{м}/\text{с}$ . Таким образом, дебит скважины №4 оказался равным  $0,0252 \text{ м}^3/\text{с}$ . Результаты измерений представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты измерения фактического расхода шахтной воды в экспериментальных скважинах

Наименование скважины	Номер замера	Время заполнения емкости, с	Среднее время заполнения, с	Полученный фактический расход шахтной воды, $\text{дм}^3/\text{с}$
Скважина №1	1	3,9	4,0	22,3
	2	4,0		
	3	4,2		
Скважина №2	1	15,2	14,9	6,0
	2	14,6		
	3	14,8		
Скважина №3	1	3,8	3,9	23,0
	2	4,1		
	3	3,7		
Скважина №4	-	-	-	25,2

По итогам анализа результатов замера расхода жидкости установлено, что наиболее водоносными из доступных являются переточные скважины №3 и №1. Объём шахтной воды, протекающей через поперечное сечение переточной скважины №2, значительно ниже.

Исходя из полученных результатов измерений расхода шахтной воды, был рассчитан теоретический потенциал получения электрической энергии посредством микроГЭС в условиях гор. 700м шахты «Центральная». Для скважин №1-4 он составил 10,8; 2,9; 11,2; 11,2 кВт\*ч, соответственно. Так как замеры расхода проходили в период с 17 по 19 сентября 2018 года, была спрогнозирована динамика изменения генерируемой мощности в зависимости от динамики притока в шахту (рис. 3.3) с использованием данных графика на рисунке 3.5.

Видно, что максимальные значения генерируемой электроэнергии достигают в летнее время, где скважин №1-4 составляют 12,92; 3,48; 13,3; 14,5кВт\*ч, соответственно. Наибольший интерес, с точки зрения возможности генерации электроэнергии, видится в объединение рассматриваемых скважин для создания единого водопотока. Таким образом, генерируемая мощность одной установкой возрастет до 44,21 кВт\*ч.

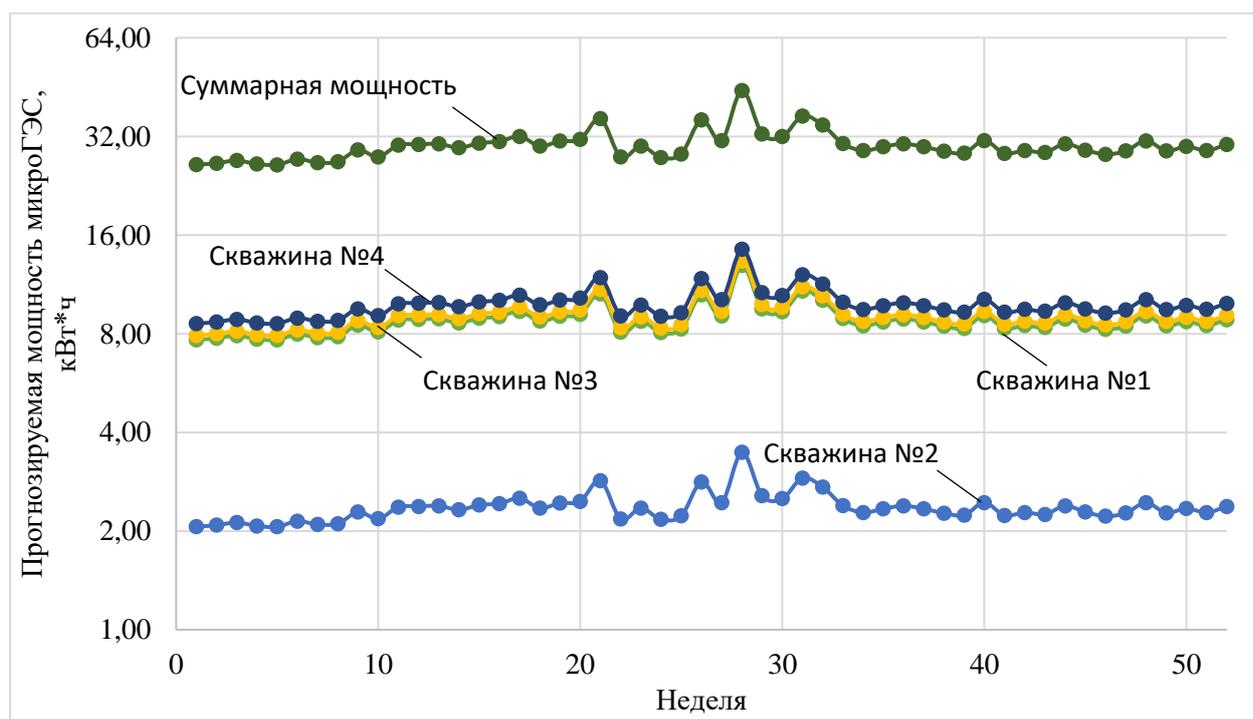


Рисунок 3.7 – Прогнозируемая мощность микроГЭС в условиях гор. 700 с наложением технических характеристик гидротурбины на данные по изменению притоков в подземные выработки

Как говорилось ранее, для натуральных испытаний микроГЭС в шахтных условиях был выбран гор. 700м, где в связи с эксплуатационными особенностями существующей системы перепуска, а именно, связанных с невозможностью приостановки работы переточных скважин по причине вероятного затопления

выработок, было принято решение обустроить экспериментальную установку на выходе шахтной воды из приемного трубопровода 4 (см. рис. 3.6, а) в выработке для обслуживания водосборников 5.

В качестве экспериментальной установки выступал спроектированный стенд, включающий в себя гидротурбинную установку 1 (рис. 3.8), электрогенератор 2, щит активной нагрузки 3, состоящий из вольтметров 4 и ламп накаливания 5. Для измерения частоты вращения вала рабочего колеса турбины при различных режимах работы установки, использовался измерительный прибор – тахометр.

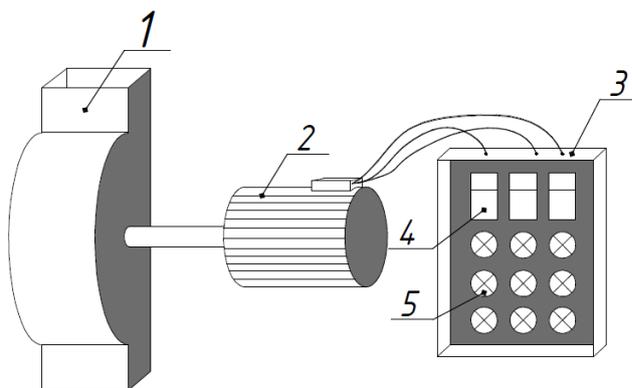


Рисунок 3.8 – Структурная схема экспериментальной установки: 1 – гидротурбина, 2 – электрогенератор, 3 – щит активной нагрузки и контроля электрических параметров, 4 – прибор для пофазного измерения напряжения (вольтметр), 5 – активная нагрузка (лампы накаливания)

Измерение электрических характеристик производилось в три этапа [60]:

- запуск установки без момента сопротивления на валу генератора (холостой ход), установка базовых показаний приборов;
- последовательное включение в цепь электрогенератора активной нагрузки до падения напряжения, запись показаний;
- уменьшение нагрузки на валу генератора до момента устойчивой работы (на этой стадии вращающий момент ведомого колеса гидротурбины равен моменту сопротивления генератора), регистрация данных с приборов.

Общий вид испытуемой установки показан на рисунке 3.9. Установка представляет собой активную лопастную гидротурбину в закрытом исполнении с плоскими лопатками на рабочем колесе.

а)



б)



Рисунок 3.9 – Гидротурбинная установка в разборе: а – кожух и рабочее колесо; б – рабочее колесо в общем виде

Исходя из выбранного для эксперимента места установки испытуемого оборудования, было определено фактическое местоположение работ по монтажу в сеть переточных трубопроводов гидротурбинной установки и режим выполнения пусконаладочных опытных работ. Общий вид места установки испытательного оборудования, показанного на рисунке 3.6 (поз.4), изображен на рисунке 3.10.

а)



б)



Рисунок 3.10 – Места установки испытательного оборудования, а – приемная труба скважины №2, б – приемные трубы скважин №1 (нижняя) и №3 (верхняя)

Проведение измерительных работ было решено начать с приемного трубопровода скважины №2, так как расположение быстроразъемного соединения позволило за кратчайшие сроки внедрить экспериментальную конструкцию в сеть переточных трубопроводов. Запуск установки в экспериментальном режиме производился без генератора. Таким образом было исключено влияние внешнего момента сопротивления (рис. 3.11).



Рисунок 3.11 – Смонтированная в шахтных условиях на трубопровод скважины №2 гидротурбина, установленная в горизонтальном положении

Сразу после полного открытия забора трубопровода, поток шахтной воды привел в действие рабочее колесо гидроустановки. По причине низкого напора жидкости вал гидротурбины вращался медленно и не имел должного усилия. Вращающий момент под действием потока воды был низок, его хватило лишь на преодоление собственного сопротивления, вызванного качением движущихся частей подшипников.

Принимая во внимание нюансы и недостатки первого эксперимента, а также результаты замеров расхода шахтной воды, а именно наличие практически идентичного напора в скважине №1 и №3, было принято решение проводить следующий этап испытаний на трубопроводе скважины №3, ввиду большей доступности для подключения микроГЭС (рис. 3.12, а). Монтрование гидротурбинной установки производилось через быстросъемное соединение для избежания риска подтопления выработок (рис.3.12, б).

а)



б)



Рисунок 3.12 – Смонтированная на трубопровод скважины №3 гидротурбинная установка: а – приемный трубопровод скважины №3; б – установленная микроГЭС на приемный трубопровод №3

Электротехнические характеристики используемого генератора приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Электротехнические характеристики генератора

Характеристика	Значение
Номинальная мощность, Вт	1000
Напряжение, В	48
Номинальная скорость (об / мин)	380
Пусковой момент (Н / м)	1.5
Магниты тип	NdFeB, N35SH
Число пар полюсов	4
Вес (кг)	18
Общая длина, мм	315
Диаметр, мм	180
Диаметр вала, мм	30
Рабочая температура	-40 +60 °С

Нагрузочно-измерительную часть электрической схемы при проведении испытания выполнял экспериментальный стенд, состоящий из трех трансформаторов напряжения, установленных пофазно и соединенных в звезду (Y). В качестве нагрузки использовались лампы накаливания с номинальной мощностью 40Вт (12шт.), соединенные последовательно через измерительные приборы (амперметры), параллельно с вольтметрами (мультиметрами) (рис.3.13).



Рисунок 3.13 – Нагрузочно-измерительный стенд экспериментальной установки

Измерения электротехнических характеристик генератора производилось, согласно разработанной и представленной выше методики. Результаты измерений приведены в таблице 3.3, в сравнении с проведенными ранее наземными лабораторными испытаниями экспериментальной установки [98,66].

Таблица 3.3 – Результаты измерений электротехнических характеристик генератора при работе на потоке шахтной воды в скважине №3 в сравнении с лабораторными условиями

Режим запуска	Величина нагрузки (количество ламп), шт		Напряжение, В		Количество оборотов, об/мин	
	В лабораторных условиях	В условиях подземного рудника	В лабораторных условиях	В условиях подземного рудника	В лабораторных условиях	В условиях подземного рудника
Запуск без момента сопротивления на валу генератора (холостой ход)	0	0	48	17	380	130
Максимальная подъемная нагрузка на валу рабочего колеса	9	4	15	12	120	92
Устойчивая работа без просадок по напряжению	8	3	19	15	132	104

Результаты натуральных испытаний показали стабильную работу установки без просадки по напряжению с загрузкой в 3 лампы накаливания, в то время как лабораторные – в 8 ламп. Это объясняется особенностью строения действующей системы перепуска шахтных вод. В начале пути потоки шахтных вод протекают по вертикальным скважинам, высотой 50м, после чего происходит изменение траектории потока, протяженностью до 130м, который принимает слабонаклонное направление. В результате движения по слабонаклонным участкам трубопровода, поток теряет первоначально накопленную потенциальную энергию на преодоление сил трения. Это негативно сказывается на показателях работы микроГЭС в подземных условиях. Испытания также выявили конструктивные недостатки гидроустановки, в которой рабочее колесо приводится в движение от взаимодействия потока жидкости и крыльчатки, что оказалось недостаточно эффективным, ввиду отсутствия засечек, кроме того, закрытый кожух гидротурбины при мощном потоке привел к затоплению рабочего колеса [67].

Таким образом, с учетом выявленных в ходе эксперимента недостатков установлено, что реальная мощность микроГЭС в условиях подземного рудника с

классической схемой водоотлива ниже прогнозируемых показателей на 33%, о чем свидетельствует график на рисунке.3.14, где представлена мощностная характеристика микроГЭС, полученная по результатам испытаний и расчетным путем по аналогии с прогнозируемой мощностью (см.рис.3.7).

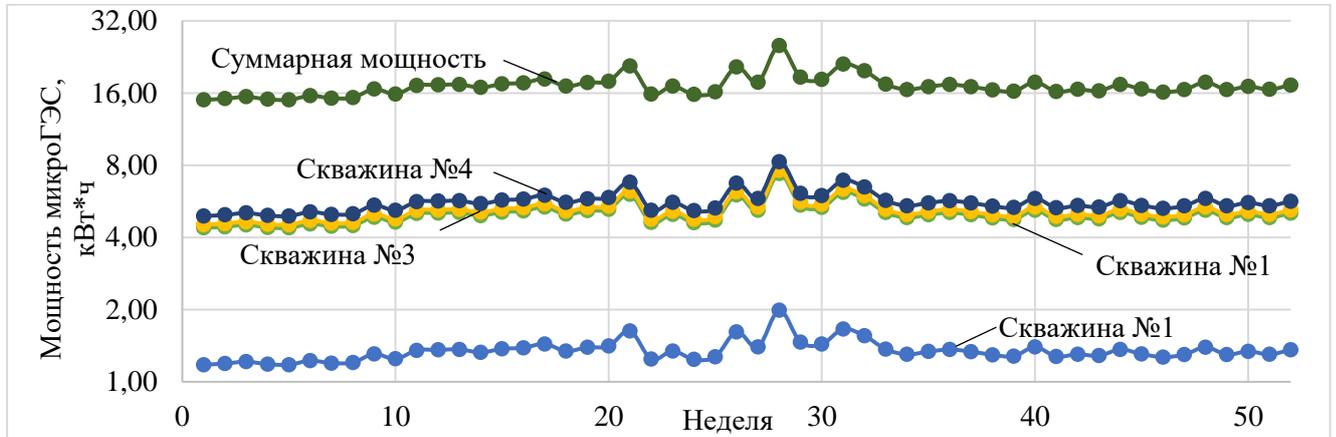


Рисунок 3.14 – Прогнозируемая мощность микроГЭС в условиях гор. 700 по результатам проведенных испытаний в зависимости от выявленного ранее изменения притока в шахту

Как отмечалось ранее, на практике широко применяют в качестве гидротурбины центробежный насос, работающий в режиме реверса, в связи с чем было принято решение применить в качестве опытного объекта исследований схожий по принципу работы с проектируемой гидротурбиной установкой центробежный насос консольного типа марки К45-50-160 (рис. 3.15, а) (насос-приемник). В качестве источника напора водной струи, имитирующей шахтные потоки, был использован более производительный насос марки К65-50-165 с ведущим электродвигателем (насос-источник) (рис. 3.15, б).



Рисунок 3.15 – Общий вид используемых центробежных насосов консольного типа: а – насос-приемник марки К45-50-160; б – насос-источник марки К65-50-165 с электродвигателем

Разработанная установка скомпонована по следующим принципам:

– создание водного напора обеспечивает насос-источник 3 (рис. 3.15), который подключен к насосу-приемнику 1 через трубопровод 2 переменного сечения, изменяющегося от 65мм в начале и до 45мм в конце для повышения гидравлического давления;

– соосно с насосом-приемником смонтирован используемый ранее в шахтных условиях электрогенератор, характеристики которого указаны в табл.3.2;

– выводы электрогенератора подключены к щиту активной нагрузки, также используемого ранее в проведенном эксперименте (рис.3.15);

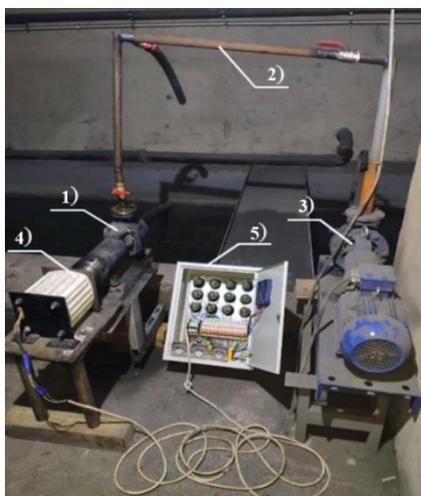


Рисунок 3.15 – Испытуемая в лабораторных условиях установка: 1 – насос-приемник, используемый в качестве гидротурбины; 2 – соединяющий трубопровод переменного сечения; 3 – насос-источник, используемый для имитации шахтных потоков; 4 – электрогенератор на неодимовых магнитах; 5 – щит активной нагрузки с приборами для измерения электрических характеристик.

Испытания иного типа гидроустановки проводились в лабораторных условиях производственно-технического цеха, где от действующей системы водоснабжения предприятия была осуществлена подпитка насоса-источника. В ходе эксперимента снимались следующие электротехнические показатели:

– частота вращения вала электрогенератора измерялось тахометром механического исполнения;

– напряжение в цепи снималась вольтметром переменного напряжения на базе мультиметров в составе щита нагрузки;

– электрическая нагрузка на выводах генератора, используемого ранее в шахтных испытаниях, определялась количеством одновременно включенных в электрическую цепь ламп накаливания с минимальной потребляемой номинальной мощностью 40Вт.

Методика проведения эксперимента основывалась на ранее разработанной и приемлемой в условиях подземного рудника схеме. Полученные в ходе эксперимента результаты приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты измерений электротехнических характеристик генератора

Режим запуска	Количество ламп, шт	Напряжение, В	Частота вращения вала, об/мин
Запуск без момента сопротивления на валу генератора (холостой ход)	0	100	1100
Максимальная подъемная нагрузка на валу рабочего колеса	2	9	43
Устойчивая работа без просадок по напряжению	1	13	74

Неоднозначные результаты эксперимента, с учетом результатов в ранее проведенных лабораторных и подземных испытаний, объясняются, в первую очередь, сложностью подбора насоса для работы в «обратном направлении». Эксперимент наглядно показал, что в режиме холостого хода генератор раскручивается выше своих номинальных оборотов. Но при включении в цепь нагрузки в виде ламп накаливания, обороты резко падают и, следовательно, напряжение проседает. Такое резкое снижение оборотов объясняется особенностью конструкции центробежного насоса, а именно, формой крыльчатки рабочего колеса, которая не в полной мере преобразует энергию потока по центробежной силе. В конечном итоге, при подключении нагрузки на генератор, рабочее колесо насоса останавливается, а вода сквозь технологические зазоры и крыльчатку по касательной траектории поступает к водоотводной части насоса.

По аналогии с экспериментом с гидротурбиной, была рассчитана прогнозируемая мощность, которую сможет развить микроГЭС с насосом в режиме реверса как рабочее колесо в условиях подземного рудника (рис. 3.17).

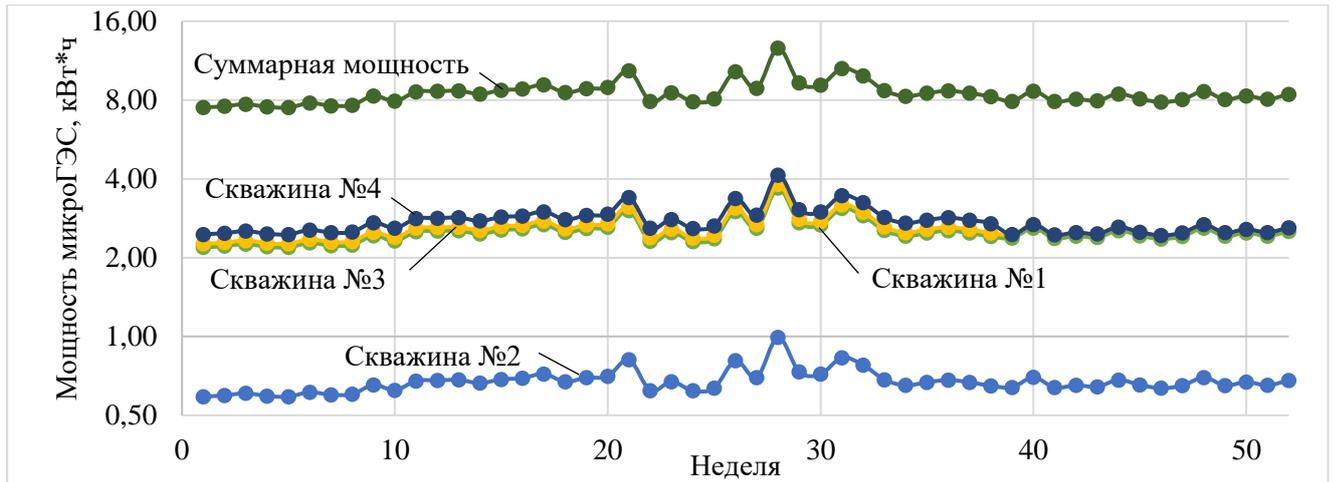


Рисунок 3.17 – Прогнозируемая мощность микроГЭС на базе центробежного насоса в режиме реверса по результатам, полученных в ходе испытаний в зависимости от выявленного ранее изменения притока в шахту

Анализируя графики рис.3.7, 3.14, 3.17, установлено, что теоретически прогнозируемая мощность микроГЭС, представленная на рисунке 3.6, выше мощности, определенной по результатам проведенных испытаний гидротурбинной установки и насоса в режиме реверса (рис.3.13, 3.16) на 33% и более, что свидетельствует о несовершенстве схемы перепуска при действующей на руднике системы водоотлива. В идеальных условиях, при соответствии сечения потока диаметру скважины, по которой он перепускается, применимо следующее уравнение неразрывности потока жидкости [69]:

$$Q_1 = Q_2 = Q_n = const, \text{ м}^3/\text{ч}; \quad (3.2)$$

где:  $Q_1$  – расход жидкости в скважине в точке  $(x, y, z)$ ,  $\text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $Q_2$  – в точке  $(x, y, z+h)$ ,  $\text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $Q_n$  – в точке  $(x, y, z+nh)$ ,  $\text{ м}^3/\text{ч}$ .

В шахтной системе водоотлива даже визуально наблюдается расхождение сечения потока в меньшую сторону от сечения скважины, что провоцирует образование пустот, пропусков в потоке жидкости и является причиной нарушения уравнения неразрывности 3.2.

Из-за нарушения уравнения неразрывности потока, генерация энергии имеет прерывистый характер, а гидроустановка испытывает гидравлические удары. Подобное поведение жидкости в трубопроводе свидетельствует о неравномерном поступлении шахтной воды в устье скважины. Для обеспечения непрерывности потока необходимо создание искусственного водосборника перед началом

свободного падения потока в скважину и регулирование уровня жидкости в полости перепускной скважины частичным перекрытием сопел гидротурбины [61,62]. При этом, еще одной задачей такого регулировочного водосборника является предотвращение попадания взвешенных частиц потока в рабочую область гидротурбинной установки. Поэтому объем проточной части водосборника должен учитывать скорость осаждения взвешенных частиц под действием силы тяжести в зависимости от значения критерия Рейнольдса [43]:

– в области применимости закона Стокса ( $Re < 1$ )

$$\omega_0 = \frac{1}{18} d^2 \frac{\rho_1 - \rho_2}{\mu} g, \text{ (м/с)} \quad (3.3)$$

– в переходной области ( $1 < Re < 10^3$ )

$$\omega_0 = 0.151 \frac{g^{0.42} d^{1.14}}{\mu^{0.43} \rho_2^{0.29}} (\rho_1 - \rho_2)^{0.72}, \text{ (м/с)} \quad (3.4)$$

– в области применимости закона Ньютона ( $10^3 < Re < 10^5$ ), (м/с)

$$\omega_0 = 1,74 \sqrt{d \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2} g} \quad (3.5)$$

где:  $d$  - диаметр частицы, м;  $\rho_1$  - плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_2$  - плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  - вязкость среды, н·с/м<sup>2</sup>;  $g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Как описывалось ранее, компенсация затрат электрической энергии в системе водоотлива возможна двумя методами: непосредственным и опосредствованным. При непосредственном методе используется гидротурбинная установка, а при опосредствованном методе требуется качественное изменение схемы шахтного водоотлива.

### 3.3. Компьютерное моделирование и экспериментальное определение параметров разработанной схемы водоотлива

Основываясь на принципах функционирования разработанной и описанной ранее схемы водоотлива (см. рис. 2.5), был выделен ряд вопросов, ответ на которые возможно получить только путем математического моделирования процессов и проведения лабораторных испытаний. Для этого была создана компьютерная модель в среде SolidWorks Flow Simulation. Моделирование движения потоков несжимаемой жидкости лежит в основе решения уравнения Навье-Стокса:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = - (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u} + \vec{F} \quad (3.3)$$

где:  $\frac{\partial \vec{u}}{\partial t}$  – скорость изменения скорости жидкости в точке;  $(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u}$  – перемещение жидкости в пространстве;  $\frac{1}{\rho} \nabla p$  – давление, оказываемое на частицу ( $\rho$  – коэффициент плотности жидкости);  $\nu \nabla^2 \vec{u}$  – вязкость среды ( $\nu$  — коэффициент вязкости);  $\vec{F}$  – внешние силы, действующие на жидкость.

Для установления преимуществ разработанной схемы относительно существующих способов откачки шахтной воды с глубоких горизонтов, математическое моделирование и лабораторные испытания проходили в два этапа с определением и сравнением параметров классической и инновационной схем водоотлива. Модель, основанная на классических принципах работы системы водоотлива представлена на рисунке. 3.18.

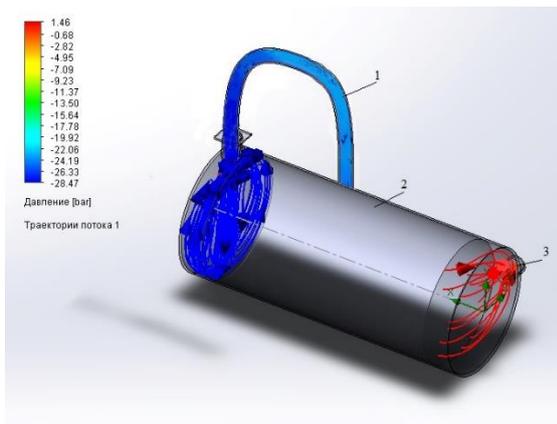


Рисунок 3.18 – Модель процессов откачки шахтных вод в классической схеме водоотлива: 1 – приемный трубопровод центробежного насоса; 2 – модель центробежного насоса; 3 – высоконапорный выход насоса

Физическая модель на рисунке 3.18, представляет собой потоковую симуляцию движения шахтной воды в масштабе 1:1000, которая имитирует изменение давления гидропотока. При этом модель центробежного насоса 2 имеет схожие параметры с существующим серийным агрегатом ЦНС 300 - 240; входной трубопровод 1, посредством которого происходит имитация всасывания насосом 1 шахтной воды из колодца водосборника, расположенного ниже оси вращения рабочего колеса насоса. Выходной высоконапорный трубопровод 3 имитирует выдачу жидкости на дневную поверхность, а давление в нем развивается благодаря работе насоса 2.

Граничными условиями потоковой симуляции выступали: начальная, близкая к нулю скорость потока жидкости во всасывающем трубопроводе 1 и

давление на выходе из насоса 3, эквивалентно давлению водного столба при откачке шахтных вод на высоту 500м.

Анализируя результаты моделирования, видно, что во всасывающей области насосного агрегата присутствует разрежение потока жидкости, окрашенное в синий цвет и достигающее до -26 бар по шкале изменения давления потока (см. рис.3.18). Дальнейшее повышение давления насосом 2 переводит гидропоток в зону, окрашенную красным цветом, где он достигает давления в 1,5 бар. Этот эффект подтверждается расчетом по приведенным ранее формулам 2.30 - 2.31, которые описывают степень влияния отрицательного входного напора в приемном трубопроводе 1 (см.рис.3.18) на производительность насосных установок. Таким образом, мощность насоса в этом случае расходуется на всасывание жидкости и создание достаточного для этого отрицательного давления, что на практике приводит к использованию более производительного агрегата. Также в рассмотренной классической системе водоотлива, где очистка шахтных вод происходит путем осаждения взвешенных частиц в водосборнике под действием сил естественной гравитации, происходит абразивный износ проточной части насоса, что пагубно влияет на эффективность его работы и приводит к завышению производительности насосных агрегатов. Для проведения сравнительного анализа классической схемы водоотлива и схемы с очисткой гидропотоков создана 3D модель элемента новой системы водоотлива (рис.3.19).

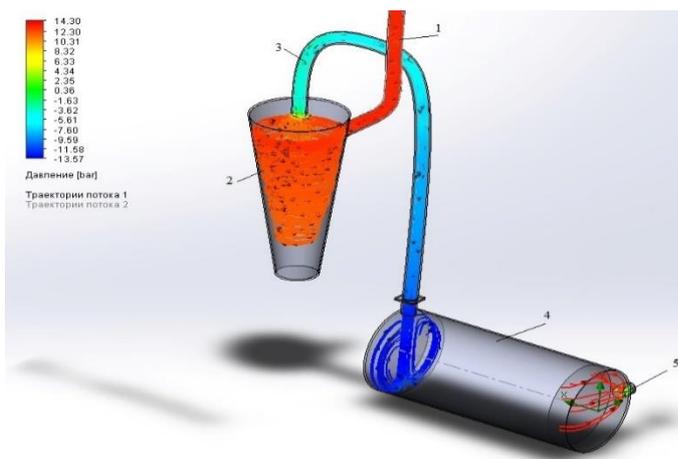


Рисунок 3.19 – 3D модель процесса откачки шахтной воды в схеме с активной очисткой: 1 – приемный трубопровод для перепускаемой шахтной воды; 2 – гидроциклон; 3 – трубопровод для очищенной гидроциклоном воды; 4 – центробежный насос; 5 – выходной высоконапорный патрубок насоса

3D моделирование гидропотока в инновационной схеме происходило в схожих условиях с классической схемой (см. рис.3.18) в масштабе 1:1000. Модель представляет собой симуляцию перемещения гидропотока, который по приемному трубопроводу 1 с имитацией давления, окрашенного в красный цвет, поступает в

гидроциклон 2, где за счет созданного давления возникает вращающийся внутренний гидропоток для эффективного осаждения взвешенных частиц при помощи центробежной силы. При работе гидроциклона 2, первоначальное давление снижается до зелено-бирюзового цвета в трубопроводе 3, по которому очищенная вода из гидроциклона 2 поступает в насос 4, который нагнетает давление, окрашивая его с синего оттенка на входе до красного на выходе 5.

Отличительной особенностью данного моделирования являлось то, что скорость входного граничного условия была выше и соответствовала скорости, развиваемой потоком при перепуске по вертикальной скважине – 34 м/с. Насосная установка для чистоты эксперимента имела аналогичные характеристики.

Важно отметить, что гидроциклон в данном случае выполняет роль очистки шахтной воды, а не исключительно функцию сепарации, и был подключен в магистраль всасывания насоса, в следствие чего, для предотвращения возникновения эффекта сифона, нижняя часть конуса гидроциклона в модели была перекрыта заглушкой.

В результате анализа результатов моделирования, стало видно, что большая часть энергии перепускаемого потока теряется на очистке в гидроциклоне, давление упало с 12 до 2 бар. Приближаясь к насосу, поток полностью теряет положительное давление и переходит в область отрицательного, вызванного работой входной части насосной установки. Несмотря на потери давления в гидроциклоне, отличительной особенностью описанной модели, по сравнению с классической, является то, что созданное в ней подпорное давление, при прочих равных условиях, обеспечивает более высокое давление на выходе из насоса, которое достигает 12 бар. Такой эффект также достаточно легко объясняется результатами расчётов по формулам 2.30 - 2.31, где в 3D модели схемы с очисткой  $H_{г\text{ео}}$  имеет положительное значение.

Таким образом, моделирование доказало высокую энергоэффективность схемы с очисткой шахтных вод в гидроциклоне на фоне классической схемы, вплоть до 90%, в зависимости от величины подпорного давления. Важно заметить, что в математической модели воссозданы идеальные условия, где не учтены частные факторы, так или иначе влияющие на результат. Среди подобных

факторов: гравитационная составляющая, турбулентный режим потока, гидравлические сопротивления проточной части и другие.

Для проверки результатов компьютерного моделирования был создан испытательный стенд с возможностью определения влияния подпорного давления, образуемого после обесшламливания воды в гидроциклоне, на величину потребления насосом электрического тока. В эксперименте использовались два насоса – мембранный (рис. 3.20) и центробежный (рис. 3.27), отличающихся друг от друга типом рабочего органа: в одном – гибкая диафрагма или мембрана, которая изгибается под действием механического привода и выполняет функцию эквивалентную поршню в поршневом насосе; во втором – рабочее колесо с лопастями, где переносное движение жидкости происходит за счёт центробежной силы в перпендикулярном направлении оси вращения ротора.

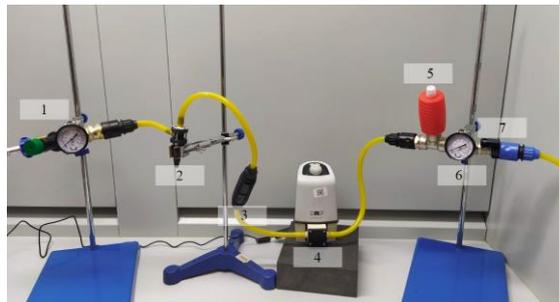


Рисунок 3.20 – Лабораторная установка на базе мембранного насоса для выбора параметров схем водоотлива

Стенд представляет собой одновременную имитацию системы перепуска и откачки шахтных вод в условиях подземного рудника и состоит из следующих элементов: 1 – регулятор давления механический с манометром, необходимый для создания рабочего давления для гидроциклона, тем самым имитируя давление гидротока 1 (см. рис. 3.19) в системе перепускных скважин, объединенных в единый водный коллектор (см. рис. 2.5); 2 – гидроциклон, как и в модели (см. рис. 3.19, поз. 2) служит для учета потерь, возникающих при активном обесшламливании воды; 3 – быстросъемный разъединитель, необходимый для переключения режимов работы лабораторной установки, с классической схемы на инновационную схему с активной очисткой воды; 4 – гидравлический мембранный насос; 5 – компенсатор гидравлических ударов, связанных с работой мембранного насоса; 6 – манометр, измеряющий давление, создаваемое насосом; 7 – ограничительный клапан, создающий нагрузку на насос и тем самым

имитирующий процесс подъема шахтной воды на поверхность как модели на выходном патрубке 5 (см. рис. 3.19).

Лабораторная модель гидроциклона в масштабе была изготовлена на 3D принтере (рис.3.21).

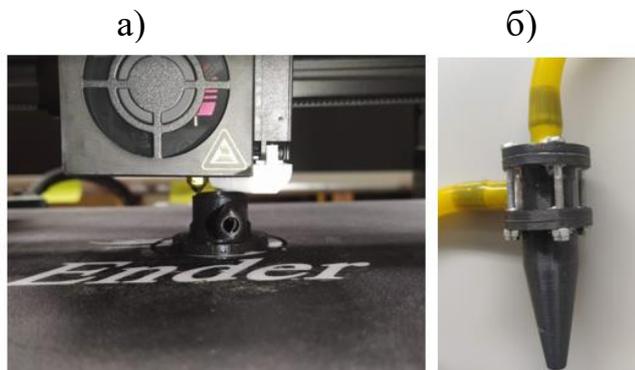


Рисунок 3.21 – Создание лабораторной модели гидроциклона: а – печать верхней части конуса; б – модель в сборе

Лабораторный эксперимент проходил в два этапа: с моделированием классической и разработанной схем водоотлива. Для предотвращения разрыва мембраны в насосе и сохранения его работоспособности давление на входе было ограничено до 0,5 бар.

Методика проведения эксперимента предусматривала фиксацию динамики потребления электрического тока насосом в зависимости от изменения входных и выходных параметров. Так, для классической схемы водоотлива было предусмотрено варьирование следующих параметров: высоты всасывания жидкости насосом – от 0 м до -1м и нагрузочного давления путем регулирования ограничительного клапана в диапазоне от 0 до 0,5 бар.

Для схемы с очисткой воды также предусмотрено изменение нагрузочного давления регулировочным клапаном, при этом входной параметр отличен от классической схемы и заключается в изменении входного подпорного давления для насоса от 0 до 0,5 бар за вычетом потерь на гидроциклоне.

В ходе натурного моделирования классической схемы водоотлива лабораторный стенд (рис.3.22) предусматривал подключение насоса через быстросъемный разъединитель к водопроводу, опущенному в емкость с водой, располагаемую в ходе эксперимента на различных высотных отметках.

Потребление тока фиксировалось в различных режимах всасывания при изменении нагрузочных параметров насоса.

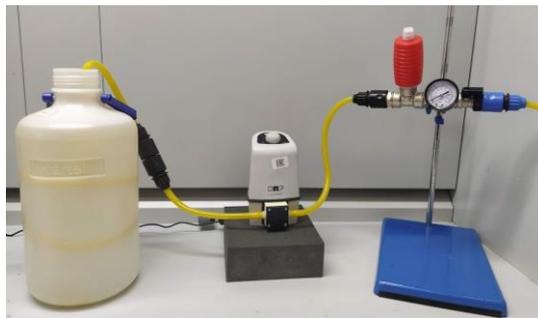


Рисунок 3.22 – Лабораторный стенд для моделирования классической схемы водоотлива с главным водосборником

Эксперимент проводился в трех режимах работы насоса – на 50, 80 и 100% от его максимальной мощности. Результаты приведены в таблицах 3.5 - 3.7.

Таблица 3.5 – Результаты лабораторного экспериментального моделирования классической схемы при работе насоса на 50% от максимальной мощности

	Нагрузка на насосе, бар	Высота подъема, м					
		0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,8	-1
		Потребляемый ток, А					
1	0,1	0,052	0,053	0,054	0,055	0,056	0,057
2	0,2	0,052	0,054	0,054	0,055	0,056	0,057
3	0,3	0,053	0,054	0,055	0,056	0,057	0,058
4	0,4	0,053	0,055	0,056	0,056	0,057	0,058
5	0,5	0,054	0,055	0,056	0,057	0,058	0,059

Таблица 3.6 – Результаты лабораторного экспериментального моделирования классической схемы при работе насоса на 80% от максимальной мощности

	Нагрузка на насосе, бар	Высота подъема, м					
		0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,8	-1
		Потребляемый ток, А					
1	0,1	0,062	0,064	0,066	0,067	0,067	0,068
2	0,2	0,063	0,065	0,066	0,067	0,068	0,069
3	0,3	0,063	0,066	0,067	0,068	0,068	0,069
4	0,4	0,065	0,066	0,067	0,068	0,069	0,070
5	0,5	0,065	0,067	0,068	0,069	0,069	0,070

Таблица 3.7 – Результаты лабораторного экспериментального моделирования классической схемы водоотлива при работе насоса на полную максимальную мощность

	Нагрузка на насосе, бар	Высота подъема, м					
		0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,8	-1
		Потребляемый ток, А					
1	0,1	0,073	0,074	0,075	0,077	0,078	0,080
2	0,2	0,073	0,075	0,075	0,077	0,078	0,080
3	0,3	0,074	0,075	0,076	0,078	0,079	0,081
4	0,4	0,075	0,076	0,077	0,078	0,080	0,082
5	0,5	0,075	0,076	0,077	0,078	0,080	0,083

Для второго этапа эксперимента насос подключался через быстроръемный разъединитель к гидроциклону и регулятору давления, как это показано на рисунке 3.20. В таком режиме работы стенда для расчета подпорного давления на входе насоса в зависимости от показаний манометра на регуляторе давления было необходимо оценить гидравлические потери на модели гидроциклона.

До определения потерь в гидроциклоне фиксировались исходные или дефолтные показания на входном и выходном манометрах путем регулирования спускного клапана и регулятора давления до тех пор, пока показания манометров не совпадут друг с другом (рис.3.23, а). После выставления необходимого положения спускного клапана в схему подключался гидроциклон (рис.3.23, б) и производился замер гидравлических потерь, приведенный в таблице 3.8.

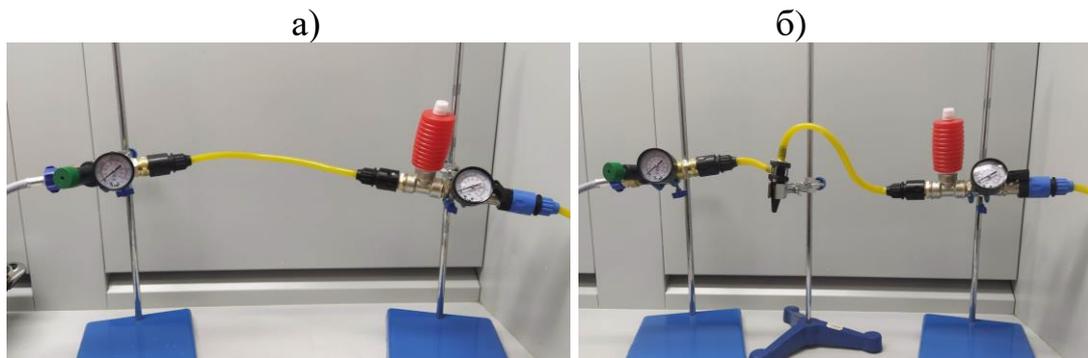


Рисунок 3.23 – Схема стенда для определения гидравлических потерь в модели гидроциклона: а – режим выставления дефолтных значений; б – режим замера потерь на гидроциклоне

Таблица 3.8 – Гидравлические потери в лабораторной модели гидроциклона в ходе эксперимента

	Давление на входе, бар	Давление на выходе, бар	Потери, %
1	0,1	0,05	50,00
2	0,25	0,13	52,00
3	0,3	0,17	56,67
4	0,4	0,25	62,50
5	0,5	0,26	52,00
6	0,75	0,53	70,67
Среднее значение потерь			57,31

Полученные результаты по мере давления в гидроциклоне позволяют с большей достоверностью оценить результаты эксперимента в режиме работы стенда с подключенным гидроциклоном. Результаты этого этапа эксперимента приведены на рисунках 3.24 – 3.26.

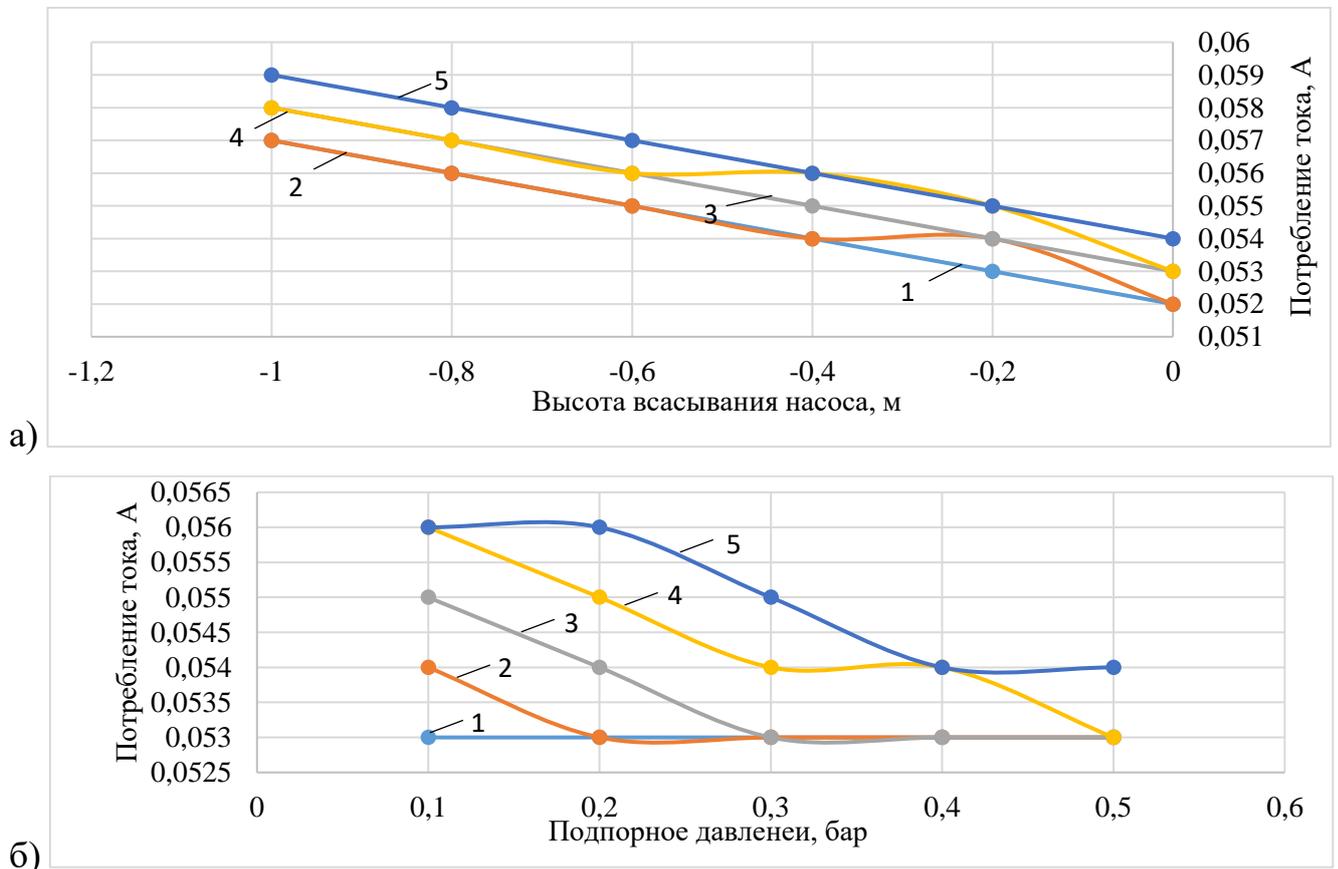


Рисунок 3.24 – Результаты лабораторного эксперимента в режиме классической (а) и разработанной (б) схемах при работе насоса на 50% от максимальной мощности при гидравлическом сопротивлении на выходе из насоса, бар: 1 – 0,1; 2 – 0,2; 3 – 0,3; 4 – 0,4; 5 – 0,5

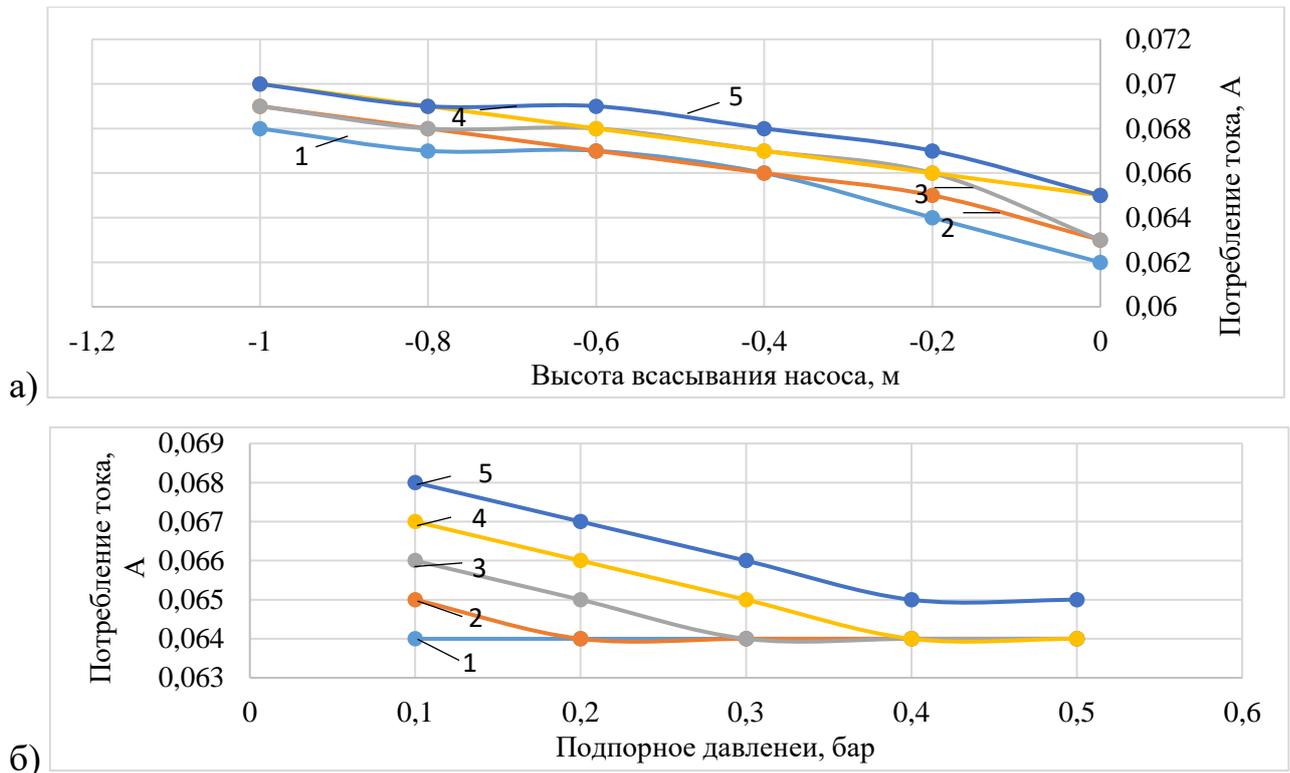


Рисунок 3.25 – Результаты лабораторного эксперимента в режиме классической (а) и разработанной (б) схемах при работе насоса на 80% от максимальной мощности при гидравлическом сопротивлении на выходе из насоса, бар: 1 – 0,1; 2 – 0,2; 3 – 0,3; 4 – 0,4; 5 – 0,5

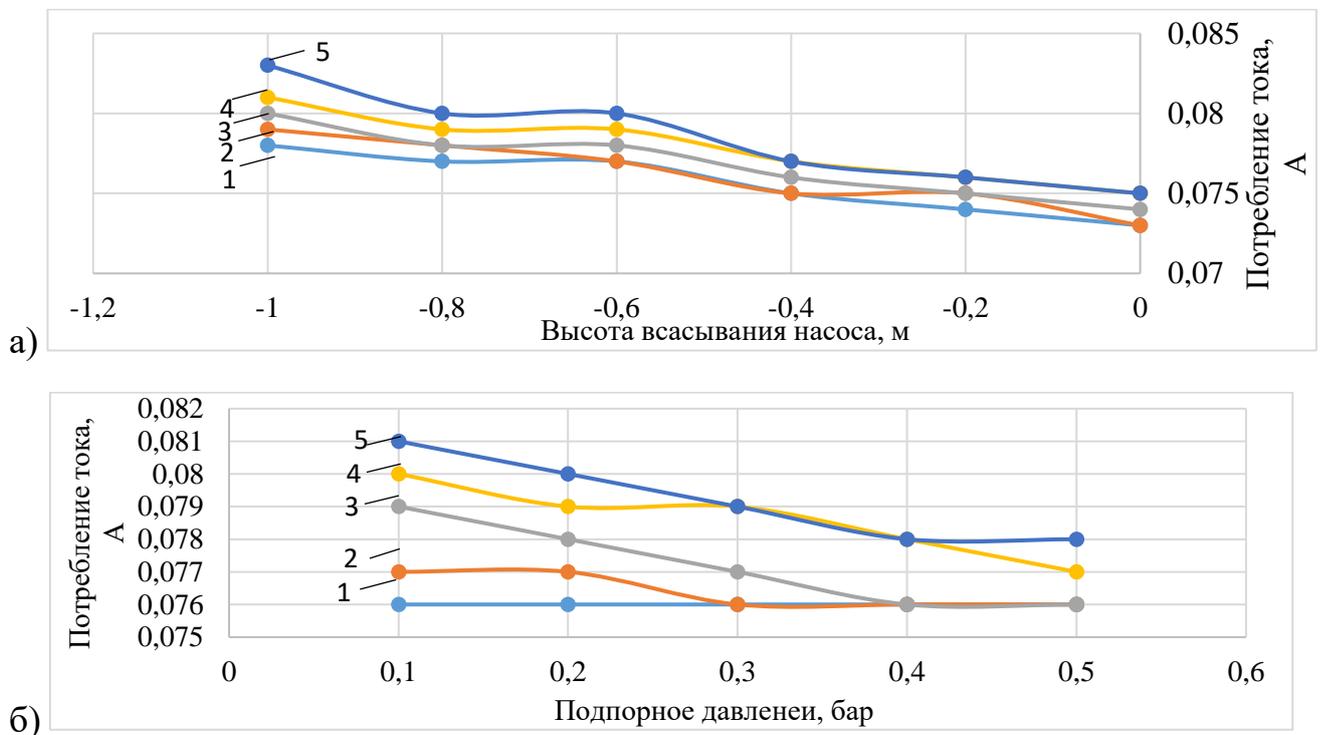


Рисунок 3.26 – Результаты лабораторного эксперимента в режиме классической (а) и разработанной (б) схемах при работе насоса на максимальной мощности при гидравлическом сопротивлении на выходе из насоса, бар: 1 – 0,1; 2 – 0,2; 3 – 0,3; 4 – 0,4; 5 – 0,5

Сравнением результатов моделирования двух схем в различных режимах работы насоса установлено, что потребление электрической энергии в схеме с очисткой вод стремится к диапазону от минимального к среднему значению, соответствующему данным шахтных измерений. В то время как диапазон потребления энергии в классической схеме водоотлива стремится к своему максимальному значению. Например, при работе на максимальной мощности (рис.3.26) для создания насосом напора 0,5 бар в классической схеме (рис.3.26, а) требуется потребление тока от 0,075 до 0,083А, в зависимости от высоты забора воды, причем в условиях подземного рудника невозможно обеспечить работу с нулевой отметкой забора шахтной воды из водосборника. Поскольку в классической схеме в рудничных условиях наиболее близок режим работы схемы в диапазоне глубин забора воды от -0,6 до -1 м, где в рамках проведенного эксперимента потребление составило 0,080 – 0,083А. Иная картина наблюдалась при рассмотрении результатов эксперимента по инновационной схеме водоотлива. Так, на максимальной мощности при создании напора насосом 0,5 бар, схема водоотлива потребляла ток в диапазоне 0,078 – 0,081 А (рис.3.26, б). При переводе режима работы схемы в подземные условия, диапазон нагрузки сместится к пониженному значению входного напора, так как создание подпорного давления, равного полезному напору насоса, в условиях подземного рудника технически не представляется возможным. Таким образом, с точки зрения потребления электроэнергии, разработанная схема при использовании мембранного насоса способна повысить энергоэффективность работы системы водоотлива на 3%. Такой низкий эффект наблюдается ввиду конструктивной особенности мембранного насоса. В нем подпорное давление оказывает незначительное влияние на электропотребление ввиду наличия в конструкции обратных клапанов и особенности работы гибкой диафрагмы, схожей с работой поршня в поршневом насосе. Таким образом, подпорное давление для данного типа насоса снижает потребление энергии на забор жидкости, но на потребление, связанное с подъемом воды, влияние не оказывает. Помимо мембранного насоса в шахтных условиях широко распространены центробежные насосы, принцип работы которых основан на формировании центробежной силы, благодаря которой происходит вытеснение воды к внешним участкам камеры насоса, а затем под действием созданного

избыточного давления – в напорный трубопровод в направлении дневной поверхности.

По схожей схеме, разработанной для мембранного насоса, был построен стенд для испытаний центробежного насоса (рис.3.2, 3.29), отличительной особенностью которого является наличие механического прибора учета расхода жидкости 2. Наличие такого прибора крайне необходимо при испытаниях центробежного насоса, расход жидкости которого изменяется в зависимости от создаваемого им напора, в отличие от мембранного насоса, где расход воды зависит от частоты колебаний диафрагмы, а значит тесно коррелирует с потребляемым механическим приводом электрическим током.

Методика и ход эксперимента схожи со схемой с мембранным насосом, однако, отличительная особенность заключается в процессе снятия показаний прибора учета расхода воды, а также в подходе к созданию искусственной нагрузки на насос, ввиду изменчивости расхода жидкости. Таким образом, методика создания нагрузки на насос предусматривала изменение высоты водяного столба, создаваемого работой насоса.

В ходе моделирования классической схемы водоотлива на базе центробежного насоса лабораторный стенд также собирался в классическую схему (рис.3.26), где насос был подключен через быстросъемный разъединитель к водопроводу, опущенному в емкость с водой. Для чистоты эксперимента в схеме исключено влияние атмосферного давления в емкости путем кольцевания ее полости посредством приемного и отводящего водопроводов.



Рисунок 3.27 – Экспериментальный стенд в классической компоновке с имитацией водосборника: 1 – прибор для учета расхода воды; 2 – центробежный насос; 3 – гидравлический компенсатор с манометром; 4 – емкость, имитирующая водосборник

Так как методика снятия измерений предусматривала изменение высоты водяного столба, то минимизация влияния атмосферного давления, показанная на рисунке 3.27 в емкости 4 не производилась, т.к. при варьировании высоты емкости изменяется подпорное давление жидкости во входном водоводе. Для исключения такого эффекта, в экспериментальном стенде кольцевание осуществлялось при помощи двух одинаковых емкостей с регулировкой коэффициента сообщения (рис.3.28).



Рисунок 3.28 – Емкости с регулировкой коэффициента сообщения посредством частичного перекрытия сливных кранов

Таким образом, при моделировании классической схемы водоотлива и минимизации влияния атмосферного давления, влияющего на показатели потребления электрической энергии, производили регулирование высоты размещения приемной емкости, в которой при наполнении происходил перелив воды в нижнюю емкость, являющуюся источником работы всей схемы.

На втором этапе эксперимента на стенде собиралась схема с гидроциклоном (рис.3.29), в которой присутствовала одна емкость, благодаря наполнению которой происходило изменение высоты водяного столба. Изменение входного давления к гидроциклону также обеспечивал регулятор давления 1 в диапазоне от 0 до 0,24 бар с шагом 0,02, что эквивалентно высоте водяного столба изменялся от 0 до 2,4 м.

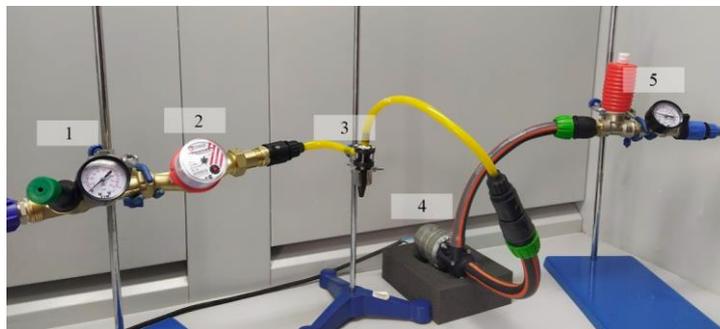


Рисунок 3.29 – Схема водоотлива с очисткой на базе центробежного насоса: 1 – регулятор давления с манометром; 2 – прибор учета расхода воды; 3 – гидроциклон; 4 – центробежный насос; 5 – гидравлический компенсатор с манометром

Результаты проведенных экспериментов с центробежным насосом представлены на рисунках 3.30 и 3.31.

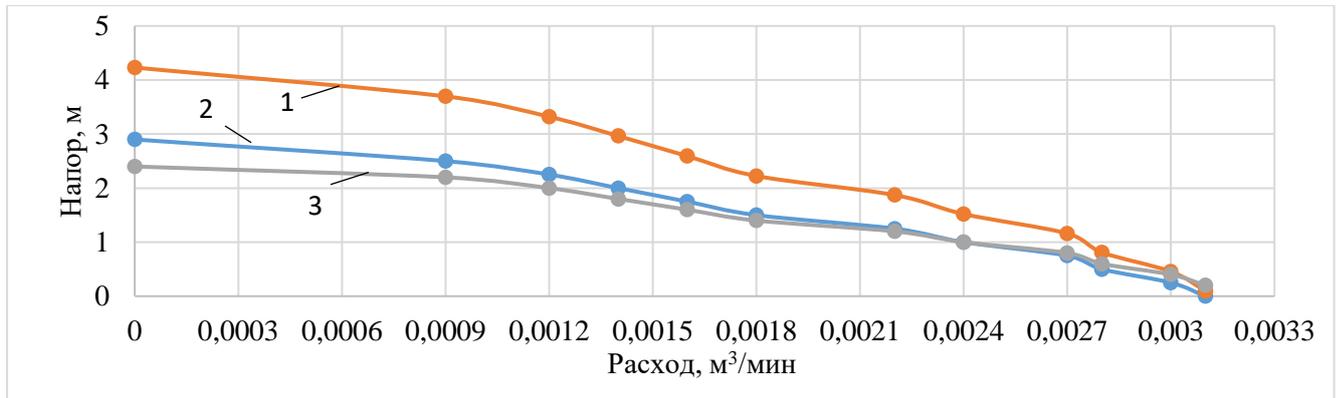


Рисунок 3.30 – Характеристика центробежного насоса в классической схеме и в схеме с гидроциклоном, с учетом влияния работы подпорного давления: 1 – инновационная схема; 2 – классическая схема; 3 – создаваемое подпорное давление

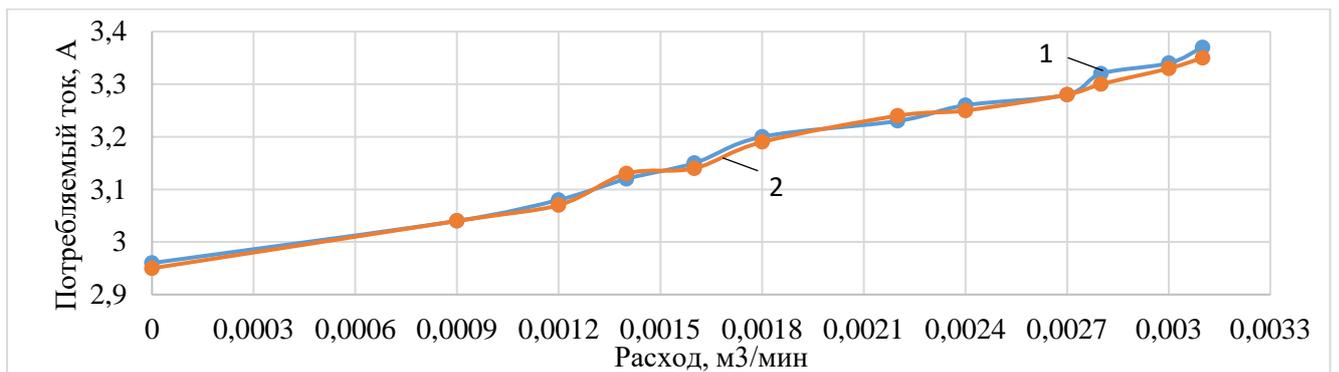


Рисунок 3.31 – Потребление электрического тока центробежным насосом в классической – 1 и в схеме с гидроциклоном – 2

Главным результатом проведенного эксперимента является то, что при неизменной потребляемой мощности электронасоса схема с очисткой вод в гидроциклоне позволяет достичь высоты подъема жидкости на 54-68% выше, за счет искусственно создаваемого подпорного давления, что в полном объеме подтверждает результаты компьютерного моделирования. Повышение эффективности работы схемы наблюдается и при незначительном подпорном давлении, ввиду того что снижаются потери на гидроциклоне (см.табл. 3.8).

Также отличительной особенностью эксплуатации центробежного насоса является то, что его необходимо «заправлять» рабочей жидкостью перед пуском, чтобы создавалось гидравлическое разрежение и не образовывались воздушные пустоты в корпусе насоса. Такой недостаток отсутствует в предлагаемой

инновационной схеме, так как шахтная вода подпорным давлением полностью заполняет рабочую область гидронасоса.

С учетом повышения давления на прежних гидроагрегатах, схема предоставляет возможность отказаться от практики умышленного завышения мощностных характеристик насосных установок из расчета на их повышенный абразивный износ. Отказаться от подобной практики станет возможным не только повышенному выходному давлению, но и благодаря использованию гидроциклона для очистки шахтных вод. Такой подход, судя по проведенному литературному обзору, позволит снизить потребление дополнительно на 5-7%.

Таким образом, согласно результатам моделирования, суммарный максимальный потенциал к снижению потребления электрической энергии в работе предложенной инновационной схемы водоотлива равен 10% при использовании в работе мембранного насоса и 75% – при эксплуатации центробежного насоса, что в годовом выражении составляет сотни мегаватт электрической энергии. Но такой потенциал энергосбережения недостижим без изменения структурных изменений системы водоотлива под условия применения гидроциклонов, с учетом  $P_{\text{макс.г-цикл}}$ ,  $P_{\text{макс}}$  – максимального,  $P_{\text{мин.г-цикл}}$ ,  $P_{\text{мин}}$  – минимального для их функционирования рабочего давления.

#### **3.4. Требования к системе водоотлива при подземной разработке рудных месторождений с рекуперацией энергии гидропотоков**

Проведенные теоретические и натурные исследования действующих схем рудничного водоотлива позволили понять, что эксплуатация инновационных схем с рекуперацией энергии гидропотоков в условиях подземного рудника требует внесение изменений к подходу при проектировании систем водоотлива в горнотехнической системе (ГТС). Поэтому, для усовершенствования системы водоотлива с рекуперацией энергии на базе использования микроГЭС с учетом удовлетворения всех требований нормативной документации технического и организационного характера по созданию и реконструкции гидроэлектростанций, направленных на обеспечение надежной, безопасной и эффективной эксплуатации

объекта, необходимо учитывать не только нормативные требования, предъявляемые к ГТС, но и требования к строительству и эксплуатации микроГЭС.

Как указывалось ранее, в условиях эксплуатации ГТС наиболее приемлем деривационный тип ГЭС, так как напор обеспечивается за счет создания сосредоточенного перепада воды и ее отвода из рек по искусственному водоводу. Исходя из выполненного анализа литературы и проведенных исследований, структура системы водоотлива должна соответствовать следующим требованиям, относящимся к конструкции ГЭС [32]:

- водозаборные сооружения должны обеспечивать бесперебойную подачу воды в турбины ГЭС, турбинные водоводы, деривационные туннели, каналы и предусматривать возможность прекращения поступления воды при плановом осмотре, ремонте оборудования и сооружений и при аварийных ситуациях;

- на водозаборных сооружениях должен быть предусмотрен комплекс мер, предотвращающих попадание к турбинам вместе с водой твердых предметов и мусора;

- в водоприемниках саморегулирующихся водоводов следует предусматривать аварийно-ремонтные затворы;

- следует обустроить сооружения и устройства для перехвата и улавливания наносов, которые осуществляют осветление воды путем осаждения или перехвата частиц, крупность которых превышает величину, обоснованную техническими и экономическими расчетами;

- водоводы замкнутого поперечного сечения ГЭС должны обеспечивать пропуск воды при всех возможных режимах эксплуатации;

- необходимо создавать подземные емкости суточного регулирования деривационных ГЭС;

- следует предусматривать уравнивательные устройства в конце напорной деривации перед турбинными напорными трубопроводами для регулирования мощности гидротурбин и предохранения деривации от гидравлического удара;

– выбор параметров и типа деривационных каналов должен быть обоснован сопоставлением вариантов с учетом пропускной способности, объемов работ, потерь воды и напора, обеспечения безопасности и затрат на его эксплуатацию;

– параметры гидроэлектростанции должны учитывать тип, количество и габариты основного и вспомогательного гидроэнергетического оборудования, электроэнергетических систем производства энергии, систем эксплуатации водоотлива в комплексе и микроГЭС.

На базе требований, предъявляемых к ГЭС деривационного типа, и на основе результатов исследований разработаны следующие требования к системе водоотлива с использованием гидроагрегата в качестве преобразователя энергии шахтных потоков:

– для обеспечения бесперебойной подачи воды на гидротурбину, водозаборное сооружение – водосборник 1 (см.рис.2.3), должен рассчитываться по локальному среднему водопритоку выработанного пространства, где расположено сооружение, на основе реализации подхода суточного регулирования потоков, поступающих в перепускную скважину 2;

– водосборник 1 необходимо проектировать с учетом степени загрязнённости шахтной воды, объемом, достаточным для осветления воды путем осаждения абразивных частиц, крупность которых превышает величину, обоснованную техническими и экономическими расчетами для ГЭС, а также он должен аккумулировать весь суточный естественный водоприток горизонта 1;

– водосборник 1 должен быть оснащен необходимой коммуникацией, препятствующей попаданию в него крупного шлама или иного технологического мусора;

– главный водовод 2 должен обладать пропускной способностью, обеспечивающей пропуск воды при всех режимах эксплуатации гидротурбинной установки, что должно гарантировать безопасность и надежность ее эксплуатации, а также иметь высоту, не менее 50м, для поддержания требуемого КПД гидроустановки и должен обеспечивать условия непрерывности потока;

– на ряду с основным рабочим водоводом 2, необходимо создавать резервный водовод холостого хода, служащий как для аварийного сброса шахтной воды из водосборника 1, так и для регулирования суточного притока «сбрасывая» излишки шахтной воды в главный водосборник 9;

– на всех водоводах обязательно присутствие аварийно-ремонтных затворов 4, установленных в полости приемного трубопровода скважин;

– у подножья напорного водовода 2 необходимо предусматривать компенсационное устройство 5, защищающее рабочее колесо гидротурбины 7 (см.рис.2.3) от гидравлических ударов;

– приемный трубопровод скважины 2 должен иметь исключительно вертикальное направление для избежания потери напора на преодоление сил сопротивления материала трубопровода;

– на горизонте главного водоотлива необходимо формировать выработанное пространство, достаточное для установки, а также обслуживания гидротурбинного агрегата и имеющее дополнительный водоприемный лоток 8 с гидравлическим соединением с главным водосборником 9 (см.рис.2.3);

– при перепуске шахтной воды с разноуровневых горизонтов к гидротурбинному агрегату, необходимо предусмотреть объединение скважин в водосборнике суточного регулирования 1 посредством применения, эффекта Вентури, где поток с верхнего горизонта поступает в суженную часть приемного трубопровода, который в свою очередь создает зону низкого давления в скважине 2, тем самым затягивая воду из водосборника 1 (см.рис.2.3).

Для примера реализации предлагаемых технологических решений разработана схема выработок с действующей системой водоотлива применительно к условиям освоения условного месторождения (рис.3.32). В качестве исходных горизонтов приняты 200, 250 и 300м, организован главный водоотлив, к которому шахтная вода с вышележащих горизонтов спускается по скважинам 1-3. Вода, перепускаемая по скважинам к гор.300м, имеет приток в размере  $800\text{м}^3/\text{ч}$ , при этом с гор. 300м поступает  $200\text{м}^3/\text{ч}$ , а с гор. 250м  $500\text{м}^3/\text{ч}$ . Приток на подземный горизонт формирует преимущественно природный источник.

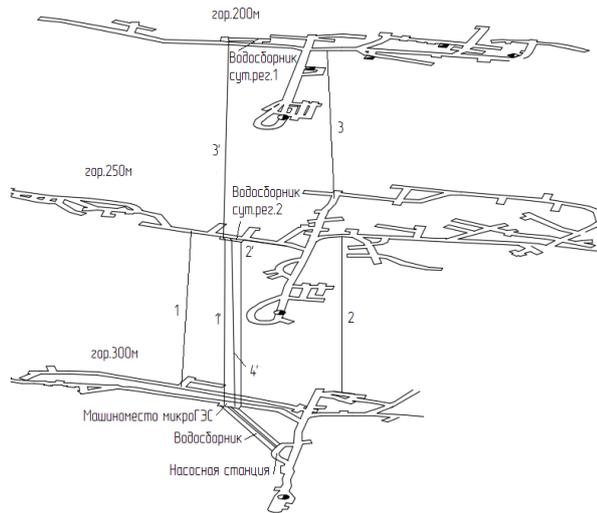


Рисунок 3.32 – Действующая и новая на базе микроГЭС схемы водоотлива условного месторождения: 1-3 – действующие скважины; 1'-3' – новые скважины; 4' – резервная скважина аварийного сброса воды

На основе анализа параметров действующей системы водоотлива и разработанных требований к системе на базе микроГЭС предложена новая схема. При включении микроГЭС в систему водоотлива изменениям подвергается лишь та часть схемы, которая непосредственно связана с перепуском шахтной воды на нижележащие горизонты. Таким образом, было предложено видоизменение положения перепускных скважин 1-3 на 1'-3' с образованием камеры для обустройства водосборников суточного регулирования 1 и 2, предназначенных для поддержания постоянного притока воды на микроГЭС. Место установки микроГЭС расположено на гор. 300м на противоположной стороне водосборника, относительно насосной станции, для обеспечения нормального функционирования процесса осаждения взвешенных частиц.

В таком варианте с учетом условий расположения природных источников воды нужно предусмотреть возможность объединения скважин 1' и 3', например, с использованием эффекта Вентури, который заключается в падении давления, когда поток жидкости протекает через трубу с уменьшенным диаметром. Описанный эффект возможно реализовать, например, направляя приемный суженный в конце трубопровод скважины 3' в скважину 1' большего диаметра, берущую начало на дне водосборника суточного регулирования 2. Таким способом удастся косвенно поднять водяной столб с учетом соотношения потоков вплоть до 70м с имеющихся 50м. При рассмотрении модели выработок, где приток воды отсутствует на гор.

200м, в схеме водоотлива исключается скважина 3' и водосборник суточного регулирования 1.

Важно отметить, что эксплуатация в шахтных условиях схемы с применением микроГЭС для генерации электрической энергии от перепускаемых вниз шахтных гидропотоков возможна только при условии модернизации действующей системы подземного водоотлива, где за время эксплуатации месторождения приток растет на вышележащих горизонтах, относительно расположения главной водоотливной станции. На стадии ввода в эксплуатацию системы водоотлива применение микроГЭС не целесообразно, так как для генерации энергии необходимо создавать перепады на 50 и более метров большого объема шахтной воды, что в дальнейшем способно негативно повлиять на процесс ее откачки.

Анализируя вышеизложенные требования к проектированию системы водоотлива, стоит отметить существенный недостаток в описанной схеме водоотлива с ГЭС малой мощности, а именно, полная потеря энергии гидропоток на лопатках рабочего колеса гидротурбины, вследствие чего последующая выдача потока на поверхность осуществляется насосными агрегатами с нулевой начальной скоростью. Указанный недостаток нивелируется в схеме водоотлива с использованием сообщающихся сосудов (см.рис.2.5), где повышение энергоэффективности системы водоотведения достигается за счет снижения электропотребления насосными установками.

Исходя закона сообщающихся сосудов, к ГТС дополнительно предъявляется ряд требований, отличных от системы с использованием гидротурбинного агрегата:

- высота перепускных скважин должна обеспечивать давление от 2 до 10 бар в коллекторе 7 (см.рис.2.5.) для эффективной работы очищающего устройства 8;
- перепускные потоки шахтной воды Q1-Q3 должны быть полностью изолированы от выработанного пространства приемными трубопроводами или другими инженерными сооружениями, вплоть до их передачи в коллектор 7;
- водосборник главного водоотливного горизонта 11 должен рассчитываться по минимально необходимому объему, исходя из расчета 4-часового нормального шахтного водопритока, как того требует нормативная документация [108];

– количество структурных единиц связки, включающих скважину, очищающее устройство, насос необходимо выбирать, исходя из объемов шахтного водопритока с учетом обеспечения минимально необходимого давления для работы очищающего устройства;

– из водосборников 8 (см.рис.2.6) необходимо проходить скважину, высотой не менее 50м, до выхода на нижележащий горизонт для питания очищенной шахтной водой системы пожаротушения или для технологических нужд;

– водосборник, используемый в роли пожарного резервуара 8, должен быть гидравлически связан с резервным источником воды наземного расположения, посредством трубопровода 7;

– главный высоконапорный трубопровод должен иметь отводящие рукава 9, по которым очищенная шахтная воды выдается к резервуарам 8.

Примером реализации системы водоотлив на базе очистки воды в гидроциклонах служит предлагаемая схема выработок (рис.3.33), основанная на исходных данных к рисунку 3.31. Отличительной особенностью такой схемы от схемы с микроГЭС является то, что изменению подвергаются все элементы системы водоотлива.

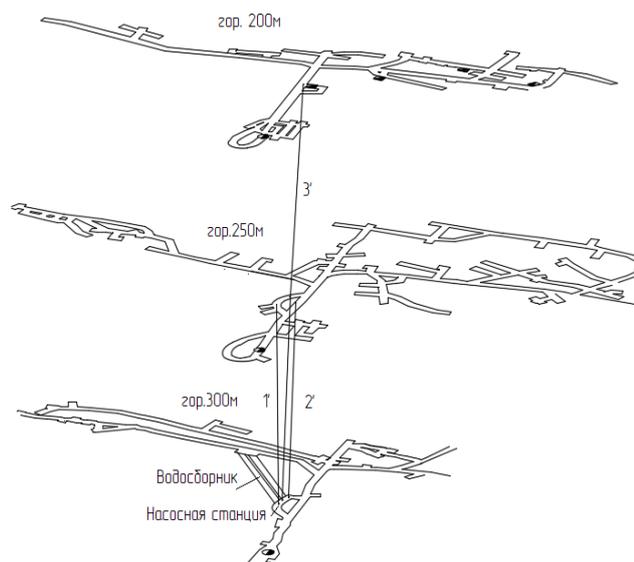


Рисунок 3.33 – Новая схема водоотлива на базе сообщающихся сосудов условного месторождения: 1'-3' – новые скважины

Для выполнения требований, указанных выше применительно к системе водоотлива с очисткой, необходимо изменить положение перепускных скважин 1-3 (рис.3.32) к виду, показанному на рисунке 3.33, где скважина 3 видоизменена на 3' и пробурена с гор. 200м, вплоть до гор.300м, а скважины 1,2 перенесены максимально близко к расположению машинного зала насосной станции. В отличие от схемы с микроГЭС рассматриваемая не требует проходки дополнительных выработок, так как полностью базируется на существующих элементах системы водоотлива.

Возможность гибкого регулирования предлагаемой системы дает возможность применять ее в любых гидрогеологических и горнотехнических условиях как на действующих рудниках, так и на вновь проектируемых. Такая гибкость достигается, в первую очередь, низкими требованиями по напору к системе перепуска воды, когда для работы схемы достаточно перепада высот 30м. Намеренный спуск шахтной воды на 30м для повышения качества ее очистки в большинстве случаев будет более привлекательным решением на фоне высоких затрат, необходимых для содержания классических водосборников и для ремонта насосного оборудования ввиду его повышенного абразивного износа.

В целом, требования к системе водоотлива с рекуперацией энергии гидропотоков, как при помощи гидротурбины, так и при очистке в гидроциклонах базируются на обеспечении общих требований, предъявляемых к системе одноступенчатого водоотлива с выполнением следующих изменений:

- формирование притоков шахтной воды и водоотведение должно осуществляться по рассмотренным выше технологическим схемам (см. рис. 3.32 и рис.3.33;

- проходка перепускных скважин должна вестись не к началу водосборника, а к главному водоотливному машинному залу, где установлены гидроциклоны, либо гидротурбинная установка;

- в качестве индикаторов включения в работу насосов должны выступать параметры давления в перепускной системе;

- необходимо предусмотреть создание дополнительного выработанного пространства под установку гидравлических агрегатов;

- требуется увеличение емкости главного водосборника из расчета 4х часового максимального общешахтного водопритока;
- необходима разработка автоматизированной системы отвода шлама от батарей гидроциклонов;
- видоизменение структуры высоконапорных отводящих шахтную воду на дневную поверхность трубопроводов с учетом наполнения водосборников вышележащих горизонтов.

Для определения оптимального способа рекуперации энергии, затрачиваемой на осушения глубоких подземных выработок, разработан алгоритм выбора схем водоотлива и параметров системы водоотведения с рекуперацией энергии гидропотоков.

### **3.5. Разработка алгоритма выбора способа рекуперации энергии гидропотоков**

Исходя из результатов проведенного литературного обзора, лабораторных и натуральных испытаний, сделан вывод, что схемы, как с генерацией электрической энергии посредством использования гидротурбины, так и с использованием давления водного столба для повышения эффективности работы системы водоотлива, вполне работоспособны и приемлемы для использования в шахтных условиях. Однако, предпочтение при выборе той или иной схемы необходимо отдавать не только исходя из экономической целесообразности, но и на основе оценки влияния совокупности факторов на обилие водного притока в подземные выработки. Для выбора предпочтительных схем разработан алгоритм (рис. 3.34), предусматривающий учет природных и техногенных факторов, влияющих на выбор конструкции схемы водоотлива, а также разработку компенсационных мероприятий по снижению водопритока в шахту.

Разработанный алгоритм укрупненно можно разделить на три этапа:

1. Исследование и определение входных параметров водопритока в подземные выработки с определением их средних и пороговых значений;

2. Оценка вероятности снижения водопритока по мере проведения компенсационных мероприятий;

3. Определение схемы работы системы водоотлива и оценка технико-экономических и технологических параметров.

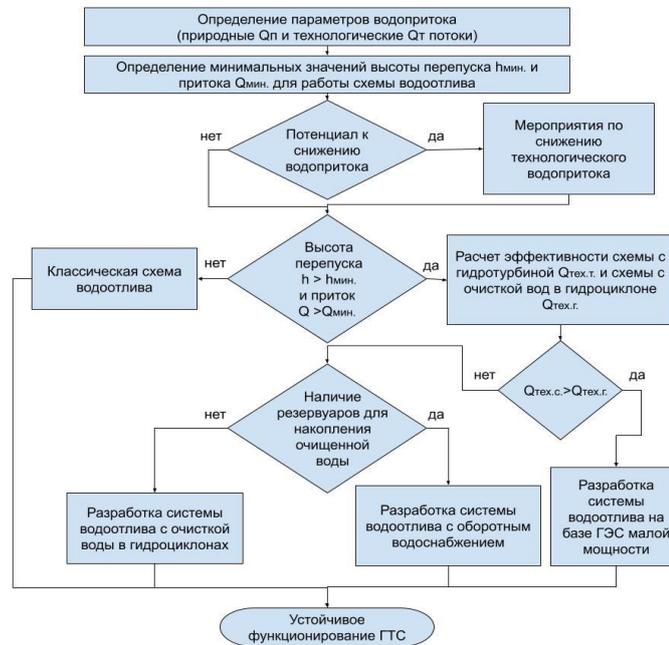


Рисунок 3.34 – Алгоритм выбора способа рекуперации энергии при комплексном освоении рудных месторождений подземным способом

Определение входных параметров на первом этапе расчета заключается в детальном обследовании месторождения на предмет поиска основных источников шахтной воды, их положения, запасов, способов проникновения в подземные выработки, степени активности на протяжении всего периода эксплуатации месторождения.

Для действующего горного предприятия проводится комплекс мероприятий по установлению структуры системы водоотлива, в частности, ее перепускной части. Для действующей системы водоотлива необходимо определить предпочтительную разность высотных отметок перепуска водопотоков и объемов перепускаемой шахтной воды с целью сопоставления их с пороговыми значениями для каждой схемы рекуперации энергии гидропотоков. Также задачей первого этапа обоснования параметров является определение соотношения показателей природных и техногенных источников, необходимых для выбора и оценки параметров компенсационных мероприятий на следующем этапе.

Основная задача второго этапа реализации алгоритма заключается в выявлении возможности снижения водопритоков в подземные выработки шахты. Основной акцент в ходе выполнения данного этапа делается не только на оценке природных, но и техногенных источников притоков шахтной воды, в том числе поверхностных, так как именно они, судя по анализу опыта водоотведения, зачастую не учитываются при проектировании систем водоотлива. Также в большинстве своем, подземные и поверхностные техногенные источники имеют тенденцию к снижению коэффициента водообильности. При этом, природные источники имеют более постоянный коэффициент водообильности, а его снижение, как показывает мировой опыт, достаточно трудоемкий процесс и требует больших капитальных вливаний.

Опираясь на установленные в процессе выполнения первого этапа входные параметры функционирования системы водоотлива подземного рудника, на третьем этапе проводится их сопоставление с экономическими показателями, указывающими на целесообразность применения той или иной схемы водоотлива. Такие оценки основаны на учете высоты перепуска гидропоток, их объема, особенностей действующей схемы водоотлива и возможности ее реорганизации. Далее производится сравнительная технико-экономическая оценка разработанных схем водоотлива с рекуперацией энергии гидропоток. В случае явного приоритета одного из вариантов производится усовершенствование системы водоотлива в соответствии с разработанным ранее требованиям.

При обосновании системы водоотведения для разработки нового месторождения входными параметрами служат результаты инженерных, гидрогеологических и геологических оценок условий месторождения, основываясь на которых с учетом прочих требований и алгоритма, приведенного на рис.3.34, производится выбор системы водоотлива, оптимизация ее параметров рекуперации энергии гидропоток.

Для определения способа рекуперации энергии гидропоток в условиях шахты «Центральная» АО «ЮГК» по разработанному алгоритму выполнен комплексный анализ системы водоотлива шахты, который показал, что в гидрогеологическом отношении Кочкарское рудное поле характеризуется наличием трещинных вод, питающихся в своей основе преимущественно за счет

атмосферных осадков. При этом, водоприток от технологических процессов минимален. Структура действующей системы водоотлива, представленной на рисунке 1.22, представляет собой каскадную схему перекачки воды с нижнего горизонта на вышележащий, а затем на дневную поверхность насосными агрегатами ЦНС 300-240 и ЦНС 300-600. Максимальная высота перепуска шахтной воды достигает 100м, а перепускаемый объем не более 76,5 дм<sup>3</sup>/с. На базе проведенных исследований, для условий шахты «Центральная» разработаны схемы водоотлива с ГЭС малой мощности, с очисткой шахтных вод в гидроциклонах и с возможностью применения выработанного пространства на верхних горизонтах для накопления очищенной технологической воды (рис. 3.35).

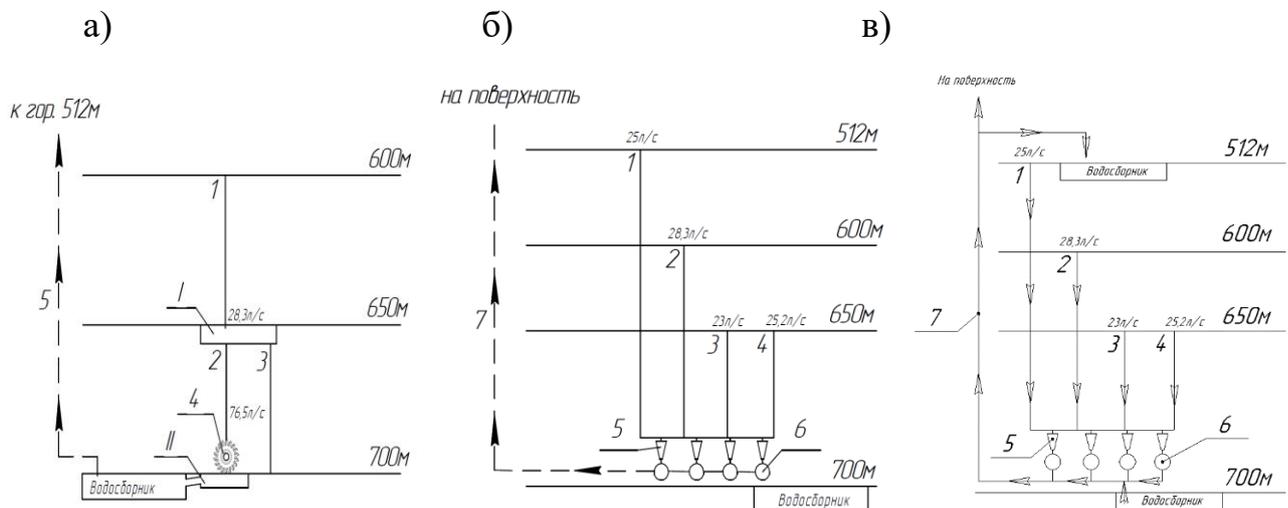


Рисунок 3.35 – Разработанная структурная схема водоотлива шахты «Центральная»: а) с применением ГЭС малой мощности: 1 – перепускная скважина гор. 600 – 650м, 2 – скважина с гор. 650 – 700м, I – регулировочный водосборник, 3 – аварийная скважина, 4 – гидротурбина, II приемный колодец гидротурбины, 5 – высоконапорный трубопровод; б) с очисткой воды в гидроциклонах: 1-4 – перепускные скважины, 5 – гидроциклон, 6 – насосная установка, 7 высоконапорный трубопровод; в) с оборотом технологической воды: 1-4 перепускные скважины, 5 – гидроциклон, 6 – насос, 7 – высоконапорный выдающий трубопровод.

Энергоэффективность функционирования схемы с ГЭС малой мощности достигается путем компенсации части затрачиваемой энергии на насосные установки через генерацию дополнительной собственной электроэнергии. В то время как в схеме с очисткой вод в гидроциклонах энергоэффективность достигается путем повышения производительности насосных установок за счет создаваемого подпорного давления, что позволит снизить их установленную

мощность. А эффективность в схеме с оборотом технологической воды достигается путем снижения высоты подъема жидкости, что уменьшает общее потребление электроэнергии насосными агрегатами. При этом, расход воды для технологических нужд зависит от типа и количества используемого оборудования, так в условиях шахты «Центральная» используются 9 буровых станков на пневмоприводе НКР-100М, где в качестве промывочной жидкости применяется вода с общим расходом  $5,3 \text{ м}^3/\text{ч}$  при давлении не менее 1МПа (101.9м водяного столба).

Таким образом, на основе полученных данных построена гистограмма (рис.3.36), на которой отображено электропотребление разработанных схем в сравнении с затратами электроэнергии на работу действующей системы водоотлива. Из гистограммы видно, что схема с ГЭС малой мощности потребляет электроэнергии на 3% меньше действующей за счет генерации дополнительной энергии в размере 28,8 МВт\*ч в месяц. При этом, схема с очисткой вод в гидроциклонах способна снизить потребление на 39%, такой эффект достигается за счет уменьшения числа водоотливных станций в целом и снижения требуемой мощности насосных установок, что позволяет эксплуатировать насосы ЦНС 300-650. В тоже время схема с оборотом технологической воды способна дать дополнительный эффект в 6% к схеме с очисткой, где общее потребление снизится на 45%.

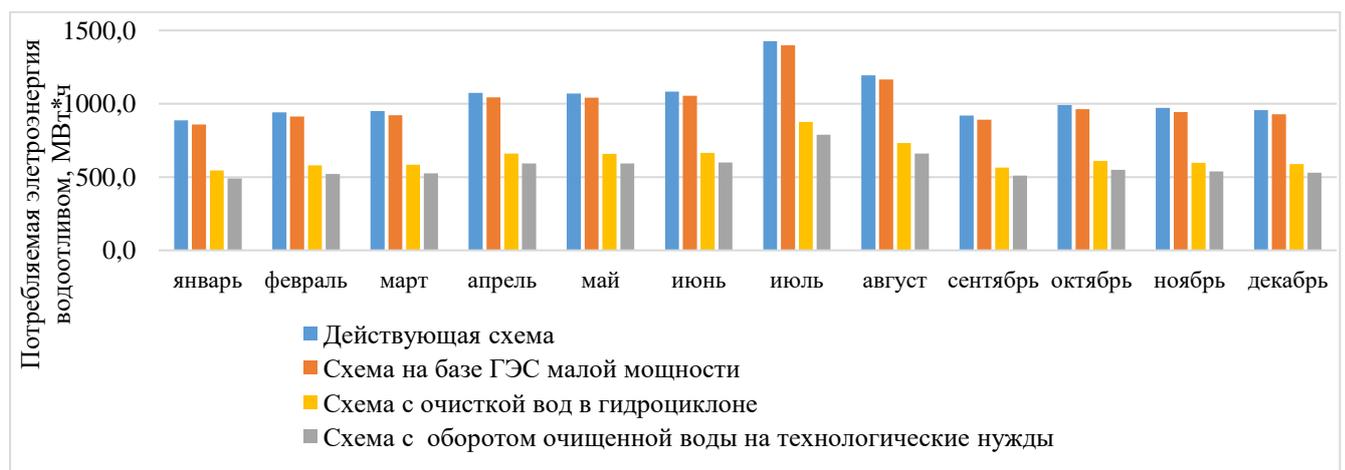


Рисунок 3.36 – Гистограмма по факту потребления электроэнергии за 2018г. в схемах: двухступенчатой (действующая), на базе ГЭС малой мощности, с очисткой вод и с водооборотом технологических потоков

Из произведенных расчетов, видно, что самым предпочтительным вариантом с точки зрения потребления электрической энергии для шахты «Центральная» является схема с оборотом технологической воды. Однако, энергетический эффект может нивелироваться возросшими эксплуатационными затратами, поэтому необходимо дополнительно проводить технико-экономическую оценку каждой схемы.

### **Выводы по главе 3**

1. Общая гидрогеологическая оценка Кочкарского месторождения позволила установить, что выпавшие осадки тесно коррелируют с временем работы насосных установок и произведен анализ факторов, способствующих быстрому проникновению поверхностных вод в подземные выработки. Это даст возможность эффективно прогнозировать приток шахтной воды в подземные выработки на основе метеопрогнозов в регионе для более гибкой работы новых систем водоотлива.

2. Натурными испытаниями разработанной конструкции микроГЭС для применения в условиях шахты «Центральная» Кочкарского месторождения установлено, что теоретически прогнозируемая мощность микроГЭС выше мощности, полученной при проведении испытаний гидротурбинной установки и насоса в режиме реверса на треть. Определены факторы, оказывающие негативное влияние на производство электрической энергии от гидротоков посредством применения микроГЭС в классической системе водоотлива: наличие горизонтальных участков в приемных трубопроводах системы перепуска шахтных вод; несистемное расположение перепускных скважин; наличие подсоса воздуха в потоке перепускаемой жидкости и пр.

3. Компьютерная симуляция режимов работы системы водоотлива выявила потенциал увеличения до 90% выходного давления в предлагаемой инновационной схеме водоотлива, основанная на создании подпорного давления посредством системы перепуска. Натурный эксперимент показал, что при неизменном потреблении электроэнергии центробежным электронасосом в предложенной схеме с сообщающимися сосудами достигается большая высоты подъема жидкости

на 54-68% за счет искусственно созданного системой перепуска подпорного давления, что в полном объеме подтверждено результатами компьютерного моделирования. Установлено, что суммарный потенциал повышения энергоэффективности работы схемы водоотлива посредством применения схемы с очисткой доходит до 10% для мембранного насоса и до 75% для центробежного, что в годовом выражении составляет сотни мегаватт электрической энергии.

## 4. СПОСОБЫ ВНЕДРЕНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И ОЦЕНКА ИХ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

### 4.1. Разработка технологических решений по совершенствованию схемы водоотлива с обеспечением рекуперации энергии гидропотоков

С учетом разработанной схемы водоотлива на базе ГЭС малой мощности для условий шахты «Центральная» (см. рис. 3.36, а) на рисунке 4.1 изображена аксонометрическая проекция на вертикальную плоскость схемы расположения перепускных скважин.

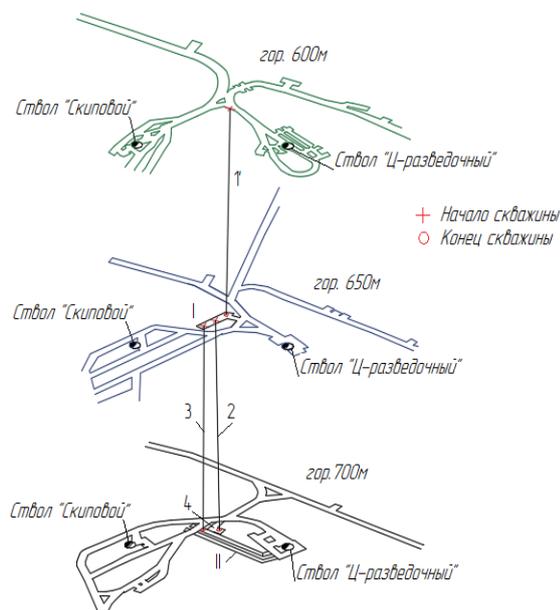


Рисунок 4.1 – Аксонометрическая проекция на вертикальную плоскость расположения водоотливных скважин с генерацией электроэнергии посредством применения ГЭС малой мощности: 1 – перепускная скважина гор. 600 - 650м; 2 – скважина с гор. 650 - 700м; I – аккумулярующий водосборник; 3 – дублирующая скважина; 4 – гидротурбина; II – приемный колодец гидротурбины; 5 – высоконапорный трубопровод

Для разработанной структурной схемы водоотлива необходимо оценить капитальные и эксплуатационные затраты на основе параметров, необходимых для ее функционирования. Так, исходя из суммарного расхода шахтной воды, спускаемой по скважинам, минимально необходимый диаметр определяется по формуле 4.1:

$$D = \sqrt{\frac{4000 \cdot Q}{\pi \cdot v}}, \text{ мм;} \quad (4.1)$$

где  $Q$  – расход воды в скважине,  $\text{дм}^3/\text{с}$ ;  $v$  – скорость потока жидкости у подножья скважины,  $\text{м}/\text{с}$ .

Таким образом, диаметр скважины №1' (рис. 4.1) должен составлять 190мм, а скважина №2 – 312мм. При этом для обслуживания гидроагрегата дублирующая скважина №3 должна иметь сечение, способное пропустить весь свободный приток, т.е., согласно расчетам, 312мм.

Для адаптации ГЭС к подземным условиям рудника помимо создания новых скважин протяженностью 100м для 312мм и 50м для 190мм, также необходимо провести ряд других дополнительных работ, таких как: создание регулировочного водосборника на гор. 650м с привязкой к координатам скважин I (рис.4.1), объемом не менее 500м<sup>3</sup> из расчета суточного водного притока и скорости осаждения взвешенных частиц; проходка выработок под установку ГЭС с приемным колодцем 4, соединенным с главным водосборником II, объемом не менее 460м<sup>3</sup> с учетом габаритов гидроустановки и сопутствующего оборудования; проведение водоотливных канав с учетом нового расположения перепускных скважин. Как видно, изменения существующей схемы водоотлива на шахте «Центральная» при внедрении микроГЭС касаются лишь системы перепускных скважин, в то время как водосборники на гор. 700 и 512м функционируют в неизменном виде. Совершенно иной подход к рекуперации просматривается в инновационной схеме на основе сообщающихся сосудов, где изменения касаются всех частей системы водоотлива.

#### **4.2. Обоснование параметров системы водоотлива шахты «Центральная» с рекуперацией энергии гидропотоков**

Альтернативой компенсации энергозатрат на осушение глубоких выработок при помощи ГЭС малой мощности служит схема водоотлива, использующая энергию гидропотоков для активной очистки шахтной воды, а также для повышения КПД насосных установок. Усовершенствованная схема шахтного водоотлива с перспективой очистки вод для технологических нужд в условиях шахты «Центральная» представлен на рисунке 3.36,б.

В отличие от структурной схемы водоотлива с генерацией энергии гидропотоков через микроГЭС, в схеме с сообщающимися сосудами используются

выработки промежуточного горизонта 512м. С гор. 512м шахтная вода перепускается на гор. 700м с расходом 25л/с, обусловленных собственным водопритоком этого горизонта. Это предусматривает создание главной водоотливной станции на гор. 700м и сокращения числа насосных установок. Выбор места расположения главной водоотливной станции на гор. 700м при существовании гор. 750м обусловлен тем, что максимальная высота подпорного водяного столба в данной конфигурации не превышает 50м, так как наименьшая высота гидравлически сообщающихся между собой перепускных скважин №1-4 равна 50м для скважин №3 и 4. Таким образом, при переносе главного водосборника с гор. 700м на гор. 750м высота подпорного водяного столба не изменится, так как необходимо обеспечить спуск воды с гор. 700м на гор. 750м, где мощностью межэтажного целика равна 50м. Кроме этого, при переносе водосборника на гор. 750м водоприток ощутимо не изменится, так как на гор. 700м он составляет всего 10 м<sup>3</sup>/час, при этом высота подъема жидкости по высоконапорному трубопроводу 7 увеличивается на 50м.

Реализация такой схемы требует бурение дополнительных перепускных скважин. Аксонометрическая проекция такого расположения скважин, применительно к шахте «Центральная», показана на рисунке 4.2. Как видно из рисунка, при реализации схемы водоотлива с очисткой скважины №1-4 бурятся к машинному залу главной водоотливной станции гор. 700м, где они объединяются в едином водном коллекторе для обеспечения баланса водопритоков. Причем перепуск по скважинам №1 и №2 с верхних гор. 512 и 650м осуществляется гидравлически изолированно от выработок нижележащих горизонтов. Такой подход к расположению скважин обеспечивает стабильный и прогнозируемый приток шахтной воды.

Исходя из замеров притока воды, проведенных на шахте «Центральная», установлено, что общий шахтный водоприток по перепускным скважинам №1-4 составляет 371.9 м<sup>3</sup>/ч, а водяной столб в полости этих скважин составляет не более 50м. Использование такой энергии шахтной воды возможно использовать для активной очистки в аппарате для обесшламливания и осветления оборотных вод – гидроциклоне, принцип действия которого основан на сепарации частиц твёрдой фазы во вращающемся потоке жидкости. Таким образом, в качестве очищающего

устройства под условия шахты «Центральная» подходит гидроциклон марки ПВО-ГЦ-1200 с характеристиками, представленными в таблице 4.1.

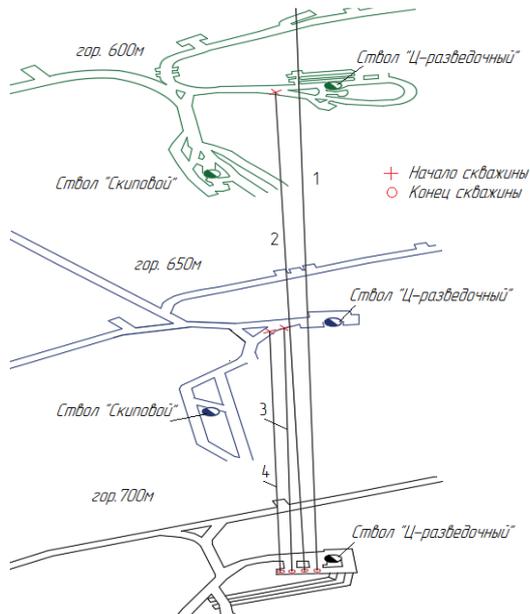


Рисунок 4.2 – Аксонометрическая проекция расположения перепускных скважин при разработанной схеме водоотлива: №1-4 перепускные скважины

Таблица 4.1 Основные технические характеристики гидроциклона ПВО-ГЦ-1200

Наименование параметра	Значение
Диаметр подсоединения, вход (мм)	200
Диаметр подсоединения, выход (мм)	200
Диаметр подсоединения, выход грязевой емкости (дюйм)	F 3"
Давление номинальное PN (или рабочее Pr или расчетное P) МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	0,25-0,8
Давление максимальное PN МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	1,0
Рабочая среда	Вода
Температура окружающей среды t, °C	>5°
Тип присоединения	Фланцевое
Масса, кг, не более	328
Способ управления (очистки от накопленных загрязнений)	Ручной/автоматический
Материал	Нержавеющая сталь 316

Наиболее приемлемым для применения в условиях шахты «Центральная» параметром применения гидроциклона ПВО-ГЦ-1200 является номинально рабочее давление, которое находится в диапазоне 0,25 – 0,8 МПа (25,5 – 81,6 м водяного столба), в который входит величина создаваемого давления в полости скважин. При этом в эффективном режиме работы гидроциклона потери напора в нем находятся в диапазоне 2,5 – 5 м водяного столба, а диапазон производительности составляет 230 – 370 м<sup>3</sup>/ч, в который также входит рассматриваемый расход шахтной воды, перепускаемый по скважинам. Характеристики гидроциклонов в целом не предусматривают напора более 100м,

что является определяющим фактором при выборе месторасположения водоотливного горизонта.

Помимо использования давления водяного столба, образуемого в полости перепускных скважин №1-4, для активной очистки в гидроциклоне, его также возможно использовать и в работе насосных установок и повышая их КПД. Исходными параметрами для подбора насоса являются расход жидкости и высота, на которую необходимо ее перекачать. Требуемая высота подъема при установке главного водоотлива на гор. 700м составляет около 750м с учетом влияния сил трения, при этом, согласно формулам 2.30 и 2.31, высота подпорного давления, равная 50м, способна снизить требуемую до 700м. Но, учитывая максимальные потери давления на работу гидроциклона, высота подпорного давления снижается до 45м, что изменяет требуемую высоту подъема до 705м. Таким образом, для работы рассматриваемой схемы водоотлива требуется насосная установка, удовлетворяющая требованиям по расходу жидкости от 381.9 м<sup>3</sup>/ч (с учетом собственного притока с гор. 700 и гор.750), а по создаваемому давлению от 705м. Наиболее близким к требуемым параметрам является центробежный насос ЦНС 300-780 с характеристиками, приведенными в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Основные технические характеристики насоса ЦНС 300-780

Наименование параметра	Значение
Подача, м <sup>3</sup> /ч	300
Напор, м	780
Максимальная потребляемая мощность, кВт	828
Частота вращения, об/мин	2950
Допускаемый кавитационный запас, м	12
Масса насоса, кг	1960

Согласно правилам безопасности при ведении горных работ, главные водоотливные установки шахты с притоком воды более 50 м<sup>3</sup>/ч должны быть оборудованы не менее чем тремя насосными агрегатами [108]. Исходя из того, что подача выбранного насоса ниже величины притока, то в работе должно находиться 2 насоса, тогда общее число насосов равняется четырем из расчета: два в работе, один в резерве и один в ремонте.

Стоит учесть тот факт, что действующий водосборник на гор. 700м, эксплуатируемый в классической системе водоотлива, остается в работе и выполняет аккумуляцию шахтных притоков с выработок гор. 700м и

нижележащего гор. 750м, а также является емкостью аварийного сброса перепускаемой шахтной воды. Общий приток к водосборнику не превышает  $10\text{м}^3/\text{час}$  и способен заполнить его за четверо суток. В таблице 4.3 указан график работы насосных установок в разработанной схеме водоотлива.

Таблица 4.3 – Сведения об используемом оборудовании на шахте «Центральная» в схеме водоотлива на основе сообщающихся сосудов

Горизонт	Марка используемого насоса	Мощность электропривода насоса, кВт	Количество, шт.	Коэффициент использования в сутки	Суммарная потребляемая мощность в сутки, кВт
700	ЦНС 300/780	1000	4	0,35	1400
750	ЦНС 180/170	132	1	0,33	44
	К100/80	15	1	резерв	0

Как видно из таблицы, помимо главного водоотливного гор. 700 в схеме остается функционировать насосная станция гор.750 в качестве участковой. Для условий шахты «Центральная» такое решение наиболее приемлемо, так как увеличение глубины перепускных скважин до гор. 750м не увеличит существенно объемы перепускаемой шахтной воды, а высота водяного столба будет также ограничена мощностью межэтажного целика гор. 700-750м и составит прежние 50м. Суммарное потребление электрической мощности в рассматриваемой схеме водоотлива составляет 1444 кВт в сутки.

Количество перепускных скважин, необходимых для функционирования схемы, исчисляется 4-мя штуками общей протяженностью 350м и диаметром 110мм. Главным достоинством схемы является отсутствие надобности в проходке дополнительного выработанного пространства для нормального функционирования и базируется на существующих комплексах классического водоотлива, за исключением высоконапорного выдающего трубопровода при переходе с многоступенчатой схемы.

При переходе с эксплуатируемой схемы водоотлива на схему с сообщающимися сосудами в условиях шахты «Центральная» неиспользуемым остается водосборник гор. 512м, общим полезным объемом  $2000\text{м}^3$ . Такая особенность перехода дает возможность снизить необходимую высоту подъема жидкости для насосных установок с уровня дневной поверхности до уровня гор. 512м путем заполнения водосборника осветленной посредством гидроциклонов шахтной водой. Аккумулируемая шахтная вода на гор. 512м может использоваться

как для технологических нужд, так и, например, для системы пожаротушения, что не запрещает нормативная документация. Схема в описанном исполнении показана на рисунке 3.36, в.

В условиях шахты «Центральная» минимально необходимый объем промывочной жидкости для эксплуатируемых буровых станков составляет 5,3 м<sup>3</sup>/ч. Пополнение водосборника гор. 512м рассчитанным объемом удастся обеспечить средствами насосных установок, установленных на гор. 700м.

Помимо технологических нужд данная схема способна обеспечить водой противопожарную систему, где предъявляемые требования по давлению существенно ниже от 0,5МПа, чем для функционирования буровых установок. Таким образом, пониженное требование по давлению расширяет диапазон применения такой схемы, так как эксплуатация противопожарных рукавов, снабжаемых водой из водосборника гор. 512м, возможно уже на гор. 550м, а не с гор. 600м как для буровых установок.

Для создания схемы с использованием водосборников в качестве резервуаров для технологических нужд требуется бурение дополнительной сети скважин с dna водосборника к нижележащим горизонтам (см. рис. 2.6). Общая длина скважин составляет порядка 250м и диаметром не мене 110мм.

#### **4.3 Энергетическая и технико-экономическая оценка рекомендаций по внедрению разработанных схем водоотлива**

В соответствии с разработанными схемами распределения гидротоков по генерации дополнительной и снижению существующего потребления электроэнергии проведен энергетический и технико-экономический анализ предлагаемых вариантов рекуперации энергии в выработанном пространстве шахты «Центральная» АО «ЮГК».

Для реализации разработанных схем рекуперации энергии необходим дополнительный комплекс работ, так или иначе связанных с изменением горнотехнической системы (табл. 4.4).

Таблица 4.4 – Затраты на горные работы, необходимые для функционирования разработанных схем

Наименование Оборудования	Стоимость погонного метра или отбойки м <sup>3</sup> горной массы, р	Количество	Общая цена на оборудование, р
Схема водоотлива с применением ГЭС малой мощности			
Водосборник суточного регулирования объемом	1 300	500м <sup>3</sup>	650 000
Машинный зал для микроГЭС объемом	1 300	460м <sup>3</sup>	598 000
Бурение перепускных скважин диаметром 312мм	3 400	100м	340 000
Бурение перепускных скважин диаметром 190мм	2 500	50м	125 000
<b>ИТОГО:</b>			1 713 000
Схема с очисткой вод в гидроциклонах			
Бурение перепускных скважин диаметром 110мм	1 800	350м	630 000
<b>ИТОГО:</b>			630 000
Схема с оборотом технологической воды			
Бурение перепускных скважин диаметром 110мм	1 800	600м	1 080 000
<b>ИТОГО:</b>			1 080 000

Помимо проведения дополнительных горных работ для реализации разработанных схем требуются капитальные затраты на приобретение оборудования (табл.4.5).

Таблица 4.5 – Капитальные затраты на оборудование

Наименование Оборудования	Стоимость погонного метра или единицы оборудования, р	Количество	Общая цена на оборудование, р
Схема водоотлива с применением ГЭС малой мощности			
Трубопровод для подключения микроГЭС	4 000	15 м	60000
микроГЭС	2 200 000	1	2200000
<b>ИТОГО:</b>			2 260 000

Наименование Оборудования	Стоимость погонного метра или единицы оборудования, р	Количество	Общая цена на оборудование, р
Схема с очисткой вод в гидроциклонах			
Насос ЦНС 300/780	1 200 000	4шт.	4800000
Электропривод насоса	2 300 000	4шт.	9200000
Гидроциклон ПВО-ГЦ-1200-Н	1 000 000	4шт.	4000000
Высоконапорный отводящий трубопровод	9 000	740м	6660000
Трубопровод для подключения	4 000	25м	100000
<b>ИТОГО:</b>			24 760 000

Капитальные затраты на оборудование для схемы с оборотом технологической воды полностью совпадают со схемой с очисткой.

Капитальные затраты на приобретение оборудования:

$$K_3 = 1,25 \cdot K_{бал}, \text{ руб.} \quad (4.2)$$

где  $K_{бал}$  - первоначальная балансовая стоимость системы; 1,25 – коэффициент резерва.

$$K_{бал} = (1,12 \div 1,15) \cdot Ц, \text{ руб.} \quad (4.3)$$

где Ц – оптово-отпускные цены всего оборудования системы водоотлива, умноженная на коэффициент затрат по их транспортировке на предприятие и монтаж.

Общие капитальные затраты на строительство схем приведена в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Общие капитальные затраты на строительство схем водоотлива

Тип схемы водоотлива	Общие капитальные затраты, руб
Схема водоотлива с применением микроГЭС	4 905 250
Схема с использованием сообщающихся сосудов	35 603 500
Схема с использованием водосборника как резервуара для технологической воды	36 053 500

Эксплуатационные затраты будут включать в себя затраты на электрическую энергию системы водоотлива, затраты на оплату труда обслуживающего персонала, отчислений на социальные нужды, а также на амортизационные отчисления. Для определения эффективности той или иной схемы

эксплуатационные затраты уместно рассчитывать совместно с действующей системой водоотлива на шахте «Центральная».

Затраты на электрическую энергию:

$$C_{\text{Э}} = P_3 \cdot C_{\text{год}} + W \cdot C_c, \text{ руб/год} \quad (4.4)$$

где  $P_3$  - заявленная мощность всей системы водоотлива;  $C_{\text{год}}$  - годовая плата за 1кВт заявленной мощности;  $C_c$  – стоимость 1 кВт\*ч;  $W$  – потребляемая энергия за год кВт\*ч/год.

Для обеспечения работоспособности предлагаемой технологии предусмотрен следующий обслуживающий персонал, численность и специальности которого показаны в табл. 4.7

Таблица 4.7 – Обслуживающий персонал необходимый для реализации разработанной технологии

Специальность	Разряд	Количество, чел
Действующая система водоотлива на шахте «Центральная»		
Слесарь	5	18
Электрик	6	12
Сварщик	5	6
Оператор насосных установок	4	6
Прочий обслуживающий персонал		18
Схема водоотлива с применением ГЭС малой мощности		
Слесарь	5	20
Электрик	6	14
Сварщик	5	7
Оператор насосных установок	4	6
Прочий обслуживающий персонал		20
Схема с очисткой вод в гидроциклонах		
Слесарь	5	9
Электрик	6	6
Сварщик	5	3
Оператор насосных установок	4	3
Прочий обслуживающий персонал		6

Обслуживающий персонал для схемы с оборота технологической воды схож со схемой с очисткой, так как подразумевается автоматизированное наполнение водосборника.

Заработная плата персонала:

$$C_O = C_{\text{П}} \cdot k_D, \text{ руб}; \quad (4.5)$$

где:  $C_{\text{П}}$  - прямая заработная плата;  $k_D$  – коэффициент доплат,  $k_D = 1.4$ .

Отчисления на социальные нужды включают в себя обязательные отчисления по установленным законодательством нормам органам социального

страхования, пенсионного фонда, государственного фонда занятости и другие в % от затрат на оплату труда.

Амортизационные отчисления:

$$C_A = K_3 \cdot H_A, \text{ руб}; \quad (4.6)$$

где  $H_A$  - норма амортизационных отчислений, принимается равной 8% от капитальных затрат.

Затраты на ремонт оборудования принимаются из расчета 10% от капитальных затрат.

Таблица 4.8 – Сводная таблица годовых эксплуатационных затрат

Статья расходов	Сумма, руб
<b>Действующая система водоотлива</b>	
Стоимость электроэнергии $C_э$ , руб.	3 328 440
Оплата труда $F_{зп}$ , руб.	15 102 576
Амортизационные отчисления $C_A$ , руб.	1 605 000
Затраты на ремонт оборудования $C_P$ , руб.	6 900 000
Отчисления на социальные нужды $C_{отч}$ , руб.	6 041 030
<b>Суммарные эксплуатационные затраты, руб. <math>C_{\Sigma}</math></b>	<b>32 977 046</b>
<b>Схема водоотлива с применением ГЭС малой мощности</b>	
Стоимость электроэнергии $C_э$ , руб.	2 424 408
Оплата труда $F_{зп}$ , руб.	16 925 328
Амортизационные отчисления $C_A$ , руб.	1 997 420
Затраты на ремонт оборудования $C_P$ , руб.	7 126 000
Отчисления на социальные нужды $C_{отч}$ , руб.	6 770 131
<b>Суммарные эксплуатационные затраты, руб. <math>C_{\Sigma}</math></b>	<b>40 346 993</b>
<b>Схема с очисткой вод в гидроциклонах</b>	
Стоимость электроэнергии $C_э$ , руб.	2 825 280
Оплата труда $F_{зп}$ , руб.	6 961 608
Амортизационные отчисления $C_A$ , руб.	2 848 280
Затраты на ремонт оборудования $C_P$ , руб.	2 476 000
Отчисления на социальные нужды $C_{отч}$ , руб.	2 784 643
<b>Суммарные эксплуатационные затраты, руб. <math>C_{\Sigma}</math></b>	<b>17 895 811</b>
<b>Схема с оборотом технологической воды</b>	
Стоимость электроэнергии $C_э$ , руб.	2 825 280
Оплата труда $F_{зп}$ , руб.	6 961 608
Амортизационные отчисления $C_A$ , руб.	2 884 280
Затраты на ремонт оборудования $C_P$ , руб.	2 476 000
Отчисления на социальные нужды $C_{отч}$ , руб.	2 784 643
<b>Суммарные эксплуатационные затраты, руб. <math>C_{\Sigma}</math></b>	<b>17 931 811</b>

Результаты расчета энергетической и технико-экономической эффективности рассмотренных схем приведены в сводной таблице 4.18, где

знаками «+» и «-» показан положительный и отрицательный экономический эффект по сравнению с действующей системой водоотлива.

Также стоит отметить, что использование схемы с водосборником в качестве резервуара для технологической вод позволит отказаться от практики подачи очищенной воды в подземный рудник, что составит экономический эффект в размере 780 000 руб/год.

Таблица 4.18 – Сводная таблица годового экономического эффекта

№ п.п	Наименование параметра	Ед. изм.	Показатели
<b>Схема водоотлива с применением ГЭС малой мощности</b>			
Затратная часть			
1	Капитальные затраты	руб.	4 905 250
2	Эксплуатационные затраты	руб.	40 346 993
ИТОГО:			45 252 243
Экономический эффект			
1	Стоимость электроэнергии	руб.	+904 032
2	Оплата труда	руб.	-5 468 256
3	Амортизационные отчисления	руб.	-392 420
4	Затраты на ремонт оборудования	руб.	-226 000
5	Отчисления на социальные нужды	руб.	-2 187 303
ИТОГО:			-7 369 947
<b>Схема с очисткой вод в гидроциклонах</b>			
Затратная часть			
1	Капитальные затраты	руб.	35 603 500
2	Эксплуатационные затраты	руб.	17 895 811
ИТОГО:			53 499 311
Экономический эффект			
1	Стоимость электроэнергии	руб.	+503 160
2	Оплата труда	руб.	+8 140 968
3	Амортизационные отчисления	руб.	-1 243 280
4	Затраты на ремонт оборудования	руб.	+4 424 000
5	Отчисления на социальные нужды	руб.	+3 256 387
ИТОГО:			+15 081 235

№ п.п	Наименование параметра	Ед. изм.	Показатели
<b>Схема с оборотом технологической воды</b>			
Затратная часть			
1	Капитальные затраты	руб.	36 053 500
2	Эксплуатационные затраты	руб.	17 931 811
ИТОГО:			53 985 311
Экономический эффект			
1	Стоимость электроэнергии	руб.	+503 160
2	Оплата труда	руб.	+8 140 968
3	Амортизационные отчисления	руб.	-1 279 280
4	Затраты на ремонт оборудования	руб.	+4 424 000
5	Отчисления на социальные нужды	руб.	+3 256 387
6	Система подачи технологической воды	руб.	+780 000
ИТОГО:			+15 825 235

Исходя из данных, представленных в таблице 4.18 срок окупаемости инвестиций для схемы с очисткой составит 3,6 года, для схемы с оборотом технологической воды – 3,4 года. При этом система рекуперации на базе микроГЭС в условиях шахты «Центральная» не способна окупить себя, что связано, прежде всего, с малым объемом генерации электрической энергии на фоне больших эксплуатационных издержек.

При переходе на разработанные схемы водоотлива необходимо учитывать тот факт, что при строительстве новой системы необходима поддержка работоспособности действующей. Так на рисунке 4.3 показаны пути перехода на разработанные схемы водоотлива.

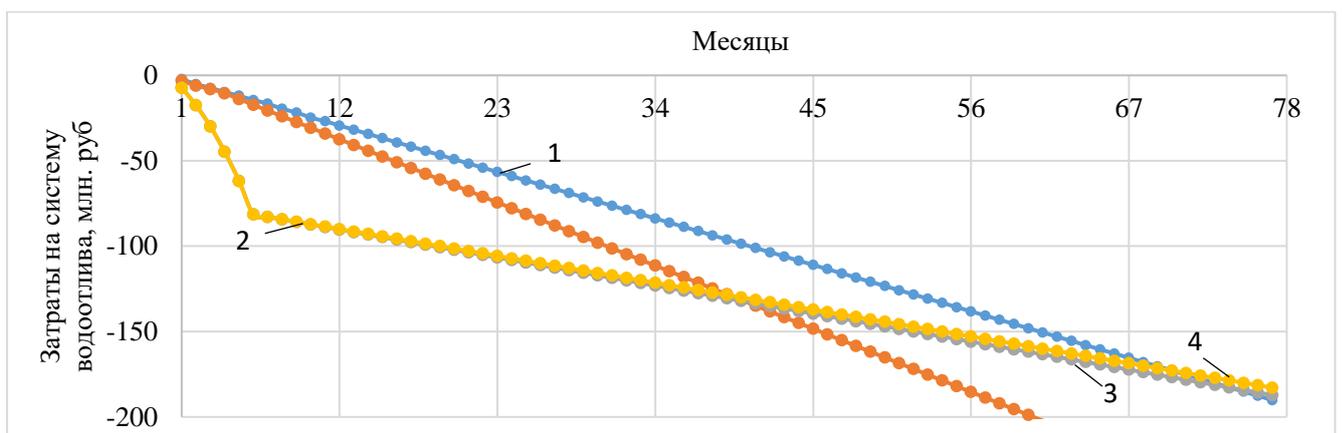


Рисунок 4.3 – Вложения на пути перехода к разработанным схемам водоотлива с поддержанием работоспособности действующей системы: 1–действующая система; 2 – схема водоотлива с применением микроГЭС; 3 – схема с очисткой; 4 – схема с оборотом технологической воды

Анализ рисунка 4.3 позволяет оценить сроки окупаемости процесса плавного перехода с действующей системы водоотлива 1 на разработанные 2-4. Как видно из рисунка, схема на базе микроГЭС на горизонте 6,5 лет в разы превосходит действующую систему по эксплуатационным издержкам, в то время как при переходе на схемы 3 и 4 за время строительства в 6 месяцев требуется большее количество затрат помимо капитальных. Это обусловлено тем, что при переходе на другую схему необходимо поддерживать действующую систему водоотлива в работе чтобы исключить возможность затопления рудника, что составляет порядка 2 млн. руб. в месяц. В таком случае срок окупаемости разработанных схем возрастает до 5,7 лет для схемы с сообщающимися сосудами и до 5,3 лет для схемы на базе использования водосборника в качестве резервуара.

Установлено, что без видоизменения структуры перепускных скважин максимально возможное значение вырабатываемой электрической энергии посредством микроГЭС не превысит  $35\text{кВт}\cdot\text{ч}$ , когда точкой безубыточности в данном случае будет служить величина  $250\text{кВт}\cdot\text{ч}$ , но для достижения такой величины необходим приток воды в размере  $1800\text{м}^3/\text{ч}$  для высоты перепуска 50м или  $1000\text{м}^3/\text{ч}$  для высоты 100м.

#### **Выводы по главе 4**

1. Определено, что требования к системе водоотлива в области перепуска шахтных вод на нижележащие горизонты недостаточно регламентированы, в связи с чем внедрение разработанных схем влечет за собой полное видоизменение перепускной части системы водоотлива;

2. Установлено, что при эксплуатации схемы водоотлива на базе применения эффекта сообщающихся сосудов месторасположение главного водоотливного горизонта необходимо выбирать не только по объему притоков шахтной воды, но и с учетом напора, образуемого в полости перепускных скважин;

3. Произведена технико-экономическая оценка разработанных схем водоотлива для месторождений шахты «Центральная» АО «ЮГК». Результаты технико-экономической оценки показывают, что величина годовой экономии при применении разработанных схем на основе сообщающихся сосудов и с использованием водосборника в качестве резервуара с технической водой

составляет 15 млн. руб. в год, а издержки при эксплуатации схемы с микроГЭС на фоне действующей схемы водоотлива выше на 7,4 млн. руб. в год.

4. Определено, что ввод в эксплуатацию схемы с микроГЭС обеспечит наибольшее сокращение расхода потребляемой энергии на систему водоотлива не менее, чем на 27%, при этом имеет наибольшие эксплуатационные затраты;

5. Определено, что срок окупаемости разработанных схем водоотлива на основе сообщающихся сосудов и с использованием резервуара для технологических нужд в подземном пространстве шахты «Центральная» составит 3,6 и 3,4 года, соответственно;

6. Определена точка безубыточности для системы водоотлива на базе микроГЭС, для этого необходим приток в горные выработки не менее  $1000\text{м}^3/\text{ч}$  для высоты перепуска 100м или  $1800\text{м}^3/\text{ч}$  для высоты 50м, что в условиях шахты «Центральная» обеспечить не представляется возможным;

7. Определен срок окупаемости схем водоотлива на основе сообщающихся сосудов и с использованием резервуара для технологических нужд в условиях строительства и параллельной эксплуатации действующей системы водоотлива, который составляет 5,7 и 5,3 лет, соответственно.

## 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 ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Alatorre-Frenk, C., and Thomas, T. H. "The pumps-as-turbines approach to small hydropower." Proc., 1st World Renewable Energy Congress, Pergamon Press, Oxford, U.K. 1990. Pp. 2914-2922.

2. Barbarelli, S., Amelio, M., & Florio, G. Experimental activity at test rig validating correlations to select pumps running as turbines in microhydro plants. Energy Conversion and Management, 149, 2017. Pp.781–797

3. Bleiwas D.I. Estimates of electricity requirements for the recovery of mineral commodities, with examples applied to sub-Saharan Africa. US Geological Survey, 2011. 108 p.

4. Childs, S. M. "Convert pumps to turbines and recover HP." Hydro Carbon Process. Pet. Refiner, 41(10), 1962. Pp.173–174.

5. Daubree A., Les eaux souterraines a l'époque actuelle, leur regime, leur temperature, leur composition au point de vue du role qui leur revient dans l'economie de l'écorce terrestre, 2 vol. in 8, Paris 1887. 190 p.

6. Dennis, R., Dennis, I., Mokadem, N., & Smit, S. Investigate the possible reduction of mine water ingress by introducing tree plantations: Case study of Cooke 4 Mine (South Africa). Journal of African Earth Sciences. 2019. Pp 148-159.

7. Farley, K.A., Jobbagy, E.G., Jackson, R.B., 2005. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. Global Change Biology, 11: Pp.1565- 1576.

8. Fernandez-Rubio R., Lorca D. F. Mine water drainage // Mine water and the environment. – 1993. – Т. 12. – №. 1. Pp. 107-130.

9. Fernandez-Rubio, R. Mine dewatering under sustainable environmental constraints. Paper presented at the National Conference Publication - Institution of Engineers, Australia, 1(94 /10) 1994. Pp. 9-14.

10. Frasa Consulting Engineers, S.L.. Neves-Carvo Mining-Hydrogeological Report, Portugal. Somincor Internal Report, Madrid. 1987. 221p.

11. Groenewald H. J., van Rensburg J. F., Marais J. H. Maintenance procedure for improved sustainability of DSM pump load shifting projects //2015 International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE). – IEEE, 2015. – Pp. 97-101.
12. Grover, K.M. “Conversion of pumps to turbines.” GSA Inter Corp., New York. 1980. Pp. 129–134
13. Gu, H., Ma, F., Guo, J., Li, K., & Lu, R. Assessment of Water Sources and Mixing of Groundwater in a Coastal Mine: The Sanshandao Gold Mine, China. *Mine Water and the Environment*, 37(2), 2017. Pp. 351–365.
14. Hancock, J. W. “Centrifugal pump or water turbine.” *Pipe Line News*, 6, 1963. Pp. 25–27.
15. Hergt, P., Krieger, P., and Tommes, S. «Die strömungstechnischen Eigenschaften von Kreiselpumpen im Turbinenbetrieb» Pumpentagung Karlsruhe der Fachgemeinschaft Pumpen im VDMA, Germany, 1982. 347p.
16. Hu, Q., and G. D. Willson, 2000: Effect of temperature anomalies on the Palmer drought severity index in the central United States. *Int. J. Climatol.*, 20. Pp.1899–1911
17. Huynen, J.M.H. Underground pumped hydro storage: Flatland Large-scale Electricity Supply Blue Battery 2018. 17 p.
18. Jarvie-Eggart Michelle E. *Responsible Mining: Case Studies in Managing Social & Environmental Risks in the Developed World*. Englewood, Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015. 804 p.
19. Juniewicz, Stanislaw, Goreck, Teresa, Tomaszewski, Jan B. New Trends in the Development of Pumped-storage Power Stations in Poland. // 1983 *Gospodarka Wodna* 43(2). Pp. 47-49
20. Karem, W. A., Kalinski, M. E., & Hancher, D. E. Settlement of Mine Spoil Fill from Water Infiltration: Case Study in Eastern Kentucky. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 21(5), 2007, Pp. 345–350.
21. Lo Russo, S. Email Author, Gnavi, L., Peila, D., Suozzi, E. Rough evaluation of the water-inflow discharge in abandoned mining tunnels using a simplified water

balance model: The case of the Cogne iron mine (Aosta Valley, NW Italy) (2013) *Environmental Earth Sciences*, 70 (6). Pp. 2753-2765.

22. Lydon, T., Coughlan, P., & McNabola, A. Pump-As-Turbine: Characterization as an Energy Recovery Device for the Water Distribution Network // *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(8), 04017020.

23. Mengistu H., Tessema A., Abiye T., Demlie M., Lin H. Numerical modeling and environmental isotope methods in integrated mine-water management: a case study from the Witwatersrand basin, South Africa // *Hydrogeology Journal* Volume 23, Issue 3, 1 May 2015. Pp. 533-550

24. Narasimhan, B., & Srinivasan, R. (2005). Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agricultural and Forest Meteorology*, 133(1-4). Pp. 69–88.

25. Neuzil, C. E.. Groundwater Flow in Low-Permeability Environments. *Water Resources Research*, 22(8), 1986. Pp.1163–1195.

26. Pei, Y. The main hydrogeological characteristics of mineral deposits in China // *Third International Mine Water Congress. AIMM. 1988. Pp. 93-101.*

27. Pitman, A. J. The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. *International Journal of Climatology*, 23(5). 2003 Pp. 479–510.

28. Power, C., McNabola, A., and Coughlan, P. (2014). “Development of an evaluation method for hydropower energy recovery in wastewater treatment plants: Case studies in Ireland and the U.K.” *Sustainable Energy Technol. Assess.*, 7. Pp. 166–177.

29. Radchenko, D., Bondarenko, A. Mining engineering system as an energy asset in industry 4.0 // *E3S Web of Conferences*. 2018. 58,01009

30. Ridgway, S.L., Dooley, J.L., Hammond, R.P. Underground storage of off-peak power // *IEE Conference Publication* (171), 1979, Pp. 227-231

31. Robert N. Torbin. Alternate Methods of Energy Recovery for the Mining Industry // *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 25, NO. 5, SEP'TEMBEWOCTOBER 1989*

32. 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 Conference. 2020.
33. Schmiedl, E. Serien-Kreiselpumpen im Turbinenbetrieb, Pumpen tagung Karlsruhe, Germany, 1988
34. Sharma, K. “Small hydroelectric project-use of centrifugal pumps as turbines.” Technical Rep., Kirloskan Electric, Bangalore, India, 1985
35. Stepanoff, A. J. Centrifugal and axial flow pumps, design and applications, Wiley, New York, 1957.
36. Van der Wateren W., Joubert H. P. R., Kleingeld M. Optimising energy recovery in mine dewatering systems // 2018 International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE). – IEEE, 2018. Pp. 1-8.
37. Van der Zee, L. F., Pelzer, R., & Bolt, G. Quantification of optimal electricity cost risk reduction for a South African gold mining company. // International Conference on the Eleventh Industrial and Commercial Use of Energy. 2014. Pp. 113-118
38. Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7)
39. Walder, J., and A. Nur, Porosity reduction and crustal pore pressure development, *Geophys. Res. Lett.*, 11(13), 1984. Pp. 11539-11548.
40. Yihdego, Y. Engineering and enviro-management value of radius of influence estimate from mining excavation // *Journal of Applied Water Engineering and Research* Volume 6, Issue 4, 2 October 2018. Pp. 329-337
41. Yihdego, Y., & Nzikou, M. M. Application of Airborne Geophysics and Geochemistry to Characterize Groundwater Flow Path. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2017. Pp. 241-252
42. Александров В.И., Авксентьев С.Ю., Махараткин П.Н. Энергоэффективность систем шахтного водоотлива – Текст : непосредственный // *ГИАБ №2*. – М. : Горная книга, 2017.– С. 253-268

43. Батунер, Л.М. Математические методы в химической технике – Текст : непосредственный //учеб. Л.М. Батунер, М.Е. Позин; Химия, 5-е изд.; М. : 1968. – 823 с.
44. Белых Б.П. Свердель И.С., Олейников В.К. Электрические нагрузки и электропотребление на горнорудных предприятиях. М.: Недра, 1971. С.125.
45. Бронштейн Л.Я., Герман А.Н., Гольдин В.Е. и др. Справочник конструктора гидротурбин. Ленинград: «Машиностроение», – 304 с.
46. ВНТП 13-2-93 Нормы технологического проектирования горнодобывающих предприятий металлургии с подземным способом разработки
47. Волков В. В., Сташинов Ю. П., Боченков Д. А. Комбинированный энергосберегающий способ регулирования режима работы шахтной водоотливной установки // ГИАБ. 2009. №12. С. 71-76
48. Гидроциклоны для промышленной очистки воды. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://yamit-eli.ru/gidrotsiklony.html>. Дата обращения: 28.10.2020
49. Долганов А.В., Великанов В.С. Особенности износа деталей насосов при эксплуатации карьерного водоотлива // Добыча, обработка и применение природного камня: сб. науч. трудов Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. С. 125-131
50. Енергетичний аудит вугільних підприємств: інструкція: СОУ 101.00174094.001–2004.— К.: Мінвуглепром України, 2004. – 34 с.
51. Зарукин Г.В. Износ деталей шахтных насосов при транспортировании шлама из водосборников // Горное дело: сб. научн. трудов ВНИИЦветмет – Недра. 1972. – С. 114-118.
52. Зубков А.А., Багров В.В., Шулена З.М. Снижение загрязнения окружающей среды на базе совершенствования технологии переработки руд и обезвреживания сточных вод от соединений металлов // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2017. № 6 (114). – С. 26-33.
53. Каплунов Д.Р., Лейзерович С.Г., Томаев В.К. Энергопроизводство при подземных закладочных работах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 4. – С. 62-67.

54. Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н. Выработанные пространства недр: принципы многофункционального использования в полном цикле комплексного освоения месторождений твердых полезных ископаемых // Горный журнал. 2016. № 5. – С. 28-33.

55. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Возобновляемые источники энергии как георесурс в системе техногенного преобразования недр // Горный журнал. 2015. № 9. – С. 72-75.

56. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Проблема использования возобновляемых источников энергии в ходе разработки месторождений твердых полезных ископаемых // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 1. – С. 88-96.

57. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Экс В.В. Основные направления и перспективы развития энергоэффективных и экологически безопасных геотехнологий при разработке месторождений на больших глубинах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 6. – С. 5-10.

58. Каплунов Д.Р., Юков В.А. Энергосбережение в процессах подземной добычи медных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень 2016. № S4. – С. 5-17.

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

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

61. Князькин Е.А. Обоснование структуры горнотехнической системы в связи с внутрирудничной генерацией электроэнергии от технологических гидросмесей // Комбинированная геотехнология: переход к новому

технологическому укладу: Материалы докладов международной конференции. Тезисы. – Магнитогорск: МГТУ, 2019. – С. 78–79.

62. Князькин Е.А. Обоснование структуры горнотехнической системы с возможностью преобразования потенциальной энергии переточных шахтных вод рудника в электрическую // По материалам X Международной конференции «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу». – Магнитогорск: МГТУ, 2019. – С. 282–287.

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

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

65. Князькин Е.А., Бедретдинов Р.Ш. Энергоэффективная схема водоотлива с комплексным использованием энергии гидротоков и наполнением подземных резервуаров для пожаротушения // Материалы II Всероссийской научно-практической конференции «ЗОЛОТО. ПОЛИМЕТАЛЛЫ. XXI ВЕК». – 2020. – С. 41-43.

66. Князькин Е.А., Бондаренко А.А. Повышение энергоэффективности горнотехнических систем при комплексном освоении месторождений в условиях севера // Наука и инновационные разработки – Северу: II Международная научно-практическая конференция, «Наука и инновационные разработки-Северу»: сборник материалов конференции в 2-х частях, часть I. — Мирный: Издательство, Мирнинская городская типография. 2019. – С. 139-142

67. Князькин Е.А., Туркин И.С. Исследование параметров процессов и условий рекуперации энергии гидротоков в условиях подземных месторождений // По материалам VI Международной научно-технической конференции «Решение

технологических и экологических проблем горных производств на территории России, ближнего и дальнего зарубежья». – Москва, 2019. – С. 114-116.

68. Кондрина Д. Е., Наумова О.В. Энергоаудит промышленных предприятий // Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения Материалы IX Национальной конференции с международным участием. Под ред. Ф.К. Абдразаков. 2019. – С. 148-151.

69. Корпачев В.П., Сизов Б.Г., Иванов В.Г., Губин И.В. Основы гидравлики: учебное пособие для студентов. – Красноярск: СибГТУ, 2011. – 266 с.

70. Кузьмин Е.В., Баранов А.В. Освоение автоматически управляемых комплексов при добыче кимберлитовых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № S1. – С. 355-361.

71. Кузьмин Е.В., Хрулев А.С., Савич О.И., Карпухин А.Н. Перспективы создания подземных камер-хранилищ в отложениях погребенного пластового льда полуострова Ямал // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 1. – С. 331-336.

72. Лавров Н.П., Логинов Г.И. Проектирование гидросооружений деривационной ГЭС и подбор основного силового оборудования: Методические указания к курсовому и дипломному проектированию. – Бишкек: КРСУ, 2008. – 112 с.

73. Лезнов Б.С. Экономия электроэнергии в насосных установках. М.: Энергоатомиздат, 1991. – 143 с.

74. Ляхомский А.В., Фомин В.В. Моделирование электропотребления технологических переделов железорудных горно-обогатительных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень 2011. № S4. – С. 53-61.

75. Малышев В.Н., Орфеев Ю.В., Шарапов В.И. Особенности износа насосов 12МСГ-7 и пути повышения их долговечности // Сб. научн. тр. ВНИИГидроуголь. Новокузнецк. 1972. Вып. 26. – С. 14-20

76. Менжулин М.Г., Юровских А.В. Влияние естественной и наведенной трещиноватости на взрывное разрушение и предразрушение горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2004. №1. – С.90-94.

77. Мингажев М.М. Совершенствование технологии водоотведения при подземной разработке медно-колчеданных месторождений системами с твердеющей закладкой // дисс. раб. на соискание уч. степ. канд. техн. наук. Специальность: 25.00.22 – «Геотехнология (подземная, открытая и строительная)» Магнитогорск. 2012. –163 с.

78. Ог. Э. Геология. Геологические явления. Том первый. НКТП. Государственное научно-техническое горно-геологическое издательство. Москва 1932. – 564 с.

79. Олизаренко В.В. Влияние горно-геологических и технологических факторов на эффективность работы шахтного водоотлива / В.В. Олизаренко, А.В. Долганов // Материалы 66-й научно-технической конференции: сб. докл. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «УЛГУ», 2008. – С. 54-58.

80. Олизаренко В.В., Зубков А.А., Аллабердин А.Б. Определение водопритоков в карьер "Юбилейный" и разработка конструкций водосборного и осветляющего устройств //Проблемы гуманитарных наук и образования в современном мире. сборник научных статей по материалам V Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). 2019. С. 111-113.

81. Олизаренко В.В., Мингажев М.М. Рудничный водоотлив при отработке медно-колчеданных месторождений Южного Урала. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. – 252 с.

82. Опарин В.Н., Тапсиев А.П., Богданов М.Н. и др. Современное состояние, проблемы и стратегия развития горного производства на рудниках Норильска / Рос. акад. Наук, Сиб. отделение, Ин-т горного дела. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. –372 с.

83. Паламарчук Н.В. Выбор износостойких материалов для деталей шахтных насосов // Уголь Украины. 2001. №11-12. – С.62-64.

84. Паламарчук Н.В., Ковалев Ю.Г. Причины отказов шахтных насосов и базовые причины повышения их надежности // Уголь Украины. 1994. №7. – С. 23-30.

85. Патент № 2454568 Российская Федерация, МПК F04D 15/00 (2006.01), E02D 19/10 (2006.01). Система водоотлива горного предприятия : № 2011111680/06 : заявл. 28.03.2011 : опубл. 27.06.2012. / Волков В.В., Волков Д.В., Сташинов Ю.П. – 4 с. : ил. – Текст : непосредственный.

86. 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.

87. Попов В.М. Водоотливные установки. Справочное пособие. М.: Недра, 1990, – 254 с.

88. Попов, В. М. Промышленные испытания мощных водоотливных установок в условиях обводненных рудных месторождений / В. М. Попов, Д. Е. Санин // Изв. вузов. Горный журнал. 1977. № 6. С. 48.

89. Попов, В. М. Рудничные водоотливные установки / В. М. Попов. – М.: Недра, 1983. – 304 с.

90. План развития горных работ на 2019 год по шахте Центральная Проектная документация АО «ЮГК» Пласт. 2018. – 241 с.

91. Рипп. М.Г., Петухов, А.И., Миошник А.М. Рудничные вентиляторные и водоотливные установки. Недра. Москва. 1968. – 296 с.

92. Руководство по составлению проектов противопожарной защиты рудных шахт // Министерства промышленности и энергетики РФ, М.: ООО «полиМЕдиа», 2004. – 172с.

93. Рухлова Н. Ю. О проблеме эффективного электропотребления главным водоотливом шахты // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2012. – №. 89. – С. 141-145.

94. Рыльникова М.В., Гаджиева Л.А., Князькин Е.А. Определение масштабов подсистемы возобновляемой энергетики подземного рудника в зависимости от

гидрогеологических условий месторождения // Материалы 14-й Международной научной школы молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых». – Москва, 2019. – С. 221–223.

95. Рыльникова М.В., Галченко Ю.П. Возобновляемые источники энергии при освоении земных недр. М.: ИПКОН РАН, 2015. – 122с.

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

97. Рыльникова М.В., Струков К.И., Олизаренко В.В., Туркин И.С. Перспективы применения и оценка параметров энергоэффективных геотехнологий при комплексном освоении месторождений // Горный журнал. 2017. № 11. – С. 71-76.

98. Рыльникова М.В., Струков К.И., Туркин И.С. Исследование энергии потоков гидросмесей для электроснабжения рудника при экологически сбалансированном освоении недр // В сборнике: Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2018 сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. под ред. Л. И. Лукиной, Н. А. Бежина, Н. В. Ляминой. 2018. – С. 1023-1027.

99. Смирнов И. Н. Гидравлические турбины и насосы. Учеб. пособие для энерг. и политехнич. вузов. М. «Высш. школа», 1969. – 400 с.

100. СП 103.13330.2012 Защита горных выработок от подземных и поверхностных вод. Актуализированная редакция СНиП 2.06.14-85

101. СТО 70238424.27Л 40.011-2010. Гидроэлектростанции условия создания нормы и требования. НП «ИНВЭЛ». Дата введения 2010-09-30

102. Струков К.И. Обоснование параметров горнотехнических систем на завершающей стадии подземной разработки жильных золоторудных месторождений Урала [Текст] // дисс. раб. на соискание уч. степ. докт. техн. наук, специальности: 25.00.21 – «Теоретические основы проектирования

горнотехнических систем» 25.00.22 – «Геотехнология (подземная, открытая и строительная)» Москва. 2018. – 311 с.

103. Струков К.И., Князькин Е.А., Туркин И.С. Принципы проектирования рудников с учетом возможности генерации электроэнергии за счет энергии свободных потоков гидросмеси // 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.

104. Струков К.И., Князькин Е.А., Туркин И.С. Энергия шахтной воды как дополнительный источник питания системы электроснабжения подземных рудников золоторудных месторождений // По материалам международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность». – Севастополь, 2019. – С. 1573–1576.

105. Суярко В.Г. Геохимия подземных вод восточной части Днепровско-Донецкого авлакогена // ХНУ им. В.Н. Каразина, Харьков. 2006. – 225 с.

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

107. Федеральная служба государственной статистики (Росстат). [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.gks.ru/enterprise\\_industrial](https://www.gks.ru/enterprise_industrial). Дата обращения 21.04.2020.

108. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых», утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 8 декабря 2020 года N 505, зарег. Минюстом России 21.12.20 г.;

109. Федеральный закон от 11.08.2008 № 123-ФЗ (ред. от 27 декабря 2018 года) «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» //

«Собрание законодательства Российской Федерации», N 30, 28.07.2008, (ч.1), ст. 3579

110. Хаджиков Р.Н. Горная механика. Издание 5. М.: Недра, 1973. – 424 с.

111. Шевяков Л. Д., Бредихин А. Н. Шахтный водоотлив: учебное пособие для вузов. 5-е изд., перераб Москва : Росгортехиздат, 1960. – 354 с.

112. Шуленина, З. М. Вода техногенная: проблемы, технологии, ресурсная ценность / З. М. Шуленина, В. В. Багров, А. В. Десятов и др. - Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. – 401 с.

113. Щулькин Е.П., Кузнецов Н.С. и др. Отчет Увельского ГСО о результатах геологической съемки масштаба 1: 50 000 листа N-41-50-Б и геологического доизучения масштаба 1: 50 000 листов N-41-51-А, N-41-62-Б, Г, N-41-63-А-а, в, N-41-74-Б-а, б, проведенных в 1980-1986 гг в Чебаркульском, Еткульском, Увельском и Троицком районах и территории г. Пласт Челябинской области. 1986г. ФГУ «ЧелТФГИ». – 2473 с.