

Министерство образования и науки Украины
Государственное высшее учебное заведение
"Национальный горный университет"

На правах рукописи

Рухлова Наталья Юрьевна

УДК 622.5:621.3.072.8

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ
ГЛАВНОГО ВОДООТЛИВА УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ
В РЕЖИМЕ ПОТРЕБИТЕЛЯ-РЕГУЛЯТОРА**

Специальность:

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, про-
фессор

Разумный Юрий Тимофеевич

Днепропетровск – 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
РАЗДЕЛ 1	
СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ	
ИССЛЕДОВАНИЙ	
1.1 Содержание проблемы неравномерности электропотребления.....	12
1.2 Возможности функционирования угольной шахты в режиме потребителя-регулятора.....	14
1.3 Роль шахтного водоотлива в регулировании режимов электропотребления.....	16
1.4 Выводы и постановка задач исследования	29
 РАЗДЕЛ 2	
АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ	
ГЛАВНОЙ ВОДООТЛИВНОЙ УСТАНОВКИ	
2.1 Параметры водосборника главной водоотливной установки	31
2.2 Анализ неравномерности объемов ветвей водосборника главного водоотлива.....	32
2.3 Анализ параметров трубопроводной сети главной водоотливной установки.....	40
2.3.1 Влияние технического состояния насосов на работу водоотливной установки.....	42
2.3.2 Влияние технического состояния трубопроводов на работу водоотливной установки	43
2.3.3 Совместное влияние технического состояния насосов и трубопроводов на работу водоотливной установки	46
Выводы.....	47

РАЗДЕЛ 3

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЛАВНОГО ВОДООТЛИВА В РЕЖИМЕ

ПОТРЕБИТЕЛЯ-РЕГУЛЯТОРА.....	49
3.1 Принципы регулирования режимов электропотребления шахтного водоотлива.....	49
3.2 Алгоритм функционирования главной водоотливной установки в режиме потребителя-регулятора.....	51
3.3 Результаты моделирования режимов электропотребления.....	70
3.4 Зависимость эффективности работы главной водоотливной установки от технического состояния ее основного оборудования.....	73
3.5 Оценка влияния трубопроводов на эффективность регулирования электропотребления главной водоотливной установки	80
3.6 Энергоэффективное управление главной водоотливной установкой.....	83
Выводы.....	86

РАЗДЕЛ 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЛАВНОГО ВОДООТЛИВА В РЕЖИМЕ

ПОТРЕБИТЕЛЯ-РЕГУЛЯТОРА.....	88
4.1 Определение областей энергоэффективного использования главной водоотливной установки в режиме потребителя-регулятора.....	88
4.2 Влияние рабочего объема водосборника на технико-экономические показатели работы главной водоотливной установки.....	99
4.3 Определение границ энергоэффективного использования главной водоотливной установки в режиме потребителя-регулятора.....	106
Выводы.....	110

РАЗДЕЛ 5

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГЛАВНОЙ ВОДООТЛИВНОЙ УСТАНОВКИ В РЕЖИМЕ ПОТРЕБИТЕЛЯ-РЕГУЛЯТОРА.....	112
5.1 Достоверность результатов моделирования режимов работы главного водоотлива угольной шахты.....	112
5.2 Экономическая оценка результатов исследований энергоэффективности работы главной водоотливной установки.....	116
5.2.1 Снижение оплаты за электроэнергию при функционировании главной водоотливной установки.....	117
5.2.2 Снижение расхода топлива на тепловых электростанциях.....	126
Выводы.....	128
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	129
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	133
ПРИЛОЖЕНИЯ	144

ВВЕДЕНИЕ

Повышение энергоэффективности работы главного водоотлива угольной шахты связано с необходимостью использования его в процессе реализации общенациональной задачи, направленной на снижение неравномерности электропотребления. Актуальность данной задачи подтверждается данными "Энергетичної стратегії України на період до 2030 р.", в которой предусматриваются разработки комплексной программы энергосбережения для снижения потребления электроэнергии на угольных шахтах, в том числе работающих в режиме водоотлива.

Режимы неравномерной нагрузки крайне невыгодны как в энергетическом, так и в экономическом отношении. Такие режимы увеличивают расход топлива на тепловых электростанциях (ТЭС), снижают ресурс их надежной работы, а также создают неустойчивый режим работы атомных электрических станций, увеличивают потери электроэнергии в линиях электрических передач.

Одним из этапов решения проблемы неравномерности электропотребления является использование энергоемких установок, таких как шахтный водоотлив, в режиме потребителя-регулятора (П-Р). Эффективное использование которых отразится положительно на работе не только энергосистемы, но и конкретно предприятия в целом.

Функционирование главной водоотливной установки угольной шахты в режиме потребителя-регулятора предусматривает применение регулирования режимов электропотребления (РРЭ), которое направлено на определение графика работы установки во внепиковый период. Исключение работы насосов в периоды максимальных нагрузок в энергосистеме сопровождается, как правило, использованием дополнительно резервного оборудования (насосов и трубопроводов) для откачивания накопленной воды и текущего притока в другие периоды. Использование при этом дифференцированного по периодам суток тарифа приводит к ожидаемому снижению стоимости потребляемой электроэнергии, однако сопровождается увеличением удельного расхода электроэнергии

при интенсивной откачке воды. Следовательно, выбор режима работы водоотлива с минимальным удельным расходом электроэнергии отразится на топливно-энергетических показателях работы энергосистемы, в частности на снижении удельного расхода топлива на ТЭС для покрытия максимальных нагрузок.

Эффективность регулирования режимов электропотребления, а именно технико-экономические показатели работы водоотлива, зависят от технических и технологических условий, которыми являются техническое состояние основного оборудования (насосов, трубопроводов и водосборников) и достаточный для накопления воды в период максимальных нагрузок объем водосборника. Снижение рабочих параметров данного оборудования способствует ухудшению технико-экономических показателей работы водоотлива при регулировании режимов электропотребления.

Исследование задачи повышения энергоэффективности работы шахтного водоотлива в режиме потребителя-регулятора является *актуальным*, поскольку направлено на минимизацию расхода энергоресурсов при максимально возможном снижении стоимости потребляемой электроэнергии.

Значительный вклад в решение вопросов эффективной работы шахтного водоотлива при регулировании режимов электропотребления внесли известные ученые и специалисты в горнодобывающей отрасли и в отрасли электроэнергетики, а именно: Антонов Э.И., Герасимович В.Н., Гордеев В.И., Грядущий Б.А., Данильчук Г.И., Дегтярев В.В., Заика В.Т., Коптиков В.П., Мнухин А.Г., Мялковский В.И., Наннес Ю.В., Находов В.Ф., Недолужко В.Н., Праховник А.В., Разумный Ю.Т., Розен В.П., Хронусов Г.С., Червонный Е.Н., Шевчук С.П., Ященко А.М. и другие. Фундаментальный вклад в изучение проблем шахтного водоотлива сделали ученые НИИГМ им. М.М. Федорова и МакНИИ.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнялась в рамках научно-исследовательских госбюджетных тем: "Розробка ресурсо- і енергозберігаючих технологій та устаткування підприємств гірничо-металургійного і паливно-енергетичного комплексу України" (номер гос. реєстр. 0109U002809); "Високоєфективне використання енергетичного потенці-

алу геотехнічних систем України: ресурси, енергозберігаючі технології, екобезпека" (номер гос. реєстр. 0109U005905); научно-исследовательской работы "Мероприятия по совершенствованию режимов работы систем электроснабжения шахт ПАО "ДТЭК Павлоградуголь" (на примере западного куста шахт)"; а также в соответствии с материалами "Енергетичної стратегії України на період до 2030 р."

Научная задача диссертационной работы заключается в комплексной оценке влияния изменяющихся технических и технологических параметров состояния и режимов работы главной водоотливной установки на энергоэффективность ее функционирования в режиме потребителя-регулятора.

Цель и задачи исследований. *Целью диссертационной работы* является снижение удельного расхода электроэнергии в режиме интенсивной откачки воды для повышения энергоэффективности работы главного водоотлива угольной шахты.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

1. Выполнить анализ технологических параметров водосборников главной водоотливной установки для определения целесообразности ее использования в качестве потребителя-регулятора (П-Р) и обосновать необходимость изменения объема водосборника для повышения эффективности регулирования электропотребления.

2. Разработать способ определения необходимого объема водосборника с учетом его заиления, количества ветвей и их неравенства по вместимости, что позволит обеспечить снижение электропотребления в системе водоотлива путем отключения насосов в часы максимума нагрузки в энергосистеме независимо от графика чистки ветвей водосборника.

3. Разработать алгоритм выбора количества одновременно работающих насосов в соответствующие периоды суток при применении дифференцированного по времени суток тарифа на электроэнергию с учетом рабочих параметров

насосов по обобщенным критериям для любых технологических условий функционирования главной водоотливной установки.

4. Определить области энергоэффективного использования главной водоотливной установки в режиме потребителя-регулятора.

Идея диссертационной работы заключается в учете изменяющихся технических и технологических параметров для определения области эффективной работы главной водоотливной установки в режиме потребителя-регулятора.

Объект исследования – процессы электропотребления главной водоотливной установки шахты.

Предмет исследования – закономерности влияния изменяющихся технических и технологических параметров состояния главного водоотлива на энергоэффективность его функционирования в режиме потребителя-регулятора.

Методы исследования: метод машинного эксперимента, основанный на имитационном моделировании режимов работы главного водоотлива; математическое моделирование на основе формализации технологического процесса откачки воды и построения частных математических моделей; методы матричного исчисления для представления и обработки сформированных массивов технологических и энергетических параметров; математические методы решения кубических уравнений; вариационное исчисление.

Научная новизна полученных результатов.

Научные положения, выносимые на защиту, их новизна:

1. Эффективность регулирования режимов электропотребления главной водоотливной установки шахты обеспечивается достаточным объемом водосборника, который является нелинейной убывающей функцией количества ветвей и с его увеличением асимптотически приближается к минимальному значению, определяемому произведением наибольшей длительности периода пиковых электрических нагрузок в энергосистеме, коэффициента заилиения ветвей водосборника и максимального часового притока воды в шахту.

2. Среднесуточный удельный расход электроэнергии на откачку воды возрастает при регулировании режимов электропотребления многоагрегатной

главной водоотливной установки шахты по критерию минимальных денежных затрат на оплату потребляемой электроэнергии и является полиномиальной функцией технических и технологических параметров состояния водоотлива.

Научная новизна результатов исследования:

1. Разработана имитационная модель, которая в отличие от известных позволяет определить энергоэффективный режим функционирования главной водоотливной установки шахты на основе формирования множества вариантов работы насосов для любых технологических параметров водоотлива, включая ухудшение технического состояния основного оборудования, и выбора режима работы по критерию минимального удельного расхода электроэнергии при условии минимизации денежных затрат на оплату электропотребления.

2. Получены неизвестные ранее полиномиальные функциональные зависимости третьего и четвертого порядка между среднесуточным удельным расходом электроэнергии на откачку воды и техническими параметрами состояния насосов и нагнетательных трубопроводов соответственно, которые позволяют использовать их в системе мониторинга технического состояния основного оборудования водоотлива.

3. Выявлена полиномиальная зависимость среднесуточного удельного расхода электроэнергии на откачку воды от суммарной производительности одновременно работающих насосов главного водоотлива шахты при регулировании режимов электропотребления, что предоставляет возможность определения областей эффективной параллельной работы системы "насос-трубопровод".

4. Установлено, что среднесуточный удельный расход электроэнергии на откачку воды при регулировании режимов электропотребления главной водоотливной установки не увеличивается при условии использования резервного трубопровода и часового водопритока, не превышающего рабочей производительности одного насоса.

Практическое значение полученных результатов состоит в обосновании предлагаемых способов повышения энергоэффективности работы главной водоотливной установки угольной шахты в режиме потребителя-регулятора.

1. Разработан способ определения достаточного для эффективного регулирования электропотребления объема водосборника, который отличается учетом количества и неравности его ветвей по вместимости и наибольшей длительности периода пиковых электрических нагрузок в энергосистеме, что позволяет уменьшить общий объем водосборника до 15 %.

2. Предложен способ мониторинга параметров главной водоотливной установки угольной шахты, который заключается в контроле удельного расхода электроэнергии на откачку воды для своевременного определения изменения технического состояния основного оборудования водоотлива.

3. Технически обосновано использование резервного трубопровода при эффективном регулировании режимов электропотребления главного водоотлива, что позволяет уменьшить прирост среднесуточного удельного расхода электроэнергии на откачку воды до 7 % по сравнению с условием использования только рабочих трубопроводов в зависимости от водопритока.

Полученные в диссертационной работе результаты внедрены в НПЦ "ДТЭК" при проектировании и реконструкции главных водоотливных установок; на шахте "Благodatная" ПАО "ДТЭК Павлоградуголь" при регулировании режимов электропотребления главного водоотлива и используются в учебном процессе ГВУЗ "НГУ" при подготовке специалистов по направлениям "Электротехника и электротехнологии" и "Электромеханика".

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, предложенных в работе, подтверждается корректностью используемой методики и принятых допущений при разработке математических моделей для определения рабочих параметров насосов; применением проверенных положений теории электрических нагрузок относительно метода технологического графика, как одного из самых точных при определении общего и удельного расходов электроэнергии; корректностью принятых допущений и исходных данных при имитационном моделировании режимов работы главной водоотливной установки; результатами сопоставления расчетных и фактических параметров работы насосов; позитивным опытом внедрения полученных результатов.

Личный вклад соискателя состоит в постановке задач исследований, получении научных результатов и выполнении теоретической и практической части работы.

Личный вклад соискателя в работы, написанные в соавторстве: выполнен анализ технологических параметров водосборников существующих шахт, получены зависимости относительного объема ветвей от их количества – [59, 60], выполнена оценка несоответствия технологических параметров водосборников шахт существующим нормам и целесообразность выравнивания объемов ветвей для эффективного регулирования режимов электропотребления – [62], предложен алгоритм определения количества одновременно работающих насосов во внепиковый период, при условии отключения их в период максимальных нагрузок в энергосистеме, с учетом рабочих параметров параллельно работающих агрегатов – [72], предложен алгоритм формирования возможных режимов работы водоотлива с возможным учетом влияния технического состояния насосов и трубопроводов, определение режима с минимальным удельным расходом электроэнергии при условии минимальной оплаты за ее потребление, а также осуществления по нему функций управления – [81, 83].

Апробация результатов диссертации. Основные материалы и результаты, полученные в диссертационной работе, докладывались и получили одобрение на Международной научно-технической конференции "Форум горняков" (г. Днепропетровск, 2013 г., 2014 г.); I Международной научно-технической конференции преподавателей, аспирантов и студентов "Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об'єктів" (г. Донецк, 2013 г.).

Публикации. Научные результаты диссертации опубликованы в двенадцати научных изданиях (из них пять самостоятельно), в том числе в пяти статьях в специализированных научных изданиях Украины (две из них в издании, которое индексируется в международной реферативной наукометрической базе научной периодики SciVerse Scopus), в одной статье в международном издании, в трех статьях в сборниках научных трудов международных тематических конференций, а также три публикации в официальном бюлетне "Промислова власність".

РАЗДЕЛ 1

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Содержание проблемы неравномерности электропотребления

Повышение энергоэффективности работы главного водоотлива угольных шахт как потребителя-регулятора потребляемой электроэнергии из энергосистемы неразрывно связано с проблемой неравномерности электропотребления. Проблема неравномерности электропотребления обусловлена свободным режимом потребления электроэнергии, т. е. имманентным – присущим природе самого предмета исследования. Свойство электроэнергии не представляет возможности накопления в достаточном для потребителя объеме, что приводит к одновременности процесса производства и потребления электроэнергии.

Отсутствие достаточного количества маневренных мощностей гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС), гидроэлектростанций (ГЭС), газотурбинных установок (ГТУ) привело к необходимости использования ТЭС для покрытия пиковых нагрузок, процесс работы которых в данном режиме является неэкономичным [1, 2].

Режимы неравномерной нагрузки крайне невыгодны как в энергетическом, так и в экономическом отношении. Такие режимы увеличивают расход топлива на ТЭС, снижают ресурс их надежной работы, а также создают неустойчивый режим работы атомных электрических станций, увеличивают потери электроэнергии в линиях электрических передач.

Учитывая эти обстоятельства Национальная академия наук Украины сообщает, что "... продолжительная эксплуатация застаревших ТЭС в маневренном режиме угрожает выходу из строя энергосистемы Украины" [3].

При изменении нагрузки на величину ΔP в течение времени $t_1 - t_2$ изменение расхода топлива можно записать так [1]:

$$\Delta G = \int_{t_1}^{t_2} \varphi \Delta P(t) dt, \quad (1.1)$$

где φ – относительный прирост расхода топлива – первая производная расхода топлива по нагрузке или увеличение расхода топлива при изменении нагрузки на единицу. Этот показатель изменяется в зависимости от нагрузки. При переходе ТЭС из базового режима работы в полупиковый и дальше в пиковый мощность станции увеличивается и соответственно расходуется дополнительное количество топлива, необходимое для обеспечения нагрузки, превышающей базовую.

По весьма осторожным оценкам суммарный суточный рост удельного расхода топлива составляет от 15 г у.т./кВт·ч до 25 г у.т./кВт·ч и более в зависимости от времени года. С учетом участия до 50% ТЭС в регулировании режимов общий расход топлива увеличивается соответственно от 500 тыс. т у.т./год до 850 тыс. т у.т./год. В соответствии с Энергостратегией Украины на период до 2030 г (далее Энергостратегия) [4] удельный расход условного топлива на выработку 1 кВт·ч в 2009 г составил 396 г у.т., а прогнозные значения на 2015 г – 395 г у.т./кВт·ч. По состоянию 2010 г энергетические установки Германии расходуют 310–330 г у.т./кВт·ч. По указанным соображениям и другим составляющим показатель энергоемкости ВВП в Украине в 2010 г составил 0,55 т у.т. на 1000 дол. Аналогичный показатель ВВП в Германии составил 0,15 т у.т., в Польше – 0,19, в России – 0,44, что соответственно меньше чем в Украине в 3,7; 2,9; 1,25 раза.

Решение проблемы неравномерности ГЭН возможно путем огромных капиталовложений на создание гидроаккумулирующих или (и) газотурбинных электрических станций в энергосистеме. Однако для сооружения ГАЭС необходимо располагать перепадом геодезических отметок поверхности земли не менее 100 м, которые на Украине отсутствуют. ГТУ требуют наличие горючих газов, главным образом, природного газа с которым Украина имеет проблемы.

Для стимулирования промышленных предприятий Национальной комиссией, осуществляющей государственное регулирование в сферах энергетики и коммунальных услуг (НКРЭКУ) разработаны дифференцированные тарифы по периодам суток с применением тарифных коэффициентов, которые позволяют снизить оплату за электроэнергию путем использования потребителей-регуляторов, что содействует снижению неравномерности графика электрических нагрузок (ГЭН) и отразится, в свою очередь, на величине общего удельного расхода топлива на ТЭС.

Постановлением № 37 от 22.01.2015 г НКРЭКУ установила новые значения тарифных коэффициентов при расчетах стоимости электроэнергии по дифференцированному тарифу: для пика – 1,8, полупика – 1,02, ночного провала – 0,25 взамен от ранее действующих соответственно 1,68; 1,02; 0,35 (№ 1262 от 04.11.2009 г). Данные изменения тарифных коэффициентов произошли в следствии дефицита электроэнергии в энергосистеме Украины в пиковые периоды, что обусловлено нехваткой топливно-энергетических ресурсов, дисбалансом между производством и потреблением электроэнергии, а также нестабильной политической и экономической ситуацией в стране.

Подобная тенденция изменения тарифных коэффициентов подтверждается данными Энергостратегии и относится к проблемной ситуации решения в целом проблемы неравномерности электропотребления за счет П-Р. Вместе с тем в Энергостратегии предусматриваются разработки комплексной программы энергосбережения для снижения потребления электроэнергии на угольных шахтах, которые также работают в режиме водоотлива.

1.2 Возможности функционирования угольной шахты в режиме потребителя-регулятора

Угольная шахта имеет большие возможности для РРЭ [5], однако их реализация в действительности осуществляется крайне недостаточно из-за отсутствия научно обоснованных решений по переводу энергоемких электроприемников в П-Р электрической нагрузки. Нередко РРЭ сводится к самым простым

мероприятиям (перестановке или замене оборудования, увеличении сечения кабелей и т.п.), тогда как большие резервы эффективного использования электроэнергии, оптимизация режимов ее потребления остаются не использованными. На практике для выявления П-Р и определение порядка их отключения отдается предпочтение методам экспертных оценок, что не всегда приводит к корректному решению ввиду негарантированной сравнимости энерготехнологических процессов шахты. Снижение мощности предприятия чаще всего достигается путем уменьшения производительности П-Р, что приводит к увеличению расхода электроэнергии, или произвольными по количеству и длительности перерывами в работе П-Р, что вызывает увеличение числа включений-отключений, снижает сроки наработки на отказ, а следовательно и надежность оборудования. Кроме того, в качестве П-Р, как правило, рассматриваются одиночные установки без комплексного решения вопросов РРЭ с адаптацией к технологическим процессам производства, когда наибольший эффект достигается именно на базе совершенствования технологии при общих усилиях специалистов-технологов и электриков. В связи с этим обоснование эффективных П-Р и установление зависимостей величин их электрических нагрузок от основных производственных показателей является актуальной задачей.

Как известно, наиболее энергоемкими потребителями электрической энергии шахты являются стационарные установки (подъемы, водоотлив, главные вентиляционные установки) напряжением $U_n = 6$ кВ. Для исключения потребления электрической энергии этими потребителями в часы максимальной и полупиковой нагрузки в энергосистеме, целесообразно провести организационные мероприятия по созданию специальных графиков и режимов их работы.

Однако эти меры не должны приводить к трудностям при выполнении производственных планов, к снижению технико-экономических показателей шахты. Это может быть достигнуто двумя путями:

- 1) организацией технологического процесса соответственно графику нагрузки энергосистемы;

2) полным или частичным отключением энергоемких потребителей на периоды максимума.

Первый путь выполнить тяжело, так как в этом случае требуется изменение режима работы шахты (перенесение начала работы смен, изменения организации работ в очистных забоях и т.п.).

Второй путь более приемлемый и распространенный, то есть полное или частичное отключение энергоемких потребителей, к которым могут быть отнесены потребители с повторно-кратковременным режимом работы. Однако многие из них по технологическим причинам не могут быть использованы как П-Р активной мощности.

1.3 Роль шахтного водоотлива в регулировании режимов электропотребления

Одним из этапов решения проблемы неравномерности энергопотребления, т. е. снижения уровня потребления электрической энергии в часы максимума нагрузок и, как следствие этого, выравнивания ГЭН, является применение таких технологических условий для главного водоотлива, чтобы осуществлять адекватные режимы электропотребления. Достижение желаемого результата обеспечивается за счет регулирования режимов электропотребления, под которым следует понимать комплекс организационно-технических решений и мероприятий, обеспечивающих регламентированный энергоснабжающей организацией режим электропотребления. РРЭ осуществляется посредством потребителей-регуляторов, которые без вреда для производства и нарушений Правил безопасности в угольных шахтах (ПБ) [6] и Правил технической эксплуатации угольных шахт (ПТЭ) [7] могут допустить либо произвольно заданные по количеству и длительности перерывы в работе, либо систематические ежедневные перерывы на определенное время, либо изменение интенсивности работы.

Целесообразность использования шахтных водоотливных установок (ШВУ) для снижения максимальной мощности предприятия в часы максимума

нагрузки энергосистемы объясняется двумя основными особенностями таких установок [8]:

- большой суммарной мощностью электропривода, которая зависит от водообильности шахты (при этом, в зависимости от производительных мощностей шахты, может достигать до 25-30 % от общей установленной электрической мощности предприятия), и длительным режимом его работы с практически неизменной нагрузкой, что может дать значительный экономический эффект при регулировании периодов работы насосов. При номинальном напряжении $U_n = 6$ кВ номинальная мощность приводных двигателей насосов варьируется в пределах $P_n = 250 \dots 1250$ кВт;

- свободным циклическим режимом работы насосов в течение суток благодаря наличию аккумулирующей емкости водосборника.

Режимы работы существующих главных водоотливных установок (ГВУ) не для всех условий имеют возможность использования их в качестве эффективного потребителя-регулятора. Согласно ГОСТ 19431-84 "Энергетика и электрификация", потребитель-регулятор – это потребитель электрической энергии, режим работы которого предусматривает возможность ограничения электропотребления в часы максимума для выравнивания графика нагрузки энергетической системы или электростанции и увеличения нагрузки в часы минимума.

Следовательно, водоотливные установки могут работать в режиме потребителя-регулятора, при этом опыт эксплуатации ГВУ шахты показывает, что насосная установка работает недостаточно эффективно – существует перерасход электроэнергии. Экономичная и надежная работа водоотливной установки большей частью определяется фактическим режимом работы насоса, который в процессе эксплуатации постоянно изменяется в результате повышенного износа оборудования при перекачивании вод с включением твердых частиц, кислых вод, в результате "обрастания" элементов трубопровода. К тому же режимы работы существующих ГВУ характеризуется неэффективным использованием их в качестве П-Р.

Вопросы РРЭ водоотливных установок рассматривались достаточно обширно в 70-80-е годы прошлого столетия, однако технологические условия функционирования ГВУ не учитывались. Пик исследования задачи использования шахтного водоотлива в режиме П-Р был 25-30 лет назад, однако в то время проблема энергосбережения (т. е. экономии энергоресурсов) не была "острой", поэтому малозатратные и, как правило, организационного характера разработки рассматривались и внедрялись, а более "критичные" и требующие фундаментальных решений – оставались без должного внимания.

Еще с 70-х годов прошлого столетия проблемой РРЭ и использования ШВУ в режиме П-Р занимались многие ученые. Так например, Праховник А.В., Разумный Ю.Т., Герасимович В.Н., Заика В.Т. рассматривали вопросы РРЭ на угольных шахтах и эффективность применения П-Р [9-24]. В соавторстве с Шевчуком С.П., Данильчуком Г.И. и Находовым В.Ф. [25-30] рассматривались вопросы управления и автоматизации электропотреблением шахтного водоотлива. Розен В.П. в своих трудах [31-35] затронул проблему выравнивания ГЭН с помощью П-Р. Решением этой же проблемы занимались Хронусов Г.С. [36-41], Гордеев В.И. [42], Червонный Е.Н. [43], и др. ученые. Фундаментальный вклад в изучение проблем шахтного водоотлива сделали ученые НИИГМ им. М.М. Федорова и МакНИИ. Выполненные исследования и разработки представляют собой научно-практическую основу для дальнейших работ в этом направлении.

К сожалению, рассматриваемые вопросы РРЭ сводились преимущественно к снижению оплаты за потребляемую предприятиями электроэнергию. Это обеспечивалось путем изменения графика работы оборудования, когда вся основная работа выполняется в периоды минимальных и средних нагрузок в энергосистеме за счет интенсивной работы электроприемников. Подобные разработки, цель которых – выравнивание ГЭН энергосистемы, приносили предприятиям желаемую экономию денежных средств, но приводили к вынужденному перерасходу электроэнергии в другие периоды суток.

Немаловажную роль в реализации РРЭ играет "человеческий фактор" определяемый ролью эксплуатационного персонала, который с "осторожностью" относится к критическим режимам и склонен к "перестраховке" в ущерб разработанным и рекомендованным режимам. Эту проблему необходимо решать путем внедрения и использования устройств автоматизированного управления режимами электропотребления.

На период первого десятилетия XXI столетия экономическое состояние страны и соответственно его влияние на промышленность значительно отличается от состояния 80-90-х годов прошлого столетия, поэтому предлагаемые пути решения требуют дополнительного внимания, т. е. усовершенствования и (или) адаптирования их к современным требованиям и условиям. Следовательно проблема повышения энергоэффективности работы ШВУ является актуальной [44].

В последние годы некоторые российские ученые ведут исследования в этом направлении, предлагая осуществлять регулирование электропотребления шахтным водоотливом путем применения асинхронного частотно-регулируемого привода [45, 46], а также разрабатываются системные критерии энергоэффективности функционирования ШВУ [47]. Однако при этом проблема остается не решенной полностью.

Участие главного водоотлива в регулировании режима электропотребления должно быть экономически выгодным как потребителю (шахте), так и производителю (энергосистеме) при условии использования дифференцированного по периодам суток тарифа на электроэнергию. Исходя из этого экономический эффект от изменения режимов работы водоотлива, отключения насосов в часы пика и интенсивной откачки воды в часы ночного провала энергосистемы должен быть достаточно высоким. При реализации режимов работы ГВУ в качестве П-Р достигается желаемое снижение величины оплаты за потребленную электроэнергию, но возникшая необходимость интенсивной работы насосов в определенные периоды суток может приводить к увеличению удельного расхода электроэнергии, поскольку будут использоваться не только рабочие но и ре-

зервные насосные агрегаты. Следовательно, для реализации таких режимов работы необходимо создать условия, при которых шахтная водоотливная установка будет работать в зоне максимального коэффициента полезного действия (КПД), а трубопроводная сеть выполнена таким образом, чтобы откачка воды выполнялась с минимальными расходами электроэнергии. Кроме того, насосная установка не должна работать с недостаточным или с избыточным напором. Первое приведет к ненормальному режиму работы насоса (кавитация, помпаж и др.) и соответственно к выходу из строя насосной установки, а второе – к увеличению удельного расхода электроэнергии.

Критерием экономичной работы водоотливной установки является величина расхода электроэнергии на кубический метр воды, откачанной из шахты на поверхность [48]:

$$w = \frac{\gamma g H_n Q}{1000 \cdot 3600 \eta_n \eta_\varepsilon \eta_c Q_{\text{вых}}} = \frac{0,00286 H_n Q}{\eta_n \eta_\varepsilon \eta_c Q_{\text{вых}}}, \quad (1.2)$$

где $\gamma = 1000 \div 1050$ кг/м³ – плотность шахтной воды;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$H_n = H_z + H_{\text{вс}} + H_0$ – полный напор, развиваемый насосом, равный сумме геодезического напора, высоты всасывания и потери напора в трубопроводе и распределительной арматуре соответственно, м;

Q – производительность насоса по паспорту при данной высоте подачи, м³/ч;

$Q_{\text{вых}}$ – фактическая производительность насоса, замеренная на поверхности в месте сброса шахтной воды, т. е. с учетом потерь в трубопроводе, м³/ч;

$\eta_n, \eta_\varepsilon, \eta_c$ – КПД насоса, электродвигателя и электрической сети соответственно.

Как видно из (1.2), снижение расхода электроэнергии на водоотлив может достигаться за счет мероприятий, направленных на уменьшение притока воды в шахту путем устранения утечек в нагнетательном трубопроводе, снижения сопротивления всасывающего и нагнетательного трубопроводов путем увеличения сечения труб и выбором кратчайшей трассы при прокладке трубопроводов,

увеличение КПД насоса, а также за счет снижения избыточного напора, развиваемого насосом. Применение указанных мер позволяет учитывать расчетные (реальные) параметры: напор, производительность и КПД насоса.

Необходимо также учитывать и тот факт, что на большинстве шахт имеются многоагрегатные ГВУ, работа насосов на которых осуществляется параллельно, что не может не отразиться на рабочих характеристиках насосных агрегатов [49]. Следовательно, удельный расход электроэнергии зависит от многих факторов, влияние которых усиливается при интенсивной работе ГВУ в процессе регулирования электропотребления и возникает необходимость в учете данного параметра как одного из критериев энергоэффективной работы главного водоотлива.

Немаловажным моментом в процессе регулирования является также и объем водосборника, который должен быть как достаточным для целей РРЭ, так и не избыточным.

Объем водосборника на стадии проектирования определяется в соответствии с нормативными документами, такими как Правила безопасности в угольных шахтах и Правила технической эксплуатации угольных шахт. Однако даже между этими документами нет единого подхода при определении вместимости водосборника. Так, например, в соответствии с ПБ, действующими до 2010 года [50], вместимость водосборника ГВУ должна составлять не менее 4-часового максимального притока воды (без учета заилиения). При этом, для того же периода времени ПТЭ редакции 1975 г. [51] рекомендовали определять объем водосборника ГВУ равным не менее 8-часового нормального притока. В 2005 году выходит новое издание ПТЭ [7], которое рекомендует уже определять объем водосборника ГВУ равным не менее 12-часового нормального притока. Из приведенного видно, что несогласованность в рекомендациях нормативных документов, которые должны дополнять друг друга, несомненно присутствует.

В работе [52] показано, что условие, приведенное в ПТЭ редакции 2005 г. [7], не есть строго обоснованным. С экономической точки зрения, сооружение

водосборников на 12-часовой приток приводит к значительному увеличению единовременных капитальных затрат. Кроме того, создаются неблагоприятные условия во время проектирования и эксплуатации главного водоотлива. Следовательно, строительство водосборника такого большого объема не является простой технической задачей. Необходимо учитывать количество ветвей, прочность породы, неравномерность вместимости ветвей и многие другие факторы. Также в работе [52] показано, что удельный объем водосборника зависит не только от количества ветвей водосборника, но и от их неравномерности.

В результате предложений, рассмотренных в работах [52, 53], в 2010 году выходит новое издание ПБ [6], которое рекомендует уже определять вместимость водосборника ГВУ равной не менее 8-часового притока. При этом уже ничего не указывается о характере водопритока (нормальный или максимальный) и об учете степени заиления водосборника.

Притоки воды в шахту с годами эксплуатации, а также в течение каждого года являются переменными, иногда со значительным диапазоном изменений [54]. Такие изменения носят медленный характер в течение всего периода эксплуатации шахты с наложением сезонных повышений притока, вызванных весенне-осенними паводками и дождями. Следовательно, в зависимости от характера водопритока требуемая емкость водосборника может различаться в два раза, а в результате полученный объем оказаться как недостаточным, так и избыточным для эффективного РРЭ.

В связи с тем что все шахты были построены более 30-40 лет назад, технологические условия функционирования большинства из них не соответствуют современным ПБ [6] и ПТЭ [7] для применения РРЭ, поэтому эффективность использования ГВУ таких шахт в режиме П-Р будет невысока.

В таблице 1.1 приведены параметры ГВУ некоторых действующих шахт Западного Донбасса, на основании которых в таблице 1.2 указаны требуемые нормативными документами [6, 7] для применения РРЭ параметры водосборников по вместимости и соответствие им существующих.

Таблица 1.1

Параметры некоторых ГВУ действующих шахт

№	Шахта	Приток, м ³ /ч		Количество и объем ветвей водосборни- ка, м ³	Количество и тип насосов	Количество и диаметр на- порных ставов, шт. × мм
		норм.	макс.			
1	Белицкая (гор. 250 м)	250	300	1100; 900	3×ЦНС 300-300	2×273
2	Белицкая (гор. 500 м)	200	250	500; 500	3×ЦНС 300-600	2×325
3	Красноармейская-Западная (гор. 708 м)	250	340	1900; 1400	2×НСШ 410-819 4×НСШ 410-728	5×200
4	Блок №1 Западно-Донбасская (гор. 585 м)	50	100	400; 400	3×ЦНС 300-600	2×250
5	Самарская (гор. 300 м)	400	500	1200; 900; 900	7×ЦНС 300-360	3×250
6	Благодатная (гор. 210 м)	300	350	900; 640	4×ЦНС 300-300	2×250
7	Блок №1 Степная (гор. 145 м)	300	400	1600; 1100; 1100	8×ЦНС 300-180 2×ЦНС 300-240	3×250
8	Блок №2 Степная (гор. 300 м)	600	800	1700; 1200; 1200	9×ЦНС 300-360	3×300
9	Днепровская (гор. 265 м)	400	500	1900; 1100	7×ЦНС 300-360	3×273
10	им. Героев Космоса (гор. 470 м)	50	100	500; 500	3×ЦНС 300-600	2×250
11	им. Н.И. Сташкова (гор. 225 м)	1000	1200	2000; 950	4×ЦНС 300-300 6×ЦНСШ 300-290	3×350
12	им. Н.И. Сташкова (гор. 300 м)	300	400	3600; 2300	2×ЦНС 300-360 3×ЦНСШ 300-360	2×275
13	Терновская (гор. 265 м)	300	400	900; 600; 600	5×ЦНС 300-300	2×250
14	Юбилейная (гор. 210 м)	1100	1200	2000; 1600	12×ЦНС 300-240	3×250

Таблица 1.2

Соответствие параметров ГВУ действующих шахт ПАО "ДТЭК Павлоградуголь" нормативным документам

№	Шахта	Приток, м ³ /ч		Существующий объем водосборника, м ³	Объем водосборника по требованиям ПТЭ, м ³		Объем водосборника по требованиям ПБ, м ³	
		норм.	макс.		для норм. притока	для макс. притока	для норм. притока	для макс. притока
1	Блок №1 Западно-Донбасская (гор. 585 м)	50	100	800	600	1200	400	800
2	Самарская (гор. 300 м)	400	500	3000	4800	6000	3200	4000
3	Благодатная (гор. 210 м)	300	350	1540	3600	4200	2400	2800
4	Блок №1 Степная (гор. 145 м)	300	400	3800	3600	4800	2400	3200
5	Блок №2 Степная (гор. 300 м)	600	800	4100	7200	9600	4800	6400
6	Днепровская (гор. 265 м)	400	500	3000	4800	6000	3200	4000
7	им. Героев Космоса (гор. 470 м)	50	100	1000	600	1200	400	800
8	им. Н.И. Сташкова (гор. 225 м)	1000	1200	2950	12000	14400	8000	9600
9	им. Н.И. Сташкова (гор. 300 м)	300	400	5900	3600	4800	2400	3200
10	Терновская (гор. 265 м)	300	400	2100	3600	4800	2400	3200
11	Юбилейная (гор. 210 м)	1100	1200	3600	13200	14400	8800	9600

Так, например для шахт ПАО "ДТЭК Павлоградуголь", существующий объем водосборника ГВУ только шахты им. Н.И. Сташкова (гор. 300 м) соответствует требованиям новых ПБ и ПТЭ [6, 7] для использования РРЭ как при нормальном так и при максимальном водопритоке; водосборники шахт им. Героев Космоса (гор. 470 м), Блок №1 Степная (гор. 145 м) и Блок №1 Западно-Донбасская (гор. 585 м) по вместимости соответствуют требованиям ПБ для условий РРЭ независимо от притока и требованиям ПТЭ – только для нормального притока; водосборники шахт Самарская (гор. 300 м), Благодатная (гор. 210 м), Блок №2 Степная (гор. 300 м), Днепровская (гор. 265 м), им. Н.И. Сташкова (гор. 225 м) и Терновская (гор. 265 м) по вместимости не соответствуют требованиям новых ПБ ПТЭ для применения РРЭ независимо от водопритока, что, в свою очередь, лишает их возможности эффективно работать в режиме П-Р.

Определение энергоэффективности шахтного водоотлива сводилось преимущественно к определению режимов электропотребления, однако при этом не учитывались технологические условия. Следовательно, для повышения энергоэффективности ГВУ необходимо выполнить некоторые технологические и организационные условия, одним из которых является выбор целесообразного объема водосборника.

При нормальных условиях работы ГВУ, исходя из необходимости ремонта и чистки водосборника, он должен иметь не менее двух выработок. На большинстве действующих шахт емкость водосборника не удовлетворяет требованиям новых ПТЭ [7] для угольных шахт, и рассчитывалась без учета заиления водосборника и чистки одной из ветвей. Чистка ветвей водосборника является трудоемким процессом и выполняется, как правило, вручную, (по ПТЭ – не менее одного раза в год перед весенними паводками, а также по мере заиления), следовательно, большую часть времени водосборники находятся в эксплуатации со значительной степенью заиления, что не может не отразиться на фактическом (регулируемом) их объеме. Поэтому возникает проблема определения необходимой вместимости водосборника, количества и объема его ветвей, достаточных для отключения насосов в часы максимума нагрузок энергосистемы.

Эффективное РРЭ в технологическом процессе шахтного водоотлива осуществляется за счет устройства дополнительной емкости водосборников, что позволяет в часы максимума активной нагрузки в энергосистеме полностью отключать потребители технологической цепи по откачке шахтных вод из подземных выработок до отстойника на поверхности [5, 55]. Это связано с тем, что при проектировании водосборника не учитывалось его заиливание и режим чистки, а равенство объемов его ветвей определялась лишь горногеологическими условиями. Следовательно, ветви водосборника имели, как правило, разную вместимость и при выведении большей по объему ветви в чистку – объема оставшейся (меньшей) ветви, которая к этому периоду уже имела какой-то процент заиливания, было недостаточно для отключения насосов на период пиковых нагрузок в энергосистеме.

Использование дифференцированного по времени суток тарифа на электроэнергию для РРЭ предполагает, что в периоды максимальных электрических нагрузок в энергосистеме потребитель имеет возможность полностью или частично уменьшать электропотребление. Однако для условий работы в часы ночного провала нагрузок или полупикового периода возникает необходимость интенсивной работы по откачиванию воды, что предположительно может привести к увеличению расхода электроэнергии и, соответственно, к снижению эффективности РРЭ.

Такое решение проблемы не всегда бывает обоснованным. Поскольку на работу ГВУ в качестве П-Р существенно влияет глубина, водоприток шахты и объем водосборника, то в некоторых случаях будет справедливым рассмотрение вопроса целесообразности данного решения. Потребляемая мощность ГВУ прямо пропорциональна подаче и напору $P = f(Q; H)$, поэтому при малых значениях притока воды и небольших глубинах использовать водоотлив для регулирования электропотребления может не иметь ни технического, ни экономического обоснования. Поэтому более корректно подойти к этому вопросу следует путем определения граничных условий целесообразности использования водоотлива как П-Р, т. е. возникает необходимость в формировании четкого

представления об областях применения повышения эффективности работы ГВУ в режиме П-Р.

При исследованиях сложных технических систем, примером которых является шахтный водоотлив, достаточно трудно определить целевую направленность. Если речь идет об эксплуатации технических систем, которые касаются в той или иной мере интересов их организаторов и общества в целом, то их эффективная работа не характеризуется единственным показателем эффективности. Приходится использовать и другие вспомогательные показатели, которые дополняют основной показатель эффективности [56, 57]. Полученный обобщенный показатель имеет вид дроби. В числителе располагают величины, увеличение которых желательно (в данном случае напор H или подача Q отдельно взятого насоса), а в знаменателе – величины, уменьшение которых нежелательно (КПД насоса, электропривода, электрической сети).

Известен и другой способ определения обобщенного показателя эффективности – в виде взвешенной суммы частных показателей M_i , которые входят в нее с некоторым взвешивающим коэффициентом k_i , что отображает их важность. Для показателей, которые необходимо увеличить, взвешивающие коэффициенты берутся положительными, а которые необходимо уменьшить – отрицательными. При произвольном назначении взвешивающих коэффициентов, такой способ создания обобщенного показателя эффективности ничем не лучше рассмотренного выше. Произвольный выбор взвешивающих коэффициентов для получения рационального решения, которое, в конечном итоге, окажется компромиссным, приводит к таким же произвольным "рациональным" результатам.

Полностью лишиться субъективности при решении задач, связанных с выбором и принятием решений, невозможно. Даже в самых простых задачах субъективность неминуемо присутствует, проявляясь и в выборе показателя эффективности, и в выборе граничных условий, и в выборе математической модели, которая описывает исследуемое явление.

В ряде случаев можно принять решение, опираясь на доступное для обзора, а иногда на минимальное количество показателей, которые характеризуют данный объект исследования и текущее значение избранных показателей эффективности. Водоотливные установки угольной шахты не являются в теории исследований операций достаточно сложным и неопределенным (хоть и нечетким) техническим объектом. Как и все типичные представители технологических объектов с функцией "потребитель-регулятор", они являются лишь относительно самостоятельным элементом в составе угледобывающего комплекса (шахты). Такие задания в теории принятия решений называют прямыми.

Использование потребителем разных способов регулирования энергопотребления влияет на экономические показатели как потребителей, так и производителей электрической энергии. Системная оценка таких иерархических связей является достаточно сложным заданием.

Эффективное регулирование режимов электропотребления главного водоотлива угольной шахты с применением дифференцированного по периодам суток тарифа на электроэнергию обеспечивается наличием водосборников, вместимость которых определяется притоком воды за период прохождения большего максимума нагрузки в энергосистеме, возможным заиливанием водосборника, количеством его ветвей и распределением их объемов с учетом неравномерности.

Использование энергоемких установок в качестве П-Р, на примере ГВУ, поможет частично решать проблему неравномерности графика электрических нагрузок энергосистемы страны.

Анализируя выше изложенное, возможно сделать вывод о необходимости и целесообразности использования главного водоотлива в режиме потребителя-регулятора, при осуществлении оценки энергоэффективности работы ГВУ в данном режиме по удельному расходу электроэнергии при условии минимальной оплаты за ее потребление [58].

1.4 Выводы и постановка задач исследования

Для энергосистемы проблема неравномерности электропотребления является актуальной задачей, поскольку она напрямую влияет на величину топливно-энергетических показателей. Для частичного решения данной проблемы привлекаются энергоемкие установки, работающие в режиме потребителей-регуляторов, для чего энергоснабжающие организации создают "стимулирующие" это решение условия. Подобные меры, направленные на повышение эффективности работы потребителей-регуляторов улучшат технико-экономические показатели как потребителей, так и производителей электрической энергии.

Выполненный анализ состояния проблемы позволяет сделать следующие выводы:

1. Неравномерность графика электрических нагрузок приводит к необходимости использования маневренных генерирующих мощностей для покрытия пиковых нагрузок в энергосистеме. Использование ТЭС в данном режиме является неэкономичным и приводит дополнительному увеличению расхода топлива, что отражается на увеличении стоимости вырабатываемой электроэнергии и, как следствие, способствует снижению технического ресурса энергоблоков ТЭС и росту негативного влияния на экологическую ситуацию в стране.

2. Снижение неравномерности ГЭН энергосистемы, а именно снижение уровня потребления электрической энергии в часы максимума нагрузок, частично достигается за счет работы энергоемких потребителей в режиме П-Р. Данные мероприятия сопровождаются регулированием режимов электропотребления, при этом уровень эффективности которых остается неудовлетворительным.

3. Применение эффективного регулирования режимов электропотребления П-Р, на примере шахтного водоотлива, способствует максимальному снижению оплаты за потребляемую электроэнергию при минимальном увеличении ее расхода. Минимальный удельный расход электроэнергии, как критерий энер-

гоэффективной работы главного водоотлива в режиме П-Р, достигается за счет создания соответствующих технических и технологических условий для эффективного РРЭ.

В соответствии с вышеизложенными выводами сформулирована *цель научных исследований* – снижение удельного расхода электроэнергии в режиме интенсивной откачки воды для повышения энергоэффективности работы главного водоотлива угольной шахты.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Выполнить анализ технологических параметров водосборников главной водоотливной установки для определения целесообразности ее использования в качестве потребителя-регулятора (П-Р) и обосновать необходимость изменения объема водосборника для повышения эффективности регулирования электропотребления.

2. Разработать способ определения необходимого объема водосборника с учетом его заиливания, количества ветвей и их неравенства по вместимости, что позволит обеспечить снижение электропотребления в системе водоотлива путем отключения насосов в часы максимума нагрузки в энергосистеме независимо от графика чистки ветвей водосборника.

3. Разработать алгоритм выбора количества одновременно работающих насосов в соответствующие периоды суток при применении дифференцированного по времени суток тарифа на электроэнергию с учетом рабочих параметров насосов по обобщенным критериям для любых технологических условий функционирования главной водоотливной установки.

4. Определить области энергоэффективного использования главной водоотливной установки в режиме потребителя-регулятора.

РАЗДЕЛ 2

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ГЛАВНОЙ ВОДООТЛИВНОЙ УСТАНОВКИ

2.1 Параметры водосборника главной водоотливной установки

В соответствии с требованиями Национальной комиссии регулирования электроэнергетики суммарная длительность двух периодов максимальных (пиковых) нагрузок в энергосистеме не должна превышать 6 часов на суточном интервале, а распределение по часам для утреннего и вечернего максимумов в зависимости от времени года составляет соответственно 3:3 или 2:4. С учетом этого устанавливается наибольшая длительность одного периода максимума нагрузки в энергосистеме $t_m = 4$ часа.

Для выполнения водоотливом функций потребителя-регулятора необходимо создать технологические условия, при которых объем одной или нескольких ветвей, за вычетом объема ветви, находящейся в чистке, был бы достаточным V_{∂} для 4-часового максимального притока воды [59-60]:

$$V_{\partial} = K_z t_m Q_{\max}, \text{ м}^3, \quad (2.1)$$

$$V_{\partial} = 1,15 \cdot 4 \cdot Q_{\max} = 4,6 Q_{\max}, \text{ м}^3,$$

где: $K_z = 1,15$ – среднее значение заилиения ветви водосборника от максимально допустимого, равного 30%;

$t_m = 4$ ч – наибольшая длительность одного периода прохождения максимума нагрузки в энергосистеме;

Q_{\max} – максимальное значение часового шахтного притока воды, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Поскольку процесс чистки водосборника является периодическим и последовательным, т. е. ветви выводятся в чистку по очереди при достижении одной из них уровня заилиения равного 30%, следовательно, заилиение оставшихся в работе веток соответствует средним (промежуточным) значениям. На основа-

нии этого и режима чистки водосборников шахт Западного Донбасса в выражении (2.1) принимаем среднее значение заиления, равное 15%, для получения необходимого объема водосборника, достаточного для выполнения регулирования электропотребления. Однако такое решение не является обязательным и K_3 может корректироваться в зависимости от периодичности чистки и ее продолжительности в условиях конкретного предприятия.

2.2 Анализ неравенства объемов ветвей водосборника главного водоотлива

В соответствии с Правилами безопасности [6] ГВУ должна состоять из двух и более ветвей, что дает возможность производить регулярную чистку водосборника. Причем размер каждой из ветвей и соответственно равномерность относительно друг-друга нормативными документами не регламентируется.

Количество ветвей водосборника и критерий равенства или неравенства их объемов принимают исходя из имеющихся конструктивных условий устройства водосборника на конкретной шахте, а именно: технических возможностей и горногеологических условий строительства, соответствия технологической схемы водосборника плану околоствольного двора, производственной необходимости, экономической целесообразности и т. п.

Принимается допущение, что объемы ветвей $V_{\epsilon} = \text{const}$, т. е. равные и разделив объем водосборника V_{δ} на количество его ветвей получим объем одной ветви:

$$V_{\epsilon}^0 = \frac{K_3 t_{\text{м}} Q_{\text{max}}}{n_{\epsilon}}, \quad (2.2)$$

где n_{ϵ} – количество ветвей водосборника.

Обязательность регулярной чистки водосборника приводит к поочередному выведению одной из его ветвей в чистку, тогда необходимый для РРЭ объем водосборника составит:

$$V_{\epsilon}^{PPЭ} = \frac{K_3 t_M Q_{\max}}{n_{\epsilon} - n_{\epsilon_4}}, \quad (2.3)$$

где n_{ϵ_4} – количество ветвей водосборника, находящихся в чистке.

Феномен состоит в том, что при выполнении РРЭ следует принять во сколько раз $V_{\epsilon}^{PPЭ}$ будет больше V_{ϵ}^0 :

$$\frac{\frac{K_3 t_M Q_{\max}}{n_{\epsilon} - n_{\epsilon_4}}}{\frac{K_3 t_M Q_{\max}}{n_{\epsilon}}} = \frac{n_{\epsilon}}{n_{\epsilon} - n_{\epsilon_4}}. \quad (2.4)$$

Таким образом, при условии равенства объемов ветвей, выражение (2.1) приобретает вид, позволяющий определить объем всего водосборника:

$$V_{\text{вод}} = \frac{n_{\epsilon}}{n_{\epsilon} - n_{\epsilon_4}} K_3 t_M Q_{\max} = \frac{n_{\epsilon}}{n_{\epsilon} - n_{\epsilon_4}} 4,6 Q_{\max}. \quad (2.5)$$

Следовательно, необходимый объем водосборника зависит и от множителя $K_v = \frac{n_{\epsilon}}{n_{\epsilon} - n_{\epsilon_4}}$. Характер изменения множителя K_v от количества ветвей водосборника n_{ϵ} (при $n_{\epsilon_4} = 1$) представлен на рисунке 2.1.

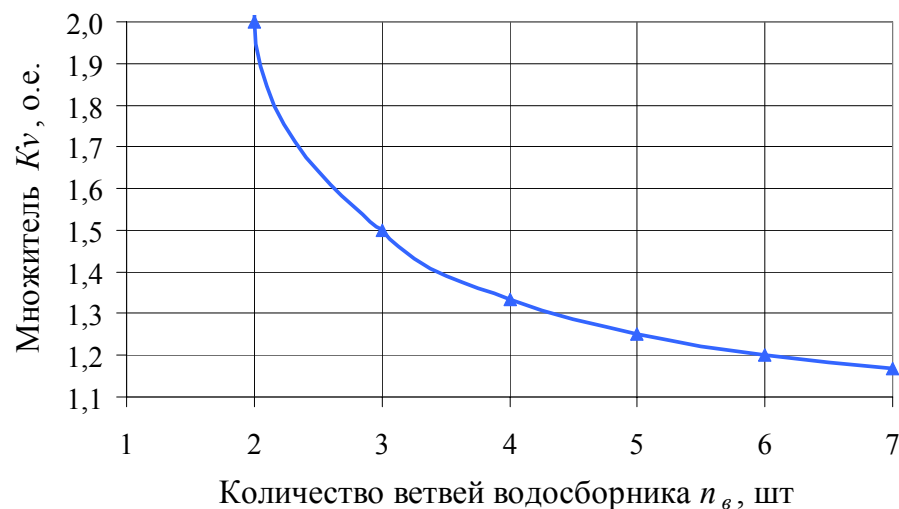


Рис. 2.1. Зависимость множителя K_v от количества ветвей n_{ϵ} водосборника

С учетом зависимости (2.2) и характера изменения множителя K_v по рис. 2.1 можно утверждать, что необходимый для регулирования режимов электропотребления объем водосборника при равном значении объемов его ветвей уменьшается с устройством 3-х ветвей по сравнению с 2-мя на 33%, а с 3-х на 4-и ветви на 12,56% и так далее на 6,6%, 4,2% соответственно. Конечно, увеличение количества ветвей снижает необходимый объем водосборника при стремлении к $n_e = 5$, особенно это наблюдается при $n_e = 3$ и 4. Последующее увеличение количества ветвей предоставляет незначительное снижение необходимого объема водосборника и значительно усложняет его строительство.

При современном конструктивном устройстве водосборника с учетом выполнения условий соединения горных выработок, его ветви по объему редко бывают равными. Это обстоятельство создает своеобразные особенности при минимизации необходимого для регулирования режимов электропотребления объема водосборника при условии использования водоотлива в качестве эффективного потребителя-регулятора. К таким особенностям следует отнести тот факт, что величины объемов ветвей водосборника V_{ei} описываются неравенством:

$$V_{e1} > V_{e2} > \dots > V_{ei}. \quad (2.6)$$

При этом, если наибольшая по объему ветвь V_{e1} находится в чистке, то суммарный объем всех ветвей, оставшихся в работе по аккумулярованию воды, должен отвечать условию:

$$V_{e2} + V_{e3} + \dots + V_{ei} = \sum_{i=2}^{n_e} V_i \geq 4,6Q_{\max}. \quad (2.7)$$

Анализ объемов ветвей действующих ГВУ шахт (см. табл. 1.1), а также изучение многочисленных планов горных выработок, которые относятся к водоотливу, показали, что объем каждой следующей ветви водосборника увели-

чивается в среднем на 25–35 %, за редким исключением на 40 % и больше. Например, на шахте "Красноармейская-Западная" (гор. 708 м) водосборник состоит из двух ветвей вместимостью 1900 и 1400 м³ соответственно (разница объемов ветвей составляет 35,7 %), результаты анализа параметров ГВУ других шахт приведены в табл. 2.1.

Существенные различия объемов ветвей водосборников действующих шахт (особенно при $n_e = 2$) приводят к невозможности осуществления эффективного регулирования электропотребления в период чистки большей ветви, т. е. не позволяют полностью исключить работу насосов период максимума нагрузок в энергосистеме. Подобную проблему можно решить путем построения равных по объему ветвей, что в свою очередь приведет к возможности осуществления эффективного регулирования электропотребления независимо от режима чистки водосборника [61, 62].

Таблица 2.1

Параметры водосборников некоторых ГВУ действующих шахт

Наименование шахты	Приток воды, м ³ /ч		Количество ветвей водосборника, шт.	Объем ветвей водосборника, м ³	Разница объемов ветвей, %
	нормальный	максимальный			
Терновская (гор. 265 м)	300	400	3	900; 600; 600	50
Самарская (гор. 300 м)	400	500	3	1200; 900; 900	33,3
Белицкая (гор. 250 м)	250	300	2	1100; 900	22,2
Белицкая (гор. 500 м)	200	250	2	500; 500	0
Красноармейская-Западная (гор. 708 м)	250	340	2	1900; 1400	35,7
Благодатная (гор. 210 м)	300	350	2	900; 640	40,6
Юбилейная (гор. 210 м)	1000	1200	2	2000; 1600	25,0
им. Н.И. Сташкова (гор. 225 м)	1000	1200	2	2000; 950	110,5

При существующем конструктивном устройстве водосборника с учетом выполнения условий сопряжения и взаимного расположения горных выработок, его ветви редко бывают равными по объему, а их количество по ПБ и ПТЭ не может быть меньше двух (самые распространенные значения 2 и 3). Исходя

из выражения (2.5) с учетом неравенства (2.6) и условия (2.7) получены удельные (на 1 м³ притока воды в час) объемы водосборника $v_{вод}$ и его ветвей v_{ϵ} равных и неравных, в зависимости от их количества n_{ϵ} (см. табл. 2.2).

На основании анализа объемов ветвей действующих ГВУ шахт (см. табл. 2.1), неравенство объемов ветвей водосборника (для табл. 2.2) представим следующим условием:

$$v_{\epsilon,i+1} = v_{\epsilon,i} K_{н.е}, \quad (2.8)$$

где $v_{\epsilon,i}$ и $v_{\epsilon,i+1}$ – удельные объемы ветвей водосборника при их неравенстве; $K_{н.е}$ – коэффициент неравенства (принимается в пределах 1,25-1,35).

Таблица 2.2

Зависимость удельного объема водосборника $v_{вод}$ от количества его ветвей n_{ϵ}

Количество ветвей водосборника n_{ϵ} , шт	Удельные объемы водосборника $v_{вод}$ и его ветвей v_{ϵ} , м ³ /(м ³ /ч), при условии:				Разность неравных и равных по объему ветвей $\Delta v_{вод}$, м ³ /(м ³ /ч)
	равенства объемов ветвей		неравенства объемов ветвей		
	$v_{вод}$	v_{ϵ}	$v_{вод}$	v_{ϵ}	
2	9,2	2×4,6	10,35	5,75; 4,6	1,15
3	6,9	3×2,3	8,0	3,4; 2,6; 2,0	1,10
4	6,13	4×1,53	7,2	2,6; 2,0; 1,5; 1,1	1,07
5	5,75	5×1,15	6,7	2,1; 1,6; 1,3; 0,95; 0,75	0,95
6	5,52	6×0,92	6,45	1,85; 1,5; 1,1; 0,85; 0,65; 0,5	0,93

Данные, приведенные в табл. 2.2 подтверждают, что удельный объем водосборника, т. е. необходимый объем подземных строительных работ, меньше для равных по объему ветвей и большего их количества по сравнению с неравными. Например, при трех ветвях водосборника его удельный объем должен составлять 8,0 м³/(м³/ч) для неравных по объему ветвей и только 6,9 м³/(м³/ч) для равных. Разность удельного объема $\Delta v_{вод}$ составляет 1,1 м³/(м³/ч), что существенно отобразится на капитальных затратах при сооружении водосборника на

шахте с большим притоком воды. Кроме того, на период чистки не наибольшей ветви при их неравном объеме появляется нежелательный избыточный объем водосборника. Например, при выведении в чистку третьей ветви с удельным объемом $2,0 \text{ м}^3/(\text{м}^3/\text{ч})$ для водосборника из трех неравных ветвей, суммарный объем двух рабочих ветвей будет составлять $3,4+2,6=6,0 \text{ м}^3/(\text{м}^3/\text{ч})$, что значительно больше необходимых по условию (2.4) $4,6 \text{ м}^3/(\text{м}^3/\text{ч})$.

Как видно из табл. 2.2 увеличение количества ветвей свыше 5-ти вызывает незначительное снижение удельного объема водосборника. Например, разница между этими величинами для водосборника из двух и трех равных ветвей составляет $9,2-6,9 = 2,3 \text{ м}^3/(\text{м}^3/\text{ч})$, а при пяти и шести равных ветвях лишь $5,75-5,52 = 0,23 \text{ м}^3/(\text{м}^3/\text{ч})$. Количество ветвей водосборника более 5-ти значительно усложняет его строительство и технологическую схему, что подтверждается имеющимся опытом проектирования, сооружения и эксплуатации шахтных водоотливных установок.

На основании данных табл. 2.2 на рис. 2.2 показаны кривые изменения удельных объемов водосборника от количества ветвей, а на рис. 2.3 приведено распределение относительных объемов ветвей по режимам работы водоотлива, которое удовлетворяет условию (2.4).

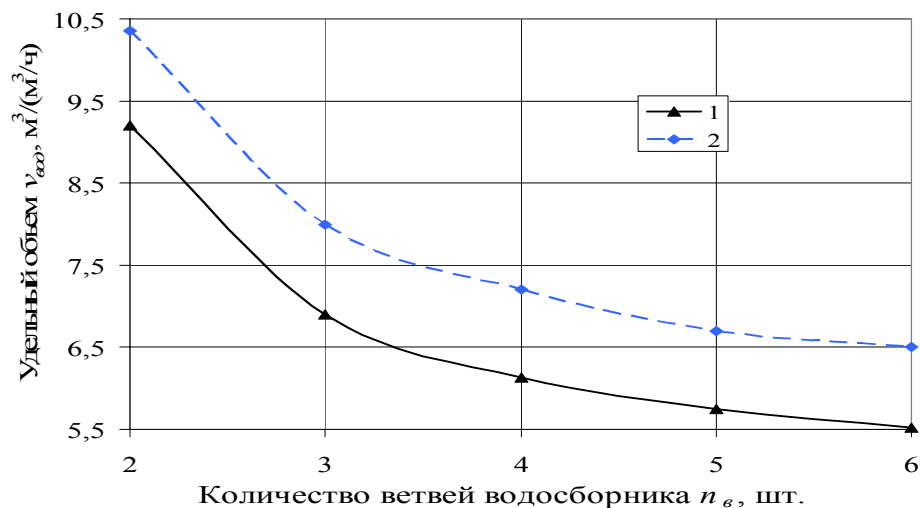


Рис. 2.2. Зависимость удельного объема водосборника $v_{вод}$ от количества его ветвей n_v при равных (кривая 1) и неравных (кривая 2) по вместимости ветвях

Относительное распределение объемов ветвей водосборника при выведении в чистку ветвей с равными объемами, а также при выведении наибольшей или наименьшей ветви при неравных их объемах приведены на рис. 2.3.

Сплошные линии 1 и 1' соответствуют варианту использования равных по объему ветвей при выводе одной из имеющихся в чистку (рис. 2.3). Возрастающая кривая 1 отображает объем водосборника предназначенный для аккумуляции воды в зависимости от количества ветвей (см. данные табл. 2.2), а убывающая кривая 1' – объем ветви находящейся в чистке. Штрихпунктирные линии 2 (возрастающая) и 2' (убывающая) соответствуют варианту использования неравных по объему ветвей при выводе наибольшей (V_{\max}) из имеющихся в чистку, а пунктирные линии 3 (возрастающая) и 3' (убывающая) соответствуют варианту использования неравных по объему ветвей при выводе наименьшей (V_{\min}) из имеющихся в чистку.

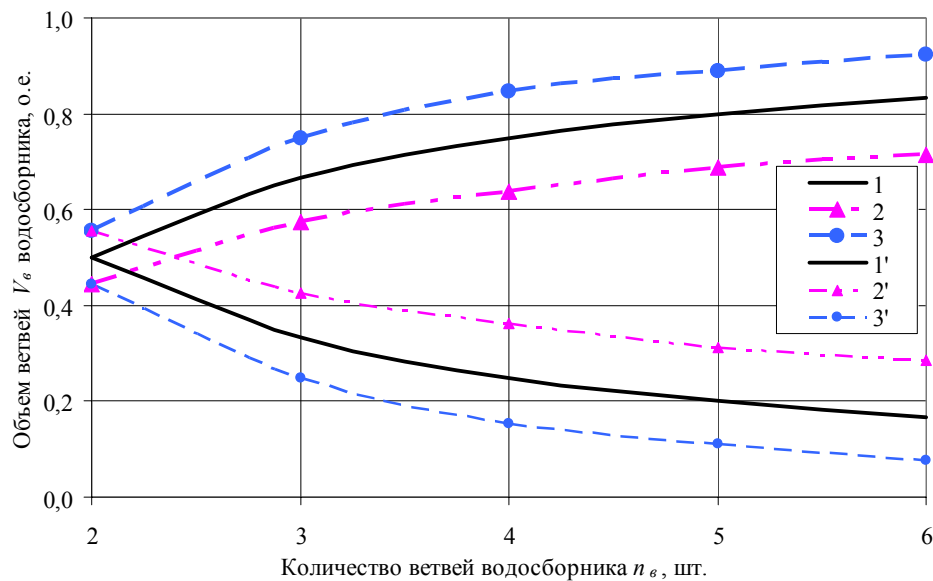


Рис. 2.3. Зависимость относительного объема ветвей от их количества: возрастающие кривые 1, 2, 3 относятся к объему аккумуляции воды, убывающие 1', 2', 3' – к объему, находящемуся в чистке; сплошные и пунктирные (штрихпунктирные) линии соответствуют равным и неравным по вместимости ветвям

Анализируя зависимости, представленные на рис. 2.2 и рис. 2.3, а также данные табл. 2.2, можно сделать вывод, что при равных по объему ветвях водосборника необходимая его емкость $V_{вод}$ меньше на величину от 1,15 до 0,93 м³ на 1 м³/ч притока воды по сравнению с неравными. Кроме этого, при неравных по емкости ветвях водосборника, когда в чистке находится большая ветвь (V_{max}), сумма объемов ветвей, оставшихся в работе (при $n_в = 3$ и более), по условию (2.4) равняется $4,6Q$. При чистке не самой большой ветви ($V_i < V_{max}$) сумма емкостей оставшихся в работе превышает значение $4,6Q$ (кривая 3, рис. 2.3). Это обстоятельство свидетельствует о наличии в данном случае избыточного объема (от 0,5 до 1,5 м³ на 1 м³/ч притока воды) горных работ по устройству водосборника главного водоотлива для условия неравности его ветвей по объему [60, 62].

Снижение необходимой емкости водосборника обеспечивается увеличением количества его ветвей и одновременным снижением неравности их вместимости.

Неравность объемов ветвей большинства существующих водосборников становится причиной либо невозможности использования водоотлива в качестве потребителя-регулятора (при выведении в чистку большей по объему ветви и недостаточном регулировочном объеме), либо избыточного регулировочного объема, а соответственно и излишнего объема строительных подземных работ на сооружение водосборника.

Указанный избыточный объем горных работ может быть экономически оправдан при отключении насосов в полупиковый режим. При отсутствии прибыли от этого режима целесообразно устраивать водосборник с равными по объему ветвями.

Все описанные выше преимущества достигаются при условии строгого соблюдения требований действующих нормативных документов относительно технологического процесса откачивания воды из подземных горных выработок.

2.3 Анализ параметров трубопроводной сети главной водоотливной установки

В соответствии с [6], ГВУ должна быть оборудована не менее чем двумя напорными трубопроводами, один из которых является резервным. Количество трубопроводов определяется в соответствии с общим количеством рабочих насосов и предполагаемым количеством параллельно включаемых насосов на один трубопровод (на практике не рекомендуется включать более трех насосов на один трубопровод). Следовательно, на шахтах с большим притоком воды и многоагрегатным водоотливом количество трубопроводов увеличивается, а при их количестве более трех – предусматривается два резервных трубопровода.

В большинстве случаев наиболее энергоэкономичный режим работы насосного агрегата отвечает его работе на один трубопровод или когда два насоса работают на два трубопровода и т.д. Однако на практике на многоагрегатных ГВУ, а также при РРЭ подобные режимы практически не реализуются, например, при наличии четырех рабочих и четырех резервных насосов устанавливается, как правило, три трубопровода. Подобные режимы работы водоотлива приводят к снижению производительности насосов при их параллельной работе на один трубопровод и, предположительно, к увеличению удельного расхода электроэнергии, что подробно рассмотрено в разделе 3.

Рассмотрим пример построения напорных характеристик насосных установок и трубопроводной сети для условного водоотлива, состоящего из 4 рабочих и 4 резервных насосов типа ЦНС 300×300 (рис. 2.4).

По данным рис. 2.4 видно, что в зависимости от режима работы насосной установки изменяется подача и напор в целом. Это влияет на КПД работающего агрегата (а также другие электрические параметры, такие как потребляемый ток I_n и активная мощность P_n) и, как следствие, возможно на расход электроэнергии. По построенным кривым может быть определена подача отдельного или суммарная подача одновременно работающих насосов при включении на любое количество трубопроводов. Следовательно, при включении одного насоса на

один трубопровод, двух на два и т. д. насосные агрегаты работают с номинальными параметрами. При параллельном включении двух и более насосов на один трубопровод производительность каждого из них снижается. Так параллельная работа шести насосов на один трубопровод обеспечивает такую же суммарную производительность что и четыре насоса на два трубопровода, а расход электроэнергии при этом будет возрастать.

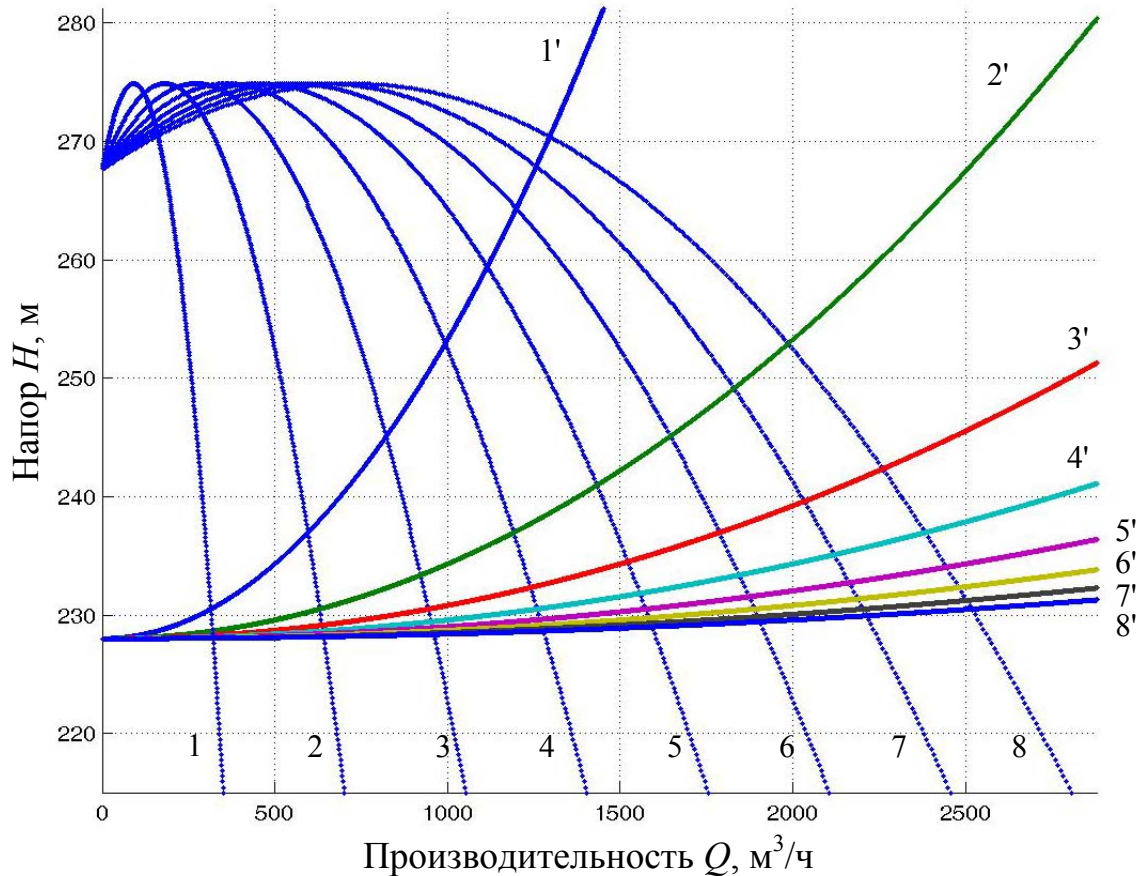


Рис. 2.4. Зависимости $H_n = f(Q)$ и $H_{mp} = f(Q)$ для условно принятой насосной установки: 1–8 и 1'–8' – соответственно количество параллельно работающих насосов и трубопроводов

Поскольку число и диаметр трубопроводов ГВУ принимается исходя из количества рабочих насосов, поэтому возможность использования дополнительно и резервных насосов не учитывается. Использование ГВУ в режиме П-Р неизбежно предусматривает применение РРЭ, а именно необходимость включения резервных насосов на параллельную работу в периоды интенсивной от-

качки воды. На многоагрегатных ГВУ подобная проблема становится острой вдвойне, поскольку на таких установках и без РРЭ рабочие насосы вынуждены работать параллельно.

При этом параллельная работа большого числа насосов на ограниченное количество трубопроводов, что особенно актуально при РРЭ, это не единственный момент отрицательно влияющий на энергоэкономические характеристики работы ГВУ. Дополнительными отрицательными факторами являются также техническое состояние основного оборудования ГВУ, к которому относятся насосные агрегаты и напорные трубопроводы.

Влияние технического состояния оборудования на работу водоотлива рассматривалось учеными НИИГМ им. М.М. Федорова [63, 64], однако, как правило, предлагалось решение этих проблем путем увеличения объема водосборника до 16-часового притока воды, что не может быть экономически обоснованным.

2.3.1 Влияние технического состояния насосов на работу водоотливной установки

В процессе длительной эксплуатации насосного агрегата происходит ухудшение его технического состояния, а следовательно и снижение его КПД [65]. Динамика преобразования напорной характеристики насоса, а соответственно и рабочих параметров при снижении его КПД представлена на рис. 2.5.

На рисунке 2.5 представлена напорная характеристика насоса $H_n = f(Q)$, его КПД $\eta = f(Q)$ и характеристика трубопроводной сети $H_{mp} = f(Q)$, где 1 – рабочая точка насоса на характеристике сети и 2 – рабочая точка насоса на характеристике КПД, которые и определяют рабочие параметры насоса: напор H_1 , производительность Q_1 и КПД η_2 .

При ухудшении технического состояния насоса снижается соответственно и его КПД, т. е. происходит смещение рабочей точки 2 по характеристике КПД. Так при снижении КПД на 10%, 20% и 30%, что соответствует значениям

$\eta_{2H^{(0,9)}}$, $\eta_{2H^{(0,8)}}$ и $\eta_{2H^{(0,7)}}$ рабочая точка 1 смещается по характеристике трубопроводной сети, что в свою очередь приводит к изменению рабочих параметров насоса: напор и производительность при этом будут уменьшаться ($H_{1H^{(0,9)}}$, $H_{1H^{(0,8)}}$, $H_{1H^{(0,7)}}$ и $Q_{1H^{(0,9)}}$, $Q_{1H^{(0,8)}}$, $Q_{1H^{(0,7)}}$).

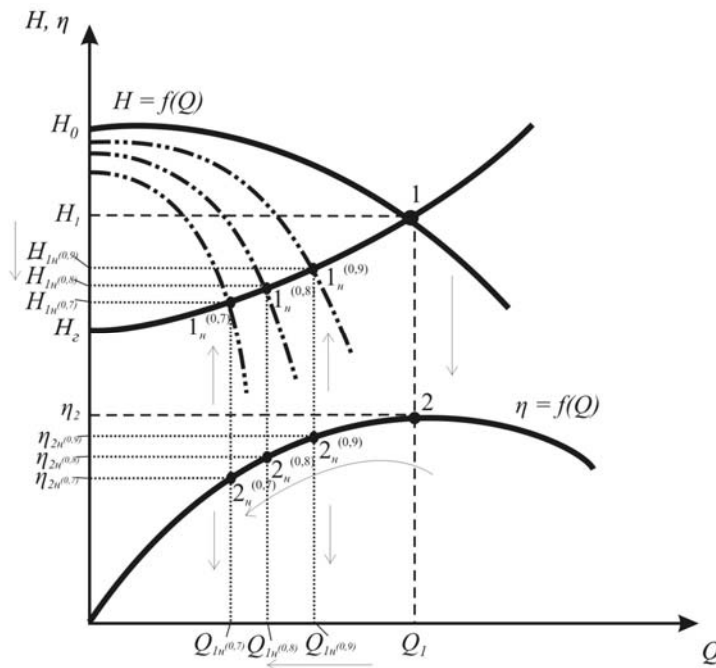


Рис. 2.5. Преобразование напорной характеристики насоса при снижении его КПД

Следовательно, ухудшение рабочих параметров насоса приводит к снижению его производительности и, как следствие, к увеличению общей продолжительности его работы по откачиванию единицы объема воды, что приведет к увеличению расхода электроэнергии на выполнение данной работы (раздел 3).

2.3.2 Влияние технического состояния трубопроводов на работу водоотливной установки

Дополнительным фактором является то, что чрезвычайно высокая минерализация шахтной воды приводит к интенсивному зарастанию трубопроводов твердыми отложениями. Это, в свою очередь, повышает давление в трубах, расход электроэнергии насосами, снижает производительность откачки (рис. 2.6).

Для поддержания ее на проектном уровне потребовалась бы установка дополнительных труб и насосов, а это является очень затратным мероприятием и поэтому мало популярным.

Для избавления труб от минеральных отложений к настоящему времени применяется масса различных способов – механических, химических, гидродинамических.

Известны некоторые механические способы очистки минеральных отложений, которые, в виду своей сложности, применяются эпизодически [66, 67]:

1. Очистка трубопроводов при помощи стальных скребковых очистных устройств. Трубопровод выводится на некоторое время из эксплуатации. В определенном месте линия трубопровода расстыковывается и в трубопровод помещается очистное скребковое устройство. Скорость выполнения работ высокая, если по техническим причинам не застрянет исполнительный орган – скребковое устройство.

2. Очистка с помощью электрогидравлических установок минеральных отложений высокой твердости в трубопроводах протяженностью до 1000 м. Мобильность действия установки определяется длиной электрического кабеля. Качество очистки высокое и работы производятся без остановки технологического процесса. Однако отсутствие объективной информации о величине и твердости отложений не позволяет массово использовать данный способ.

Одним из путей решения существующей проблемы обрастания трубопроводов минеральными отложениями является использование новейшей техники и современных технологий магнитной обработки шахтной жидкости [69, 70], которые позволяют ликвидировать причины, вызывающие отложения. Этот метод особенно актуален для условий горнодобывающей промышленности, когда технологические процессы требуют бесперебойной работы всего водоотливного комплекса, оборудования и оснащения от шахтной насосной до водоотстойника на поверхности. Однако, при этом проблема обрастания трубопроводов минеральными отложениями, все еще является актуальной на многих предприятиях горнодобывающей промышленности.

На рисунке 2.6 представлено преобразование напорной характеристики трубопроводной сети $H_{mp} = f(Q)$ при обрастании трубопровода минеральными отложениями, напорная характеристика насоса $H_n = f(Q)$ и его КПД $\eta = f(Q)$, где 1 – рабочая точка насоса на характеристике сети и 2 – рабочая точка насоса на характеристике КПД, которые и определяют рабочие параметры насоса: напор H_1 , производительность Q_1 и КПД η_2 . При ухудшении технического состояния трубопровода, т. е. уменьшение его внутреннего диаметра, снижается соответственно и его пропускная способность. В следствие этого изменяется сопротивление трубопроводной сети и происходит смещение рабочей точки 1.

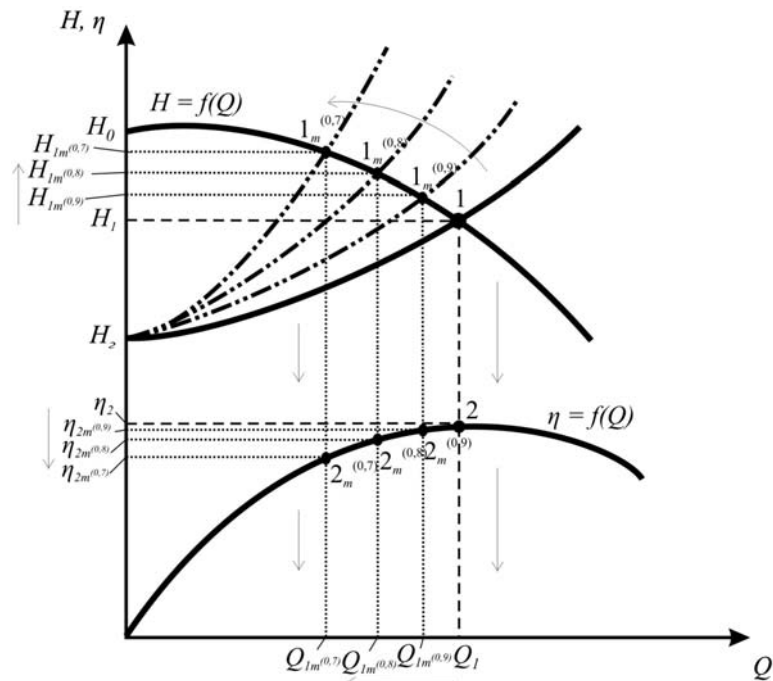


Рис. 2.6. Преобразование напорной характеристики трубопроводной сети при обрастании трубопровода

Так при уменьшении внутреннего диаметра трубопровода на 10%, 20% и 30%, происходит смещение рабочей точки 1 по характеристике насоса, что соответствует значениям новой рабочей точки $1_m^{(0,9)}$, $1_m^{(0,8)}$, $1_m^{(0,7)}$, это в свою очередь приводит к изменению рабочих параметров насоса: напор при этом будет увеличиваться ($H_{1m^{(0,9)}}$, $H_{1m^{(0,8)}}$, $H_{1m^{(0,7)}}$), а производительность – уменьшаться ($Q_{1m^{(0,9)}}$, $Q_{1m^{(0,8)}}$, $Q_{1m^{(0,7)}}$). Изменение рабочей точки 1 приведет и к смещению

точки 2 на характеристике КПД насоса, и соответственно к снижению его величины ($\eta_{2m^{(0,9)}}$, $\eta_{2m^{(0,8)}}$ и $\eta_{2m^{(0,7)}}$).

Следовательно, ухудшение технического состояния трубопровода в следствие обрастания его минеральными отложениями, приводит к снижению пропускной способности, и как следствие невозможность откачивать необходимый объем воды любым количеством насосов. При этом увеличивается общая продолжительности работы по откачиванию единицы объема воды, что как следствие, приводит к увеличению расхода электроэнергии на выполнение данной работы (см. раздел 3).

2.3.3 Совместное влияние технического состояния насосов и трубопроводов на работу водоотливной установки

Одновременное ухудшение технического состояния основного оборудования водоотлива – насосов и трубопроводов приводит к еще более низким показателям эффективной работы ГВУ [71, 65].

На рисунке 2.7 показано ориентировочное преобразование напорной характеристики трубопроводной сети и насоса при одновременном ухудшении их технического состояния.

Так например, в результате обрастания трубопровода на 10 % происходит снижение производительности насоса до 10 %, а ухудшение технического состояния насоса на 10 % может приводить к снижению его производительности до 30 %. Одновременное ухудшение технического состояния этого оборудования на 10 % способствует снижению производительности уже до 45 %. Подобное приводит к необходимости либо использования дополнительного насоса для выполнения работы, рассчитанной на один насос, в результате чего происходит увеличение потребляемой мощности, либо увеличение продолжительности работы по откачиванию воды, что также может приводить к увеличению расхода электроэнергии и снижению возможностей водоотлива в РРЭ (см. раздел 3).

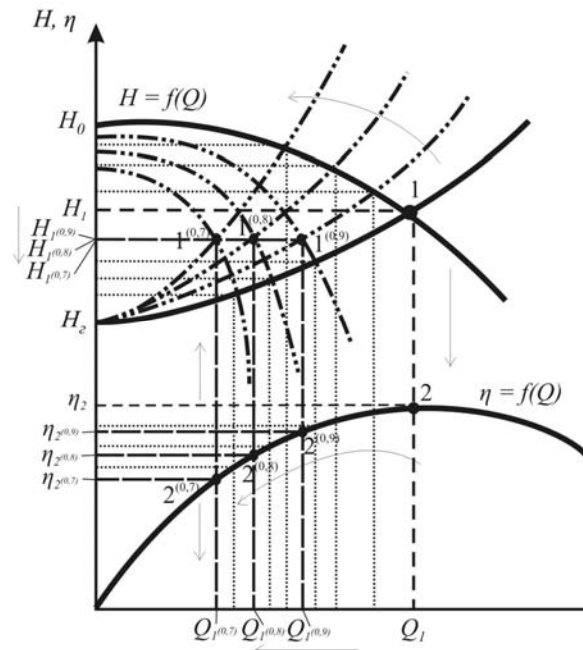


Рис. 2.7. Преобразование напорной характеристики трубопроводной сети и насоса при одновременном ухудшении их технического состояния

Дальнейшее ухудшение рабочих параметров основного оборудования ГВУ приводит к невозможности осуществления ими своих функций, а одновременность этих событий ускоряет данный процесс, и как следствие – затопление шахты.

Следовательно, своевременное восстановление рабочих параметров основного оборудования шахтного водоотлива оказывает большое влияние на эффективность РРЭ, о чем более подробно изложено в разделе 3.

Выводы

1. Разработанный новый способ определения объема водосборника и его ветвей главной водоотливной установки угольных шахт обеспечивает возможность регулирования режимов электропотребления путем отключения насосов в часы максимума нагрузки энергосистемы на протяжении всего года независимо от графика чистки ветвей водосборника, что создает технологические условия повышения эффективности работы главного водоотлива в режиме П-Р.

2. Применение равных по вместимости ветвей водосборника и одновременное увеличение их количества позволяет снизить необходимый для эффективного регулирования объем водосборника и, соответственно, уменьшить объем горно-строительных работ в зависимости от множителя ветвей (рис. 2.1). При неравных по вместимости ветвях водосборника следует учитывать коэффициент их неравенства $K_{н.в}$ и условие (2.4) по аккумулярованию воды. При этом зависимости удельного объема водосборника от количества его ветвей описываются нелинейной функциональной зависимостью. Практическая ценность состоит в том, что при равных по объему ветвях водосборника необходимая его емкость меньше на величину от 1,15 до 0,93 м³ на 1 м³/ч притока воды по сравнению с неравными.

3. Анализ режимов работы насосов совместно с гидравлической сетью показывает взаимосвязь изменяющихся параметров, характеризующих основные свойства технологического процесса откачки воды. Такие параметры следует отнести к распределенным во времени. Образованное множество свойств является основой для последующего проведения исследований в области оптимизации по критерию удельного расхода электроэнергии. Такие исследования являются сложными и требуют применения вариационного исчисления.

4. Выборочные расчеты показывают, что параллельная работа насосов на ограниченное количество трубопроводов способствует снижению их индивидуальной производительности, что приводит к необходимости увеличения числа включаемых насосов и, как следствие, к возрастанию удельного расхода электроэнергии.

5. Из рис. 2.5–2.7 следует, что ухудшение технического состояния насосов и трубопроводной сети приводит к изменению их рабочих параметров. При этом увеличивается продолжительность выполняемой работы и, как следствие, возрастает расход электроэнергии на выполнение того же объема полезной работы, что ограничивает возможность эффективного использования главного водоотлива в режиме П-Р.

РАЗДЕЛ 3

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЛАВНОГО ВОДООТЛИВА В РЕЖИМЕ ПОТРЕБИТЕЛЯ-РЕГУЛЯТОРА

3.1 Принципы регулирования режимов электропотребления шахтного водоотлива

Энергоэффективность функционирования шахтного водоотлива напрямую зависит от регулирования режимов электропотребления насосными установками. РРЭ целесообразно осуществлять при использовании одноставочного дифференцированного по времени суток тарифа (см. п. 1.2), когда исключается работа основного оборудования ГВУ в периоды максимума нагрузок в энергосистеме [72, 73]. Пример графика электрических нагрузок ГВУ с двумя насосами номинальной мощностью $P_n = 500$ кВт и напряжением $U_n = 6$ кВ каждый и емкостью водосборника 1500 м^3 при применении РРЭ представлен на рис. 3.1.

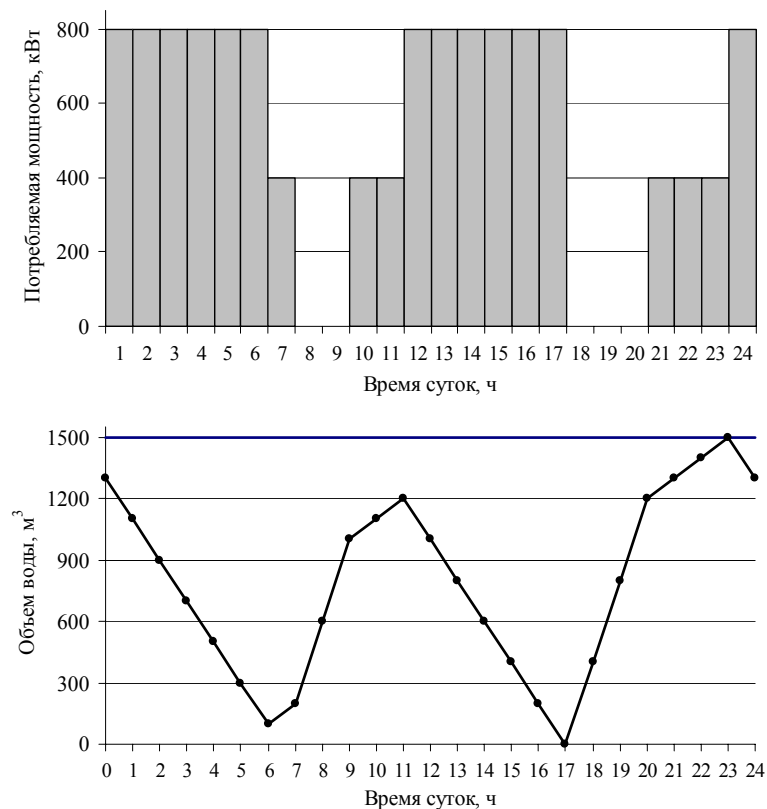


Рис. 3.1. Графики электрических нагрузок и заполнения водосборника ГВУ при применении РРЭ

При данном режиме работы ГВУ достигается экономия денежных средств на оплату за потребленную электроэнергию за счет исключения работы насосов в периоды максимальных нагрузок, когда стоимость электроэнергии максимальная. Высокая эффективность применения данных мероприятий достигается при достаточной емкости водосборника, что не для всех шахт является доступным (см. п. 2.1).

Сооружение дополнительного объема водосборника требует вложения немалых денежных средств, что может оказаться не совсем рентабельным для шахт с малым притоком и малоагрегатным водоотливом. Для таких шахт эффективность РРЭ, по сравнению с затратами на сооружение дополнительной емкости водосборника, может быть не значительна. Поэтому для этих условий возможен режим работы ГВУ без РРЭ, т. е. наполнение-опустошение водосборников выполняется "по уровню" (рис. 3.2).

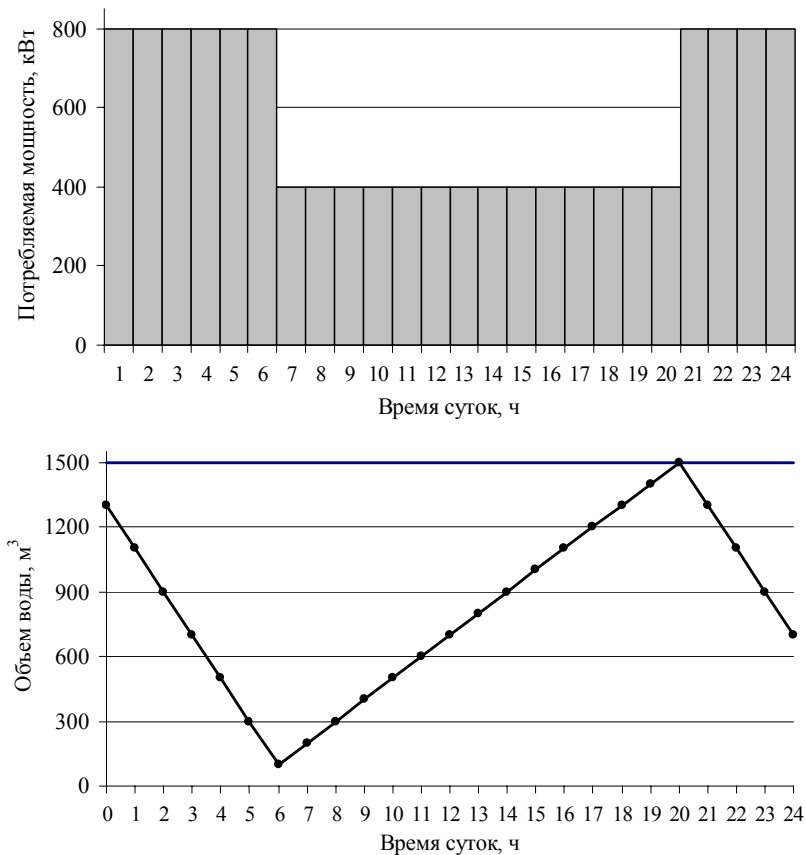


Рис. 3.2. Графики электрических нагрузок и заполнения водосборника ГВУ без применения РРЭ

Применение РРЭ само по себе, безусловно, направлено на выравнивание графика электрических нагрузок (ГЭН) энергосистемы и получение экономии денежных средств на оплату за потребление электроэнергии для предприятий. Однако, эффективность данных мероприятий напрямую зависит от ряда технологических условий функционирования ГВУ (см. раздел 2), корректирование и учет которых позволит повысить энергетическую и экономическую эффективность использования водоотлива в режиме П-Р.

3.2 Алгоритм функционирования главной водоотливной установки в режиме потребителя-регулятора

Главная водоотливная установка угольной шахты относится к сложной кибернетической системе, то есть к системе, не имеющей простых описаний, поскольку наряду с большими количествами используемых элементов и параметров, применяемых для ее описания, существует значительное их разнообразие (не сводящееся к простым закономерностям), а также большое разнообразие и нерегулярность связей между элементами. Эффективное исследование таких систем классическими дедуктивными методами оказывается практически невозможным. Экспериментальный метод в этом случае применим в весьма ограниченных пределах или вообще невозможен для условий действующего предприятия. Исследование сложных производственных систем требует получения и анализа огромного объема информации в виде одномерных и многомерных массивов. Для указанных условий основным методом исследований является имитационное моделирование, превратившимся в результате появления быстродействующих универсальных ЭВМ в новое универсальное орудие научного познания [74]. Имитационное моделирование основано на применении т.н. имитационных моделей. Такие модели по существу являются простым переложением на машинный язык описаний моделируемых систем. Специальные программы, обслуживающие модель, генерируют различные конкретные реализации входного сигнала моделируемой системы и строят в соответствии с вве-

денным в ЭВМ описанием системы (включая ее начальное состояние) выходной сигнал. Далее, как в обычном (натурном) эксперименте, полученные результаты обрабатываются с помощью специальных программ, строящих, например, гистограммы распределения тех или иных величин, характеризующих поведение исследуемой системы, определяющих различные качественные характеристики, и т.п. Таким способом прежде всего решаются задачи анализа сложных систем.

Функционирование шахтного водоотлива определяется режимом его работы, который зависит от ряда параметров и условий, таких как шахтный приток воды, объем водосборника, параметры основного оборудования ГВУ и т. п., а также управлением этим режимом.

Таким образом, энергоэффективность E функционирования главного водоотлива в режиме П-Р, с учетом влияния на нее технических и технологических условий работы, представлена в виде функционала J , как математического понятия, возникшего в вариационном исчислении переменной величины, заданной на множестве функций, т. е. зависящей от выбора одной или нескольких функций [74].

Полученный функционал представляет зависимость от ограниченного множества функций и реализуется методом вариационного исчисления с помощью разработанной имитационной модели путем выбора экстремального (минимального) значения, что относится к оптимизационным методам:

$$E = J(Q_{np}, H_w, V_{вод}, Q_p, H_p, N_n, \eta_n, N_m, R_{эк}, w_0, C_w),$$

где Q_{np} – фактический приток воды в шахту, м³/ч;

H_w – горизонт водоотлива, м;

$V_{вод} = f(Q_{np}, K_3, t_m)$ – объем водосборника (м³), величина которого зависит от водопритока (Q_{np}), заиливания (K_3) и продолжительности наибольшего максимума нагрузок в энергосистеме (t_m), и определяется выражением (3.1 или 3.2);

$Q_p = f(H_w, R_{эк}, N_n, N_m, Z_k)$ – рабочая производительность насоса ($\text{м}^3/\text{ч}$), которая зависит от горизонта водоотлива (H_w), эквивалентного сопротивления внешней трубопроводной сети ($R_{эк}$), количества параллельно работающих насосов (N_n) на определенное количество трубопроводов (N_m) и от количества ступеней (колес) насоса (Z_k), и определяется выражением (3.8);

$R_{эк} = f(\xi, D_{мп})$ – эквивалентное сопротивление внешней трубопроводной сети ($\text{ч}^2/\text{м}^5$), которое зависит от коэффициента гидравлического сопротивления внешней сети установки (ξ) и диаметра напорного трубопровода ($D_{мп}$), и определяется выражением (3.3);

$H_p = f(Q_p, Z_k)$ – рабочий напор, создаваемый насосом (м), который зависит от рабочей производительности насоса (Q_p) и эквивалентного сопротивления внешней трубопроводной сети ($R_{эк}$), и определяется выражением (3.9);

$\eta_n = f(Q_p)$ – коэффициент полезного действия насосов, который зависит от рабочей производительности насоса (Q_p) и определяется выражением (3.10);

$w_0 = f(Q_p, P_n, N_n)$ – удельный расход электроэнергии ($\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$), который зависит от рабочей производительности насосов (Q_p), потребляемой электрической мощности (P_n) и соответствующего количества параллельно работающих насосов (N_n), и определяется выражениями (3.12 и 3.15);

$C_w = f(P_n, N_n, C_0)$ – плата за потребляемую электроэнергию (грн/ $\text{кВт}\cdot\text{ч}$), которая зависит от потребляемой электрической мощности (P_n) соответствующим количеством параллельно работающих насосов (N_n) и стоимости электроэнергии (C_0) в соответствующие периоды суток.

Моделирование режимов работы шахтного водоотлива осуществляется с помощью имитационного моделирования [75, 76]. В результате чего разработан алгоритм функционирования ГВУ в режиме П-Р, который позволяет получить множество возможных режимов функционирования водоотлива при заданных условиях и ограничениях, и выбрать из этого множества энергоэкономичный режим.

При разработке имитационной модели главного водоотлива были приняты следующие допущения:

1. Приток воды в течение промежутка времени, на котором выполняется моделирование, равномерен, т.е. уравнение заполнения водосборников линейно. Приток воды в шахту в течение года может варьироваться в широких пределах в зависимости от изменения природных (весенне–осеннее увеличение притока) и технологических (например, разработка новых горизонтов) условий функционирования предприятия. Однако интервал времени существенного изменения притока воды в шахту значительно больше интервала времени, на котором выполняется моделирование ГЭН (сутки), поэтому это допущение может быть принято.

2. Параметры насосов и трубопроводов (напор, подача, гидравлическое сопротивление) для каждого совместного режима их работы в течение промежутка времени, на котором выполняется моделирование, постоянны.

3. Откачка воды с горизонта выполняется насосами одного типа. Такие насосные агрегаты имеют одинаковые номинальные параметры (напор, подача, электрическая мощность и др.), и поэтому значительно упрощается алгоритм моделирования их ГЭН. Моделирование выполняется для одноступенчатого водоотлива.

На рисунке 3.3 представлена блок-схема алгоритма моделирования режимов функционирования ГВУ в режиме П-Р, в соответствии с которой последовательность операций следующая:

1. Начало.

2. Задаются исходные данные и начальные условия:

t_n – интервал возможных переключений насосных агрегатов, т.е. время изменения их режима работы (принимается 15 мин, 30 мин, 1 час и т. д.), ч;

T_p – интервал времени, для которого выполняется моделирование (наиболее целесообразный интервал – одни сутки), ч;

V_0 – начальный объем воды в водосборнике (принимается), м³;

Q_0 – нормальный приток воды, м³/ч;

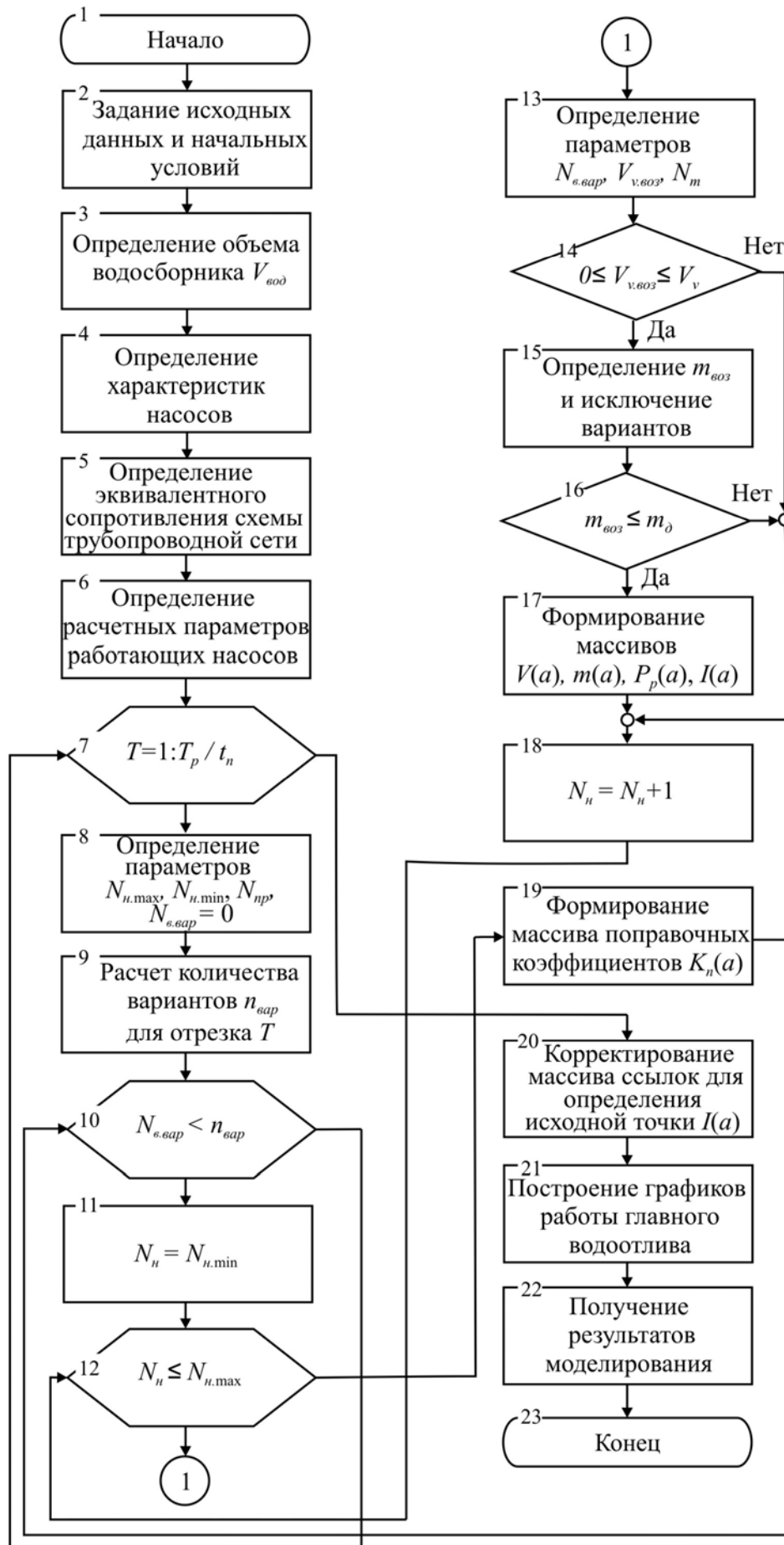


Рис. 3.3. Алгоритм моделирования режимов работы ГВУ

$n_{\text{в}}, V_{\text{vi}}$ – количество и объем каждой из ветвей водосборника, м³;

H_{w} – горизонт водоотлива (полная высота подъема воды), м;

$N_{\text{м.раб}}, N_{\text{м.рез}}, D_{\text{мп}}$ и K_d – количество рабочих, резервных напорных трубопроводных ставов, их диаметр (мм), а также коэффициент фактического диаметра трубопровода;

$D_{\text{мп.в}}$ – диаметр всасывающих трубопроводов (мм);

$N_{\text{н.раб}}, N_{\text{н.рез}}, \eta_{\text{д}}$ и K_{η} – количество рабочих, резервных насосов водоотлива, КПД их двигателей (о.е.) и коэффициент фактического КПД насосов;

$\eta_{\text{с}}$ – КПД электрической сети, принимается равным 0,97 [48];

$m_{\text{д}}$ – число включений насосов за время T_p . Величина $m_{\text{д}}$ определяется для исключения вариантов с большим числом включений насосных агрегатов, т. к. такой режим работы приводит к уменьшению ресурса и преждевременному выходу из строя самих насосов и приводных двигателей. Ограничение количества включений насосов продиктовано значительными пусковыми токами приводных асинхронных двигателей, которые даже на напряжении $U_{\text{н}} = 6$ кВ могут достигать значений $I_{\text{н}} = 500$ А при номинальной мощности до $P_{\text{н}} = 1250$ кВт. Поэтому принимаем, например, число включений насосных агрегатов в сутки не более $m_{\text{д}} = (N_{\text{н.раб}} + N_{\text{н.рез}}) \cdot 2$;

$H_{\text{н.у}}, K_{\text{н.у}}$ – начало и конец утреннего периода пиковых нагрузок относительно суточного интервала времени;

$H_{\text{н.в}}, K_{\text{н.в}}$ – начало и конец вечернего периода пиковых нагрузок относительно суточного интервала;

$H_{\text{нн.у}}, K_{\text{нн.у}}$ – начало и конец утреннего периода полупиковых нагрузок относительно суточного интервала;

$H_{\text{нн.д}}, K_{\text{нн.д}}$ – начало и конец дневного периода полупиковых нагрузок относительно суточного интервала;

$H_{\text{нн.в}}, K_{\text{нн.в}}$ – начало и конец вечернего периода полупиковых нагрузок относительно суточного интервала;

$k_{\text{н}}, k_{\text{нн}}, k_{\text{н}} и T_{\text{эн}}$ – тарифные коэффициенты для каждого периода суточных нагрузок (о.е.) и тариф на электроэнергию (грн/кВт·ч);

3. Определяется рабочая вместимость водосборника V_v в зависимости от конкретных условий, учитывая допустимое заиления и процесс чистки водосборника:

- для действующих ГВУ:

$$V_v = \sum_1^{n_6} V_{6.i} - V_{6.\max}, \text{ м}^3; \quad (3.1)$$

где $V_{6.\max}$ – максимальная по объему ветвь водосборника, м^3 .

- для реконструируемых и проектируемых ГВУ (см. п. 2.2) [59]:

$$V_v = K_3 t_m Q_{\max}, \text{ м}^3; \quad (3.2)$$

где: $K_3 = 1,15$ – среднее значение заиления ветви водосборника от максимально допустимого, равного 30%;

$t_m = 4$ ч – наибольшая длительность одного периода прохождения максимума нагрузки в энергосистеме;

Q_{\max} – максимальное значение часового шахтного притока воды, $\text{м}^3/\text{ч}$.

4. По работам [77, 78] в зависимости от типа применяемых насосов (ЦНС, ЦНСШ или НСШ) и сечения трубопроводов определяются следующие параметры:

$Q_{\text{ном}}, H_{\text{ном}}$ – номинальные подача ($\text{м}^3/\text{ч}$) и напор (м) насосов водоотлива;

$H_{0к}$ – напор насоса при нулевой подаче на одно колесо, м;

A, B – постоянные коэффициенты уравнения напорной характеристики насосного агрегата;

a, b, c – постоянные коэффициенты уравнения кривой КПД насоса;

Z_k – количество ступеней (колес) насоса;

5. Определяется эквивалентное сопротивление внешней трубопроводной сети для стандартной кольцевой схемы трубопроводного коллектора с учетом зарастания трубопровода [77, 79]:

$$R_{\text{эк}} = \frac{8\xi}{3600^2 \pi^2 g (K_d D_{mp})^4}, \text{ ч}^2/\text{м}^5, \quad (3.3)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²;

ξ – коэффициент гидравлического сопротивления внешней сети установки.

$$\xi = \xi_{\text{вс}} \left(\frac{K_d D_{mp}}{D_{\text{тр.в}}} \right)^4 + \xi_{\text{н}} + 1, \quad (3.4)$$

где $\xi_{\text{вс}} \left(\frac{K_d D_{mp}}{D_{\text{тр.в}}} \right)^4$ – коэффициент гидравлического сопротивления всасывающего трубопровода, приведенный к диаметру напорного трубопровода ($D_{\text{тр.в}}$);

$\xi_{\text{н}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления напорного трубопровода.

$$\xi_{\text{вс}} = \xi_{\text{нк}} + 3\xi_{\text{к90}} + \lambda_{\text{вс}} \frac{L_{\text{вс}}}{D_{\text{тр.в}}}, \quad (3.5)$$

где $\xi_{\text{нк}}$ – коэффициент сопротивления приемного клапана с защитной сеткой;

$\lambda_{\text{вс}}$ – коэффициент гидравлического трения во всасывающем трубопроводе;

$L_{\text{вс}}$ – общая длина всасывающего трубопровода, м;

$\xi_{\text{к90}}$ – коэффициент сопротивления колена при повороте потока на 90°;

$$\xi_{\text{н}} = \xi_{\text{о.к}} + 2\xi_3 + 3\xi_{\text{к90}} + \xi_{\text{к}\alpha_1} + \xi_{\text{к}\alpha_2} + \xi_{\text{T1}} + 2\xi_{\text{T2}} + \lambda_{\text{н}} \frac{L_{\text{н}}}{K_d D_{\text{мп}}}, \quad (3.6)$$

где $\xi_{\text{о.к}}$ и ξ_3 – коэффициенты сопротивления обратного клапана и полностью открытой задвижки;

$\xi_{\text{к90}}$, $\xi_{\text{к}\alpha_1}$, $\xi_{\text{к}\alpha_2}$ – коэффициенты сопротивления колена при повороте потока соответственно на 90°, угол α_1 и α_2 ;

ξ_{T1} и ξ_{T2} – коэффициенты сопротивления тройников при входе потока из ответвления и для проходного потока;

λ_n – коэффициент гидравлического трения в напорном трубопроводе;

L_n – общая длина напорного трубопровода, м.

Введенный коэффициент фактического диаметра трубопровода (K_d) характеризует его действительный внутренний диаметр, который изменяется в процессе эксплуатации трубопроводной сети. Изменение (уменьшение) диаметра трубопроводов ($K_d < 1$) приводит к увеличению сопротивления трубопроводной сети, и, как следствие, происходит смещение рабочей точки и изменение рабочих параметров насосов. Подобные изменения напрямую отражаются на технико-экономических показателях работы ГВУ, т. е. при увеличении степени обрастания трубопровода также может увеличиваться удельный расход электроэнергии.

В процессе моделирования режимов работы водоотлива возможно уточнять действительный диаметр трубопровода посредством коэффициента уменьшения диаметра трубопровода (K_d). Поскольку протяженность всасывающего трубопровода, по сравнению с напорным, мала, достаточно для сравнительного анализа уточнить диаметр только напорного трубопровода.

- при $K_d = 1$ – степень зарастания принимается равной нулю, т. е. происходит соответствие обратному показателю – коэффициенту зарастания трубопровода K_{zm} ;

- при $K_d < 1$ – фактический (действительный) диаметр трубопровода, с учетом любой степени обрастания, может указываться индивидуально для каких-либо условий (0...0,99):

$$D_{ф.мп} = K_d D_{мп} . \quad (3.7)$$

6. Определяются расчетные значения подачи, напора, КПД, коэффициента использования насоса и удельный расход электроэнергии в зависимости от числа работающих насосов и трубопроводов [77, 78]:

$$Q_{p(N_n, N_m)} = \frac{Z_\kappa A + \sqrt{Z_\kappa A^2 + 4 \left(R_{\text{эк}} \frac{N_n^2}{N_m^2} + Z_\kappa B \right) (Z_\kappa H_{0\kappa} - H_w)}}{2 \left(R_{\text{эк}} \frac{N_n^2}{N_m^2} + Z_\kappa B \right)}; \quad (3.8)$$

$$H_{p(N_n, N_m)} = Z_\kappa \left(H_{0\kappa} + A Q_{p(N_n, N_m)} - B Q_{p(N_n, N_m)}^2 \right); \quad (3.9)$$

$$\eta_{n(N_n, N_m)} = a Q_{p(N_n, N_m)} - b Q_{p(N_n, N_m)}^2 + c Q_{p(N_n, N_m)}^3; \quad (3.10)$$

$$K_{u.n(N_n, N_m)} = \frac{Q_{p(N_n, N_m)}}{Q_{\text{ном}}}; \quad (3.11)$$

$$w_{(N_n, N_m)} = 0,0027778 \frac{Z_\kappa}{\eta_\delta \eta_c} \left(\frac{H_{0\kappa} + A Q_{p(N_n, N_m)} - B Q_{p(N_n, N_m)}^2}{a Q_{p(N_n, N_m)} - b Q_{p(N_n, N_m)}^2 + c Q_{p(N_n, N_m)}^3} \right). \quad (3.12)$$

В процессе длительной эксплуатации насосного агрегата происходит ухудшение его технического состояния, а соответственно снижение его КПД и производительности, т. е. необходимо выполнять пересчет рабочих параметров насосов с учетом их технического состояния. Следовательно, фактический (действительный) КПД насосов будет определяться как:

$$\eta_{n.\phi} = K_\eta \eta_{n(N_n, N_m)}. \quad (3.13)$$

Введенный коэффициент K_η , который определяет степень снижения КПД насоса относительно рабочего значения, позволяет определить влияние ухудшения технического состояния насосов на величину удельного расхода электроэнергии:

– при $K_\eta = 1$ – степень ухудшения технического состояния насосов принимается равной нулю, то есть их КПД отвечает рабочим значениям;

– при $K_\eta < 1$ – фактический (действительный) КПД насосов, с учетом любой степени ухудшения его технического состояния, может задаваться индивидуально для любых условий (0...99).

При этом подходе уточняется фактическое для каких-либо конкретных условий значение КПД насосов, но для корректного определения величины удельного расхода электроэнергии необходимо решить обратную задачу, т. е. пересчитать рабочие параметры насосов, которые имеют сниженный (скорректированный) КПД.

Представим (3.13) в виде кубического уравнения:

$$\begin{aligned} d &= ax - bx^2 + cx^3; \\ cx^3 - bx^2 + ax - d &= 0, \end{aligned} \quad (3.14)$$

где $x = Q_{p(N_n, N_m)}$ – корни кубического уравнения;

$d = \eta_{н.ф}$ – действительный КПД насосов.

Данное кубическое уравнение решается методом Виета-Кардано [80]. Нахождение его корней позволяет скорректировать рабочие параметры насосных установок при ухудшении их технического состояния, и соответственно более точно рассчитать удельный расход электроэнергии, значение которого также зависит от данных условий.

7. Задается цикл по $T = 1 : T_p / t_n$ для расчета количества возможных переключений насосов через время изменения их режима работы t_n .

Для формирования режимов работы водоотлива определяется потребляемая электрическая активная мощность одного насоса:

$$P_{одн} = \frac{\gamma g Q_{p(N_n, N_m)} H_{p(N_n, N_m)}}{1000 \cdot 3600 \eta_{н(N_n, N_m)} \eta_{д} \eta_{с}}, \quad (3.15)$$

где (N_n, N_m) – режим работы насосов, соответствующий работе N_n насосов на N_m трубопроводов.

8. Определяются параметры цикла по количеству насосов $N_{н.мин}$ и $N_{н.маx}$ и обнуляется счетчик возможных вариантов $N_{в.вар}$. При этом в моделировании на текущем отрезке T можно использовать все насосы, т.е. $N_{н.мин} = 0$,

$N_{н.маx} = N_{н.раб} + N_{н.рез}$. Определение минимально необходимого числа работающих насосов на текущем отрезке T зависит от периода суток и уровня максимальных нагрузок в энергосистеме (период пиковых, полупиковых и ночных нагрузок). Следовательно в периоды пиковых нагрузок (утренний и вечерний пик) $N_{н.мин} = 0$, а $N_{н.маx} = 0$ или $N_{н.маx} = N_{нр}$ при емкости водосборника, недостаточной для накопления воды за период максимума (где $N_{нр}$ – минимальное число насосов, суммарная производительность которых компенсирует часовой приток воды). В период полупиковых нагрузок допускается $N_{н.мин} = N_{нр}$, а $N_{н.маx} = N_{н.раб}$. Соответственно в ночную зону $N_{н.мин} = N_{нр}$, а $N_{н.маx} = N_{н.раб} + N_{н.рез}$, т. е. в период минимальных нагрузок в энергосистеме откачка воды будет осуществляться всегда (при условии ее наличия в водосборнике).

9. Рассчитывается количество возможных вариантов $n_{вар}$ для текущего отрезка T для ограничения перебора точек. В общем случае:

$$n_{вар} = (n_{(T-1)} - n_{(T-2)}) (N_{н.маx} - N_{н.мин} + 1), \quad (3.16)$$

где $n_{(T-1)}$ и $n_{(T-2)}$ – количество полученных точек на предыдущем отрезке и перед ним соответственно.

При $T = 1$ количество возможных вариантов $n_{вар}$ определяется только вторым множителем уравнения (3.16).

10. Задается цикл с условием по количеству возможных вариантов, операции внутри которого проводятся до тех пор, пока $N_{в.вар} < n_{вар}$. Таким образом рассчитываются все возможные для данного отрезка T точки, из которых отбрасывают те, что не попадают в область возможных режимов работы ГВУ.

11. Для начала цикла по количеству насосов принимается $N_n = N_{н.мин}$.

12. Задается цикл с условием по количеству насосов, операции внутри которого проводятся до тех пор, пока $N_n \leq N_{н.маx}$, т.е. из каждой полученной на предыдущем отрезке T точки строится пучок из $(N_{н.маx} - N_{н.мин} + 1)$ прямых.

13. Определяется новое значение счетчика вариантов $N_{в.вар}$ и возможный объем воды в водосборнике с учетом изменяемого количества работающих насосов и трубопроводов:

$$N_{в.вар} = N_{в.вар} + 1;$$

Изменение количества трубопроводов N_m зависит от числа работающих насосов N_n , т. е. при $N_n > N_{m.раб}$ возникает необходимость (по технико-экономическим характеристикам) в подключении резервных трубопроводов ($N_{m.раб} + N_{m.рез}$).

Возможный объем воды в водосборнике $V_{v.воз}$ определяется в зависимости от интервала изменения режима работы водоотлива t_n , т. е. при отключении всех насосов ($N_n = 0$):

$$V_{v.воз} = V_0 + Q_0 t_n, \quad (3.17)$$

а при $N_n > 0$:

$$V_{v.воз} = V_0 + (Q_0 - Q_{p(N_n, N_m)} N_n) t_n. \quad (3.18)$$

В общем виде выражение будет иметь следующий вид:

$$V_{v.воз} = V_{(T-1)} + (Q_0 - Q_{p(N_n, N_m)} N_n) t_n, \quad (3.19)$$

где $V_{(T-1)}$ – объем воды в водосборнике на предыдущем отрезке для определения текущей точки, м³. При $T = 1$ объем воды в водосборнике $V_{(T-1)} = V_0$.

14. Осуществляется проверка рассчитанного в п. 13 значения $V_{v.воз}$ на попадание в область возможных режимов работы водоотливной установки, т. е. объем воды в водосборнике должен находиться в пределах от нулевой отметки до верхней границы водосборника V_v , по условию:

$$0 \leq V_{v.603} \leq V_v. \quad (3.20)$$

Далее выполняется расчет текущего режима (п. 15), при его невыполнении – точка отбрасывается и выбирается следующее значение количества насосов (п. 18).

15. Определяется количество включений насосных агрегатов для возможного варианта m_{603} и проводится его уточнение для исключения заведомо невыполнимых при данном значении ограничения m_δ режимов:

$$m_{603} = m_{(T-1)} + \left(N_n - \frac{P_{P(T-1)}}{P_{одн}} \right), \quad (3.21)$$

где $m_{(T-1)}$ – количество включений насосных агрегатов до отрезка T для данного режима. При $T = 0$ количество включений насосных агрегатов $m_{(T-1)} = N_n$. Расчет по выражению (3.21) выполняется при условии, что текущее число насосов больше работавших на предыдущем интервале, т. е. включения выполняются при условии:

$$N_n > P_{P(T-1)} / P_{одн};$$

где $P_{P(T-1)}$ – расчетная электрическая мощность водоотливной установки для предыдущего отрезка T , кВт.

Исключение из моделирования точек с $m_{603} > m_\delta$ позволяет значительно сократить затраты машинного времени и ограничить количество реализаций ГЭН. Действительно, можно отбросить из расчета точки и выходящие из них пучки прямых, например, при выполнении следующих условий:

- количество возможных включений насосов уже равно допустимому и к моменту окончания расчетного интервала времени T_p (т. е. окончание суточного интервала) невозможно не допустить переполнения водосборников без включе-

ния дополнительных насосов (3.23), а также избежать режима работы насосов при уровне воды в водосборнике $V_{v.603} < 0$ (3.24):

$$m_{603} = m_{\partial}; \quad (3.22)$$

$$V_{v.603} + (Q_0 - Q_{p(N_n, N_m)} N_{np}) \cdot (T_p - Tt_n) > V_v; \quad (3.23)$$

$$V_{v.603} + (Q_0 - Q_{p(N_n, N_m)} (N_{np} + 1)) \cdot (T_p - Tt_n) < 0; \quad (3.24)$$

- количество возможных включений насосов не превышает допустимого, но при этом на момент окончания расчетного интервала времени T_p невозможно не допустить переполнения водосборников оставшимся возможным (не превышающим допустимого) количеством включений насосных агрегатов:

$$(m_{\partial} - m_{603}) + N_n; \quad (3.25)$$

$$V_{v.603} + (Q_0 - Q_{p(N_n, N_m)} (N_n + m_{\partial} - m_{603})) \cdot (T_p - Tt_n) > V_v. \quad (3.26)$$

Точки, не попавшие под условия ограничений, считаются "рабочими" точками (a), которые принимают дальнейшее участие в моделировании режимов работы ГВУ. Для рабочих точек, входящих в данный расчетный интервал ($a = a+1$; $V(a) = V_{v.603}$) выполняется определение расчетных параметров потребляемой насосами электрической мощности:

- при $N_n = 0$:

$$P_p(a) = 0; \quad (3.27)$$

- при $N_n > 0$:

$$P_p(a) = \frac{\gamma g Q_{p(N_n, N_m)} H_{p(N_n, N_m)}}{1000 \cdot 3600 \eta_{n(N_n, N_m)} \eta_{\partial} \eta_c} N_n. \quad (3.28)$$

Следовательно, параметры режимов работы водоотлива определяются для каждой последующей расчетной точки $(a+1)$ отстраиваясь от предыдущей точки (a) .

16. Выполняется проверка рассчитываемого режима по допустимому количеству включений насосных агрегатов:

$$m_{603} \leq m_{\partial}. \quad (3.29)$$

При выполнении условия (3.29) проводится дальнейший расчет и формирование массивов (п. 17), при невыполнении – точка отбрасывается и выбирается следующее значение количества насосов (п. 18).

17. Определяется порядковый номер точки a и одномерные массивы данных (векторы) дополняются новыми значениями для точки a : объема воды в водосборнике $V(a)$, потребляемой мощности водоотливом $P_p(a)$, количества включений насосных агрегатов $m(a)$ и ссылок для определения исходной точки $I(a)$. Необходимость формирования первых трех массивов очевидна, а вектор $I(a)$ создается для обеспечения правильного определения исходной точки на предыдущем отрезке T , из которой и выходит прямая рассчитываемого варианта. В этом пункте также присваивается новое значение коэффициенту корректирования K_{κ} :

$$a = a + 1; \quad (3.30)$$

$$V(a) = V_{v.603}; \quad (3.31)$$

$$m(a) = m_{603}; \quad (3.32)$$

$$P_p(a) = \frac{\gamma g Q_{p(N_n, N_m)} H_{p(N_n, N_m)}}{1000 \cdot 3600 \eta_{n(N_n, N_m)} \eta_{\partial} \eta_c} N_n;$$

$$I(a) = I(a - 1) + 1; \quad (3.33)$$

$$K_{\kappa} = I(a). \quad (3.34)$$

18. Выполняется переход на следующее количество насосов:

$$N_n = N_n + 1. \quad (3.35)$$

19. После перебора всех вариантов по числу насосных агрегатов проводится формирование одномерного массива поправочных коэффициентов K_n :

$$K_n(a) = K_k - I(a). \quad (3.36)$$

Элементы массива K_n рассчитываются только при условии $K_k - I(a) > 1$. Именно поэтому значение K_n определяется не для каждой точки a , так как указанное условие выполняется только в том случае, если ни одна из точек пучка прямых не попадает в область возможных вариантов работы водоотлива. Тогда исходная точка на предыдущем интервале времени может быть определена неверно из-за изменения значения ссылки на нее, что приведет к некорректной работе всего алгоритма и моделированию принципиально невозможных ГЭН. Поэтому появляется необходимость в формировании еще одного массива K_n .

20. После выполнения расчета всех точек и завершения формирования массивов данных проводится корректирование массива ссылок для определения исходной точки $I(a)$ (при соблюдении условия (3.37)):

$$K_n(a) \neq 0; \quad (3.37)$$

$$I(a) = I(a) + K_n(a). \quad (3.38)$$

21. Для приведенных условий и ограничений определяется количество возможных вариантов работы водоотлива с возможностью построения графиков работы ГВУ.

22. По сформированным массивам данных получают результаты, которыми могут быть:

- построение схемы всех возможных вариантов работы водоотливной установки для заданных условий, а также определение из них вариантов с циклическим режимом работы насосов водоотлива на протяжении интервала моделирования T_p ;

- построение любого из возможных графиков наполнения водосборников и соответствующий ему график электрических нагрузок ГВУ;

- определение суммарного количества включений насосов для любого из смоделированных режимов $m(e)$, где e – расчетная точка режима на последнем отрезке времени расчетного (суточного) интервала;

- определение значения объема воды в водосборнике $V(a)$, мощности, потребляемой водоотливом $P_p(a)$, и количество включений насосов $m(a)$ для любой точки a отрезка T ;

- получение режима с минимальным удельным расходом электроэнергии при условии минимизации оплаты за потребленную электроэнергию, а также определение количества моделируемых вариантов, соответствующих данным критериям, которое определяется путем введения процентного ограничения от минимального значения;

- для выбранного (текущего) режима определяется плата за потребленную электроэнергию за сутки; определяется общий расход электроэнергии за сутки; определяется удельный расход электроэнергии по графику и средневзвешенный расход электроэнергии по характеристикам насосов;

- осуществление контроля за численным значением удельного расхода электроэнергии и сравнение его с предыдущим, дает возможность сделать выводы относительно причин изменения этого параметра (это могут быть и минеральные отложения в трубопроводах, т. е. их обрастание, и ухудшение технического состояния насосных агрегатов, и т. п.).

23. Окончание.

В качестве примера на рисунке 3.4 приведены, удовлетворяющие условиям моделирования, схемы возможных режимов работы ГВУ в виде множества режимов работы водоотлива при одинаковых начальных (заданных) параметрах

и условиях ($N_n = 2$, $t_n = 1$ ч., $T_p = 24$ ч, количество включений насосов на суточном интервале ограничено до 6). При объеме воды в водосборнике в начале суток $t_0 = 0$ ч., который равняется $V_0 = 1200$ м³ (задаем), предлагается три варианта работы насосов: 0 – не работает ни один насос, 1 – работает один, 2 – работает два насоса, а также возможное изменение режима работы насосных агрегатов каждый час (t_n). При этом моделирование режимов работы насосных агрегатов выполняется в определенных границах параметров водосборника и с заданными требованиями относительно отключения насосов в периоды максимальной нагрузки энергосистемы (в пиковую зону П).

В общем случае область всех возможных режимов работы ГВУ ограничена прямоугольником, сторонами которого являются: по вертикали – ось объема воды в водосборнике V (момент начального времени) и прямая конечного времени T_p , в течение которого выполняется моделирование режимов работы (целесообразно принимать суточный интервал); по горизонтали – ось времени t , ниже которой насосы работают вхолостую, и прямая, ограничивающая допустимый для заполнения объем водосборника V_v , выше которой наблюдается его переполнение.

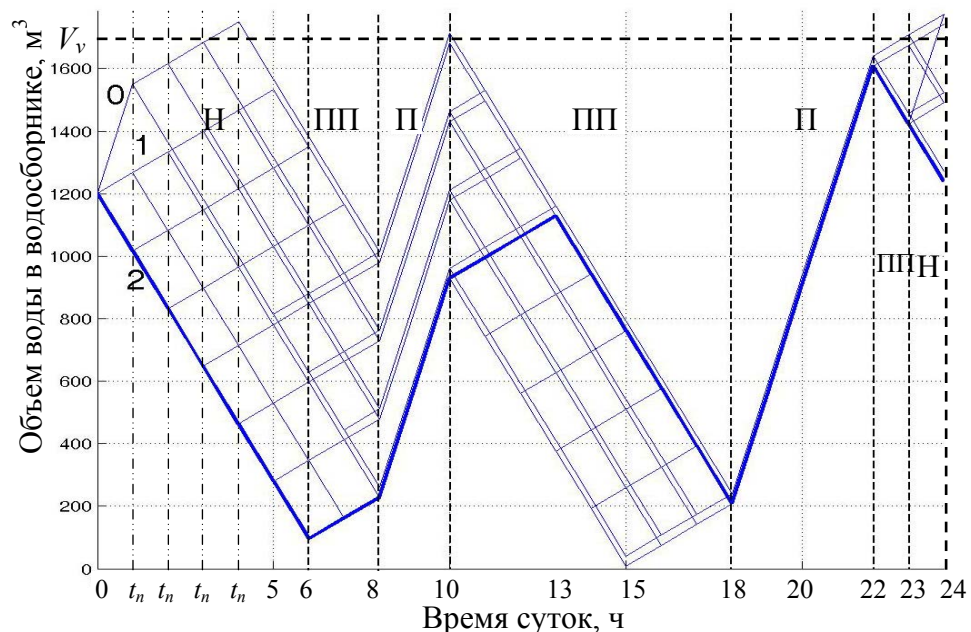


Рис. 3.4. Схемы возможных режимов функционирования ГВУ с двумя насосами

Жирными ломаными линиями (рис. 3.4) в качестве примера выделен один из возможных циклических режимов функционирования водоотливной установки на суточном интервале. При котором в ночной период Н с 00⁰⁰ до 06⁰⁰ ч и с 23⁰⁰ до 24⁰⁰ ч – работают два насоса; в период полупиковых нагрузок ПП с 06⁰⁰ до 08⁰⁰ ч и с 10⁰⁰ до 13⁰⁰ ч – работает один насос, а с 13⁰⁰ до 18⁰⁰ ч и с 22⁰⁰ до 23⁰⁰ ч – работают два насоса; в период максимальных (пиковых) нагрузок П с 08⁰⁰ до 10⁰⁰ ч и с 18⁰⁰ до 22⁰⁰ ч – насосы не работают.

3.3 Результаты моделирования режимов электропотребления

Приведенный в п. 3.3 алгоритм моделирования режимов функционирования ГВУ в качестве П-Р [81, 82] позволяет с помощью полученных результатов определить наиболее энергоэкономичный режим работы водоотлива для любых условий.

Рассмотрим пример моделирования режимов работы ГВУ шахты с параметрами: горизонт водоотлива – 210 м; шахтный водоприток – 350 м³; водосборник общей емкостью – 1540 м³; насосы ЦНС 300-300 – 4; напорные трубопроводы диаметром 250 мм – 2 (рабочий и резервный).

- Построение схемы всех возможных вариантов работы водоотливной установки для заданных условий (рис. 3.5), которых получилось 653319 (при условии включения только трех насосов): из полученного количества вариантов – 71996 циклических режимов.

- Определение значения объема воды в водосборнике, мощности, потребляемой водоотливом, и количество включений насосов для любой точки отрезка T для построения любого из возможных циклических графиков наполнения водосборников и соответствующий ему график электрических нагрузок ГВУ (рис. 3.6).

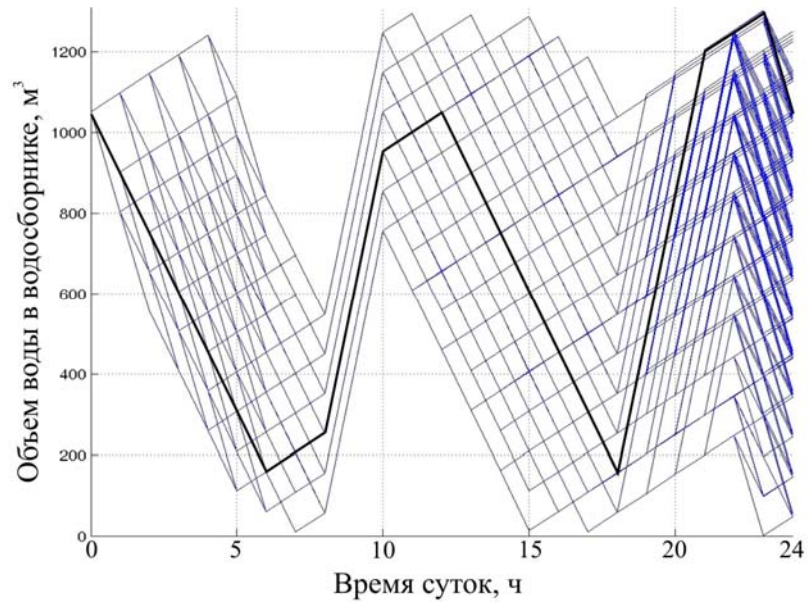


Рис. 3.5. Варианты возможных режимов функционирования ГВУ (при работе трех насосов)

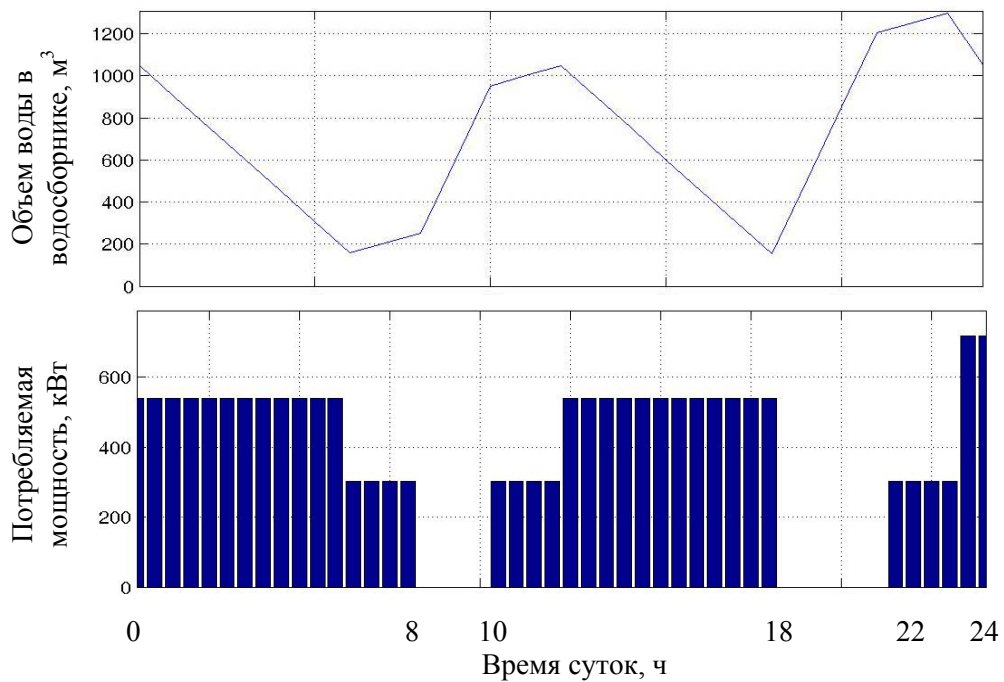


Рис. 3.6. График наполнения водосборника и соответствующий ему график электрических нагрузок ГВУ (при работе трех насосов)

- Получение режима с минимальным удельным расходом электроэнергии при условии минимальной оплаты за потребленную электроэнергию, а также определение количества моделируемых вариантов соответствующих данным критериям.

Минимальный удельный расход, для данных условий, составляет $1,0721 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ при условии минимальной оплаты за электроэнергию 8349 грн. При этом, для возможного режима с минимальным удельным расходом электроэнергии ($1,0428 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$) оплата составляет 8963 грн, что соответствует отклонению от минимального значения на 7,4 %.

Путем введения процентного ограничения от минимального значения критерия (удельный расход электроэнергии и оплата за электроэнергию) определяется количество графиков для заданных условий, поскольку минимальному значению удельного расхода электроэнергии может не соответствовать минимальное значение оплаты за ее потребление. Так при учете графиков с отклонением в 3% (величина задается) от минимального значения искомого критерия, определяется количество графиков удовлетворяющее двум условиям – 544. Например, удельный расход электроэнергии по графику (одному из 544) (рис. 3.6) составляет $1,0721 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ (что соответствует отклонению 2,8% от минимального значения) при минимальной оплате за электроэнергию 8349 грн в сутки.

- Для выбранного (текущего) режима определяется также общий расход электроэнергии за сутки; средневзвешенный расход электроэнергии по характеристикам насосов; объем откачиваемой воды за сутки.

В результате анализа более 30 реализаций режимов функционирования шахтного водоотлива установлено, что величина оплаты за потребленную главным водоотливом суточную электроэнергию при РРЭ и использовании дифференцированного тарифа зависит от начального уровня воды в водосборнике и может быть снижена на величину до 10% при уровне воды, близком к максимальному. Это объясняется тем, что при наличии воды в водосборнике в начале суток на минимальном уровне интенсивность работы насосов будет минимальна, поскольку придется лишь компенсировать часовой приток, хотя тариф будет минимальный, а основная работа будет приходиться на полупиковый период для необходимости опустошения водосборников перед периодами максимальных нагрузок. Однако, наличие воды в водосборнике в начале суток на максимальном уровне обеспечит необходимость интенсивной работы насосов в

ночной период (при минимальном тарифе) для опустошения водосборников к утреннему максимуму, что приведет к снижению объема работы насосов, происходящего на полупиковый период.

3.4 Зависимость эффективности работы главной водоотливной установки от технического состояния ее основного оборудования

К основному оборудованию ГВУ можно отнести водосборники, насосы и трубопроводную сеть. Ухудшение технического состояния водосборников снижает энергоэффективность использования водоотлива в режиме П-Р (см. п. 2.2). В свою очередь ухудшение технического состояния насосов и трубопроводов напрямую отразится на процессе откачивания воды (см. п. 2.4), и, как следствие, на увеличении удельного расхода электроэнергии. Приведенный в п. 3.2 алгоритм функционирования ГВУ позволил установить зависимости влияния изменения технического состояния насосов и трубопроводов на величину удельного расхода электроэнергии.

Введение коэффициента фактического диаметра трубопровода K_d позволило определить влияние степени уменьшения внутреннего диаметра трубопровода на изменение величины удельного расхода электроэнергии (рис. 3.7) [81, 83].

Представленная на рис. 3.7 зависимость (на примере ГВУ ш. "им. Героев Космоса") подтверждает необходимость своевременного контроля за техническим состоянием трубопроводной сети, которая подвержена разрушительному воздействию агрессивных шахтных вод, с целью повышения энергетической эффективности функционирования ГВУ в режиме П-Р. Причем, контроль возможно осуществлять по интенсивности увеличения удельного расхода электроэнергии и напору, который также увеличивается при уменьшении внутреннего диаметра трубопровода вследствие его обрастания минеральными отложениями (п. 2.3.2).

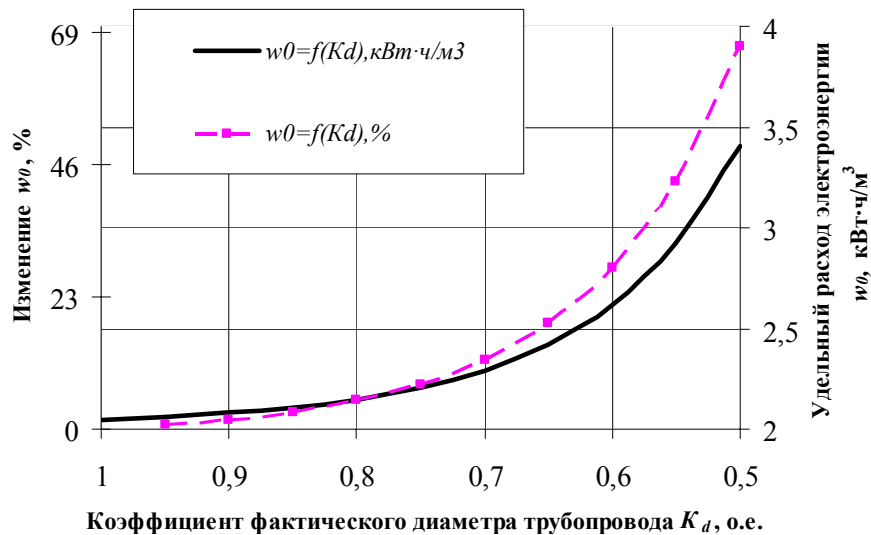


Рис. 3.7. Зависимость удельного расхода электроэнергии от изменения внутреннего диаметра трубопровода

Увеличение удельного расхода электроэнергии на 1,69%, 4,99% или 12,01% и т.д. (рис. 3.7, пунктирная линия) может свидетельствовать об обростании трубопроводов вследствие минеральных отложений на 10%, 20% или 30% соответственно, что отвечает фактическому внутреннему диаметру трубопровода и составляет $0,9D_{mp}$, $0,8D_{mp}$ или $0,7D_{mp}$ соответственно.

Введение коэффициента фактического КПД насосов K_η (п. 3.2) [81, 83] позволило определить влияние степени ухудшения технического состояния насосов на изменение величины удельного расхода электроэнергии (рис. 3.8).

Приведенная на рис. 3.8 зависимость (на примере ГВУ ш. "им. Героев Космоса") свидетельствует о значительном влиянии технического состояния насосов на энергетические характеристики работы всего водоотлива, что подтверждает необходимость своевременного контроля рабочих параметров насосных агрегатов.

Контроль возможно осуществлять по интенсивности увеличения удельного расхода электроэнергии и напору, который незначительно уменьшается при ухудшении рабочих параметров насосов вследствие ухудшения их технического состояния (п. 2.3.1).

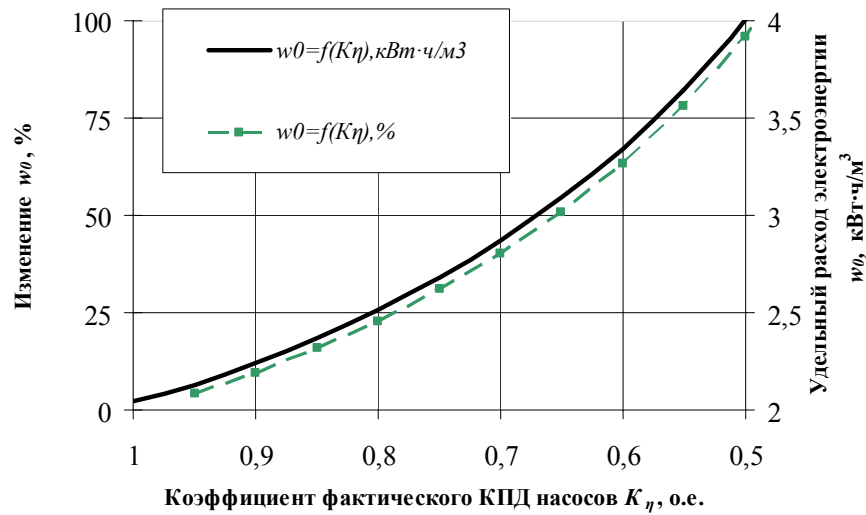


Рис. 3.8. Зависимость удельного расхода электроэнергии от ухудшения технического состояния насосов

Увеличение удельного расхода электроэнергии на 9,44%, 22,83% или 40,21% и т.д. (рис. 3.8, пунктирная линия) может свидетельствовать об ухудшении технического состояния насосов на 10%, 20% или 30% соответственно, т. е. фактический КПД насосов при этом будет составлять $0,9\eta$, $0,8\eta$ или $0,7\eta$ соответственно.

Рассмотрим приведенные на рис. 3.7, 3.8 зависимости для условий главных водоотливных установок 10-ти шахт Западного Донбасса (рис. 3.9, 3.12), которые получены посредством реализации приведенного в п. 3.2 алгоритма моделирования режимов работы насосов водоотлива. Полученные зависимости отображают характер влияния технического состояния насосов и трубопроводной сети на энергетические показатели функционирования водоотлива в условиях конкретных объектов.

Обобщить зависимости на рис. 3.9 возможно описав их полиномиальной функцией четвертого порядка, представленной на рис. 3.10.

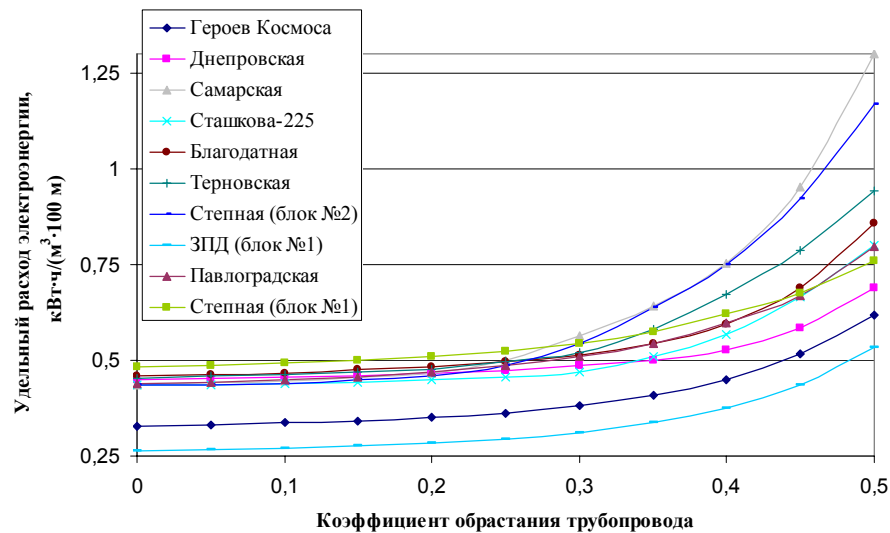


Рис. 3.9. Зависимости удельного расхода электроэнергии от степени обрастания трубопроводов в результате минеральных отложений для шахт Западного Донбасса

Полученная на рис. 3.10 функция имеет достаточно низкую достоверность аппроксимации (0,5972), что объясняется широким диапазоном изменения величин притоков по шахтам. Путем структурирования шахт по величине водопритока ($\leq 100 \text{ м}^3/\text{ч}$ и более $100 \text{ м}^3/\text{ч}$) возможно повысить достоверность до 0,8513 и 0,7708 соответственно (рис. 3.11).

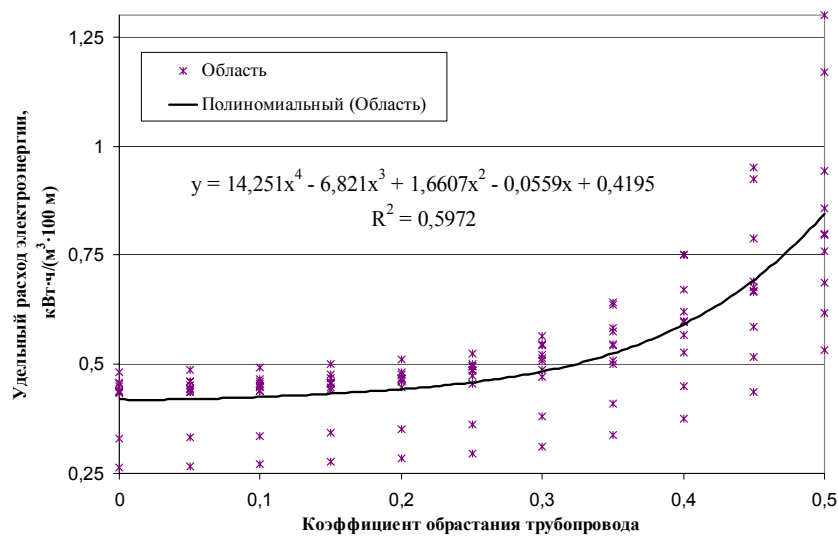


Рис. 3.10. Обобщенная зависимость удельного расхода электроэнергии от степени обрастания трубопроводов для шахт Западного Донбасса

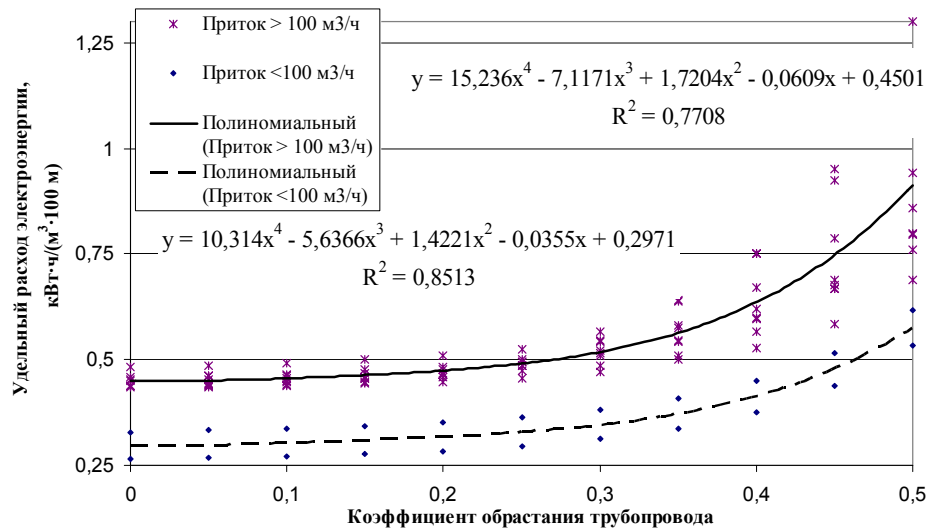


Рис. 3.11. Обобщенные зависимости удельного расхода электроэнергии от степени обрастания трубопроводов для шахт Западного Донбасса для притоков $\leq 100 \text{ м}^3/\text{ч}$ и более $100 \text{ м}^3/\text{ч}$

Данные функциональные зависимости возможно применять для контроля и прогнозирования состояния трубопроводной сети на какой-либо шахте Западного Донбасса. Задавая в качестве неизвестной величины удельный расход электроэнергии в нормальных условиях на какой-либо конкретной шахте, получим зависимость изменения искомых параметров для заданных условий (рис. 3.9). Таким образом полученные уравнения позволяют определить по величине удельного расхода электроэнергии причину его изменения, например в случае обрастания трубопровода. Кроме этого, также возможно построение прогнозируемой зависимости изменения удельного расхода электроэнергии вследствие ухудшения технического состояния трубопроводной сети для условий любой шахты Западного Донбасса [83, 84].

Подобное обобщение возможно выполнить и относительно изменения технического состояния насосов и влияния этого процесса на энергетические показатели работы шахтного водоотлива.

На рис. 3.12 представлены зависимости изменения величины удельного расхода электроэнергии от степени ухудшения технического состояния насосов в условиях шахт Западного Донбасса.

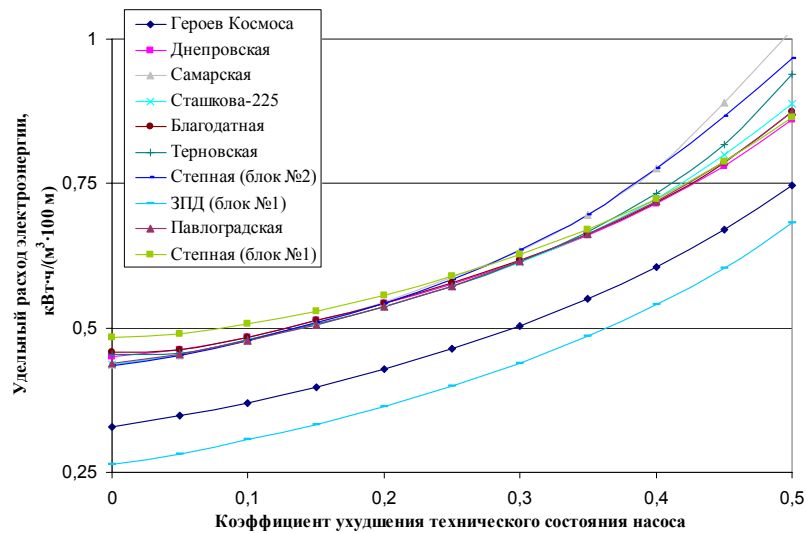


Рис. 3.12. Зависимости удельного расхода электроэнергии от степени ухудшения технического состояния насосов для шахт Западного Донбасса

Обобщим полученные зависимости на рис. 3.12, описав их полиномиальной функцией третьего порядка, представленной на рис. 3.13.

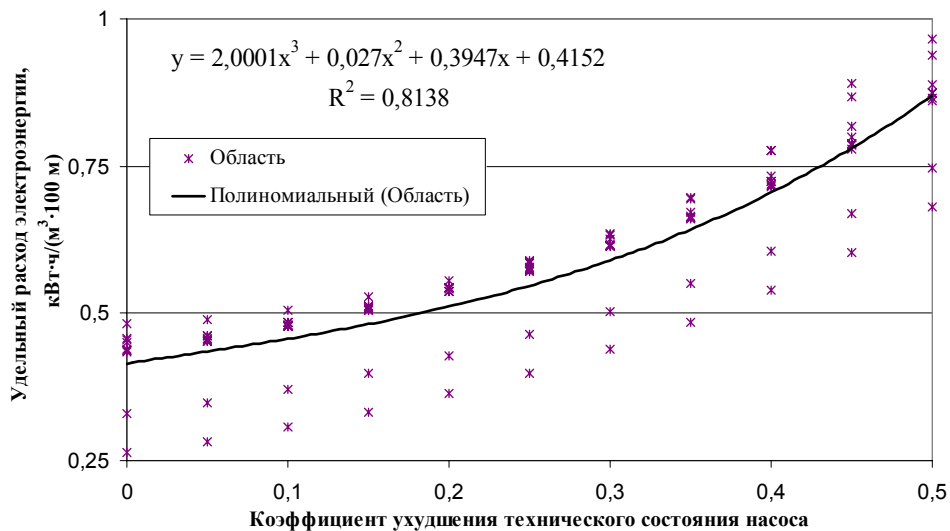


Рис. 3.13. Обобщенная зависимость удельного расхода электроэнергии от степени ухудшения технического состояния насосов для шахт Западного Донбасса

Полученная функция имеет не достаточно высокую достоверность аппроксимации, равную 0,8138, поскольку из группы рассмотренных шахт выде-

ляются две, имеющие малый водоприток, равный $100 \text{ м}^3/\text{ч}$, и характеризующиеся, соответственно, низким удельным расходом электроэнергии.

Повысить достоверность аппроксимации полученной полученных результатов возможно также путем структурирования шахт по величине водопритока ($\leq 100 \text{ м}^3/\text{ч}$ и более $100 \text{ м}^3/\text{ч}$). В результате чего достоверность аппроксимации повысится до 0,9417 и 0,9752 соответственно (рис. 3.14).

Полученные функциональные зависимости (рис. 3.14) возможно применять для своевременного контроля, по изменению величины удельного расхода электроэнергии, и прогнозирования возможного ухудшения технического состояния насосов в условиях любой шахты Западного Донбасса [83, 84]. Задавая в качестве неизвестной величины удельный расход электроэнергии в нормальных условиях на любой конкретной шахте, получим зависимость изменения искомых параметров для заданных условий (рис. 3.12).

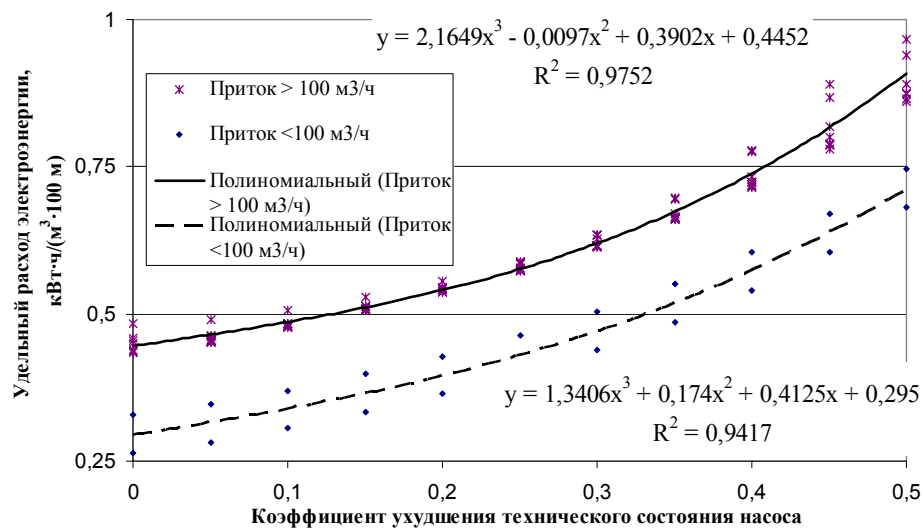


Рис. 3.14. Обобщенные зависимости удельного расхода электроэнергии от степени ухудшения технического состояния насосов для шахт Западного Донбасса для притоков $\leq 100 \text{ м}^3/\text{ч}$ и более $100 \text{ м}^3/\text{ч}$

Следовательно, влияние технического состояния насосов и трубопроводной сети на величину удельного расхода электроэнергии в процессе функционирования ГВУ очевидно, поэтому использование полученных зависимостей

(рис. 3.11 и 3.14) на практике позволит избежать перерасхода электроэнергии и осуществлять своевременный контроль состояния оборудования, что в свою очередь отразится на эффективности работы водоотлива .

3.5 Оценка влияния количества трубопроводов на эффективность регулирования электропотребления главной водоотливной установки

Использование шахтного водоотлива в режиме П-Р подразумевает применение РРЭ, на эффективность которого могут оказывать влияние некоторые факторы. Так например, работа ГВУ в режиме П-Р предусматривает отключение насосов в часы максимума нагрузки в энергосистеме и соответственно увеличение количества работающих агрегатов в остальное время суток. Как правило, откачать накопленную в пиковый период воду, а также текущий часовой приток не всегда возможно используя только рабочие насосы. В таких случаях возникает необходимость в использовании дополнительно резервных насосов, что увеличивает количество параллельно работающих насосов на один трубопровод и приводит к снижению эффективности работы насосных агрегатов (см. раздел 2). Показателем эффективности работы водоотливной установки является удельный расход электроэнергии, величина которого напрямую зависит от вышеперечисленных условий.

Рассмотрим характер зависимости удельного расхода электроэнергии от режима работы ГВУ при возможности увеличения количества используемых в работе трубопроводов. Так например, включение восьми насосов на один трубопровод при различной высоте подъема (300, 600 и 900 м) приводит к резкому увеличению расхода электроэнергии, т. е. характер изменения величины которого носит экспоненциальный характер (рис. 3.15). При этом, увеличение количества рабочих трубопроводов до двух-четырех приводит к резкому уменьшению кривизны кривой, характер которой стремится к линейной зависимости.

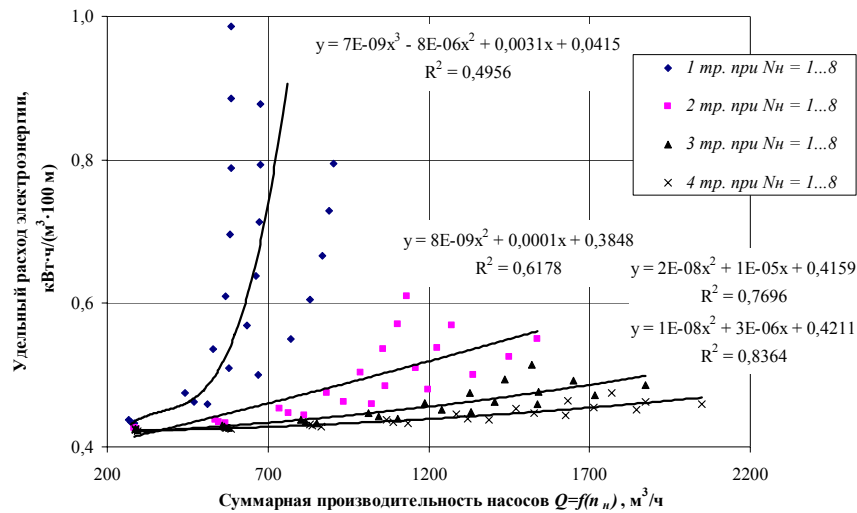


Рис. 3.15. Зависимость удельного расхода электроэнергии от количества рабочих трубопроводов (при $D_{tr} = 250/300$ мм для малых притоков)

На рисунке 3.15 приведены зависимости величины удельного расхода электроэнергии на 100 м высоты подъема воды от количества рабочих трубопроводов (при $D_{tr} = 250/300$ мм для малых притоков). Увеличение количества трубопроводов, находящихся в работе, до двух приведет к снижению удельного расхода электроэнергии приблизительно от 2,3 % до 38,1 % в зависимости от количества работающих насосов (1-8).

Соответствующее увеличение трубопроводов до трех или четырех позволит снизить удельный расход электроэнергии, по сравнению с вариантом использования одного рабочего трубопровода, от 2,8 % до 47,9 % или от 2,9 % до 51,7 % соответственно. Причем увеличение количества трубопроводов, находящихся в работе, более трех не приносит значительного эффекта, а разница в снижении удельного расхода электроэнергии при использовании четырех трубопроводов по сравнению с тремя составляет от 0,2 % до 7,3 %. Характеристика трубопроводной сети при четырех рабочих трубопроводах является практически горизонтальной, что может свидетельствовать о нецелесообразности увеличения количества трубопроводов более четырех (рис. 3.15).

На рисунке 3.16 приведены зависимости величины удельного расхода электроэнергии на 100 м высоты подъема воды от количества рабочих трубо-

проводов (при $D_{mp} = 300/350$ мм для больших притоков). Характер изменения величины удельного расхода электроэнергии в соответствии с количеством используемых в работе трубопроводов не зависит от притока, который отражается лишь на значении удельного расхода. Наличие больших притоков предполагает установку трубопроводов большего диаметра, что увеличивает пропускную способность установки и улучшает рабочие параметры насосов. Т. е. форма кривых на рис. 3.15 и 3.16 одинакова при различных параметрах ГВУ.

Увеличение количества трубопроводов, находящихся в работе, до двух, трех или четырех, по сравнению с вариантом использования одного рабочего трубопровода, приведет к снижению удельного расхода электроэнергии приблизительно от 0,9 % до 27,7 %, от 1,1 % до 33,9 % или от 1,2 % до 36,1 % соответственно, в зависимости от количества работающих насосов (1-8).

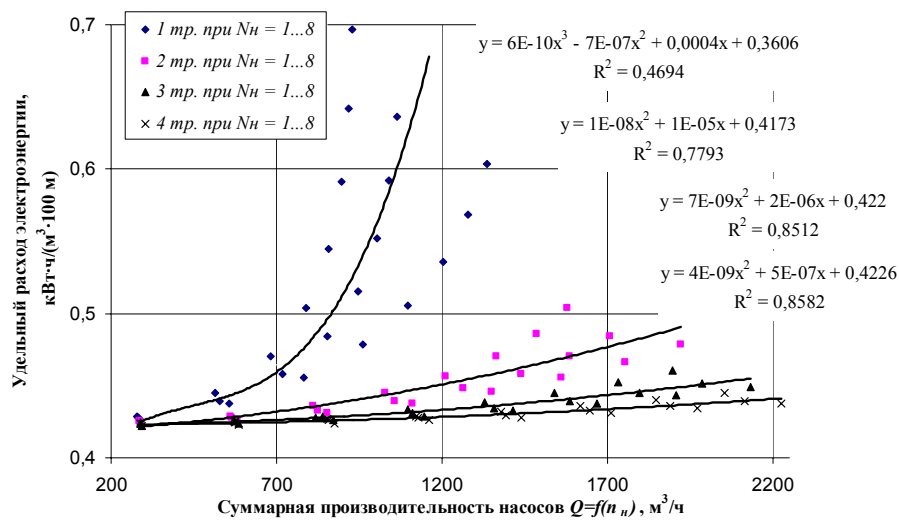


Рис. 3.16. Зависимость удельного расхода электроэнергии от количества рабочих трубопроводов (при $D_{mp} = 300/350$ мм для больших притоков)

Разница в снижении удельного расхода электроэнергии при использовании четырех трубопроводов по сравнению с тремя составляет от 0,1 % до 3,4 %, поэтому увеличение количества трубопроводов более четырех может быть нецелесообразным (рис. 3.16).

3.6 Энергоэффективное управление главной водоотливной установкой

Управление режимами работы ГВУ угольной шахты возможно осуществлять с помощью способа, схема которого приведена на рис. 3.17 и который позволяет получить наиболее энергоэкономичный режим функционирования водоотлива с учетом действительных параметров его оборудования [82, 83].

В блоке 1 задания исходных данных и начальных условий осуществляется ввод необходимой информации для конкретных условий и конкретной шахты, т. е. горизонт водоотлива, общий объем водосборника, количество и диаметр трубопроводных ставов, количество насосов, их номинальные параметры, а также ограничивается общее количество включений насосов.

В блоке 2 определения параметров ГВУ осуществляется расчет рабочего объема водосборника с учетом заилиения, а также определяются параметры напорной характеристики трубопроводной сети и характеристики насосов.

В блоке 3 определения и уточнения сопротивления трубопроводной сети определяется эквивалентное сопротивление для стандартной кольцевой схемы с возможностью уточнения фактического внутреннего диаметра трубопровода.

В блоке 4 уточнения рабочих параметров насосных установок выполняется определение, в зависимости от режима, рабочих параметров насосов, а также возможен их пересчет с учетом фактического технического состояния оборудования. Основным параметром, характеризующим качественную работу насоса, является его КПД, который зависит как от режима работы агрегата, так и от его технического состояния.

В блоке 5 моделирования режимов работы ГВУ выполняется формирование режимов ее работы с учетом технологических и технических параметров состояния конкретного объекта.

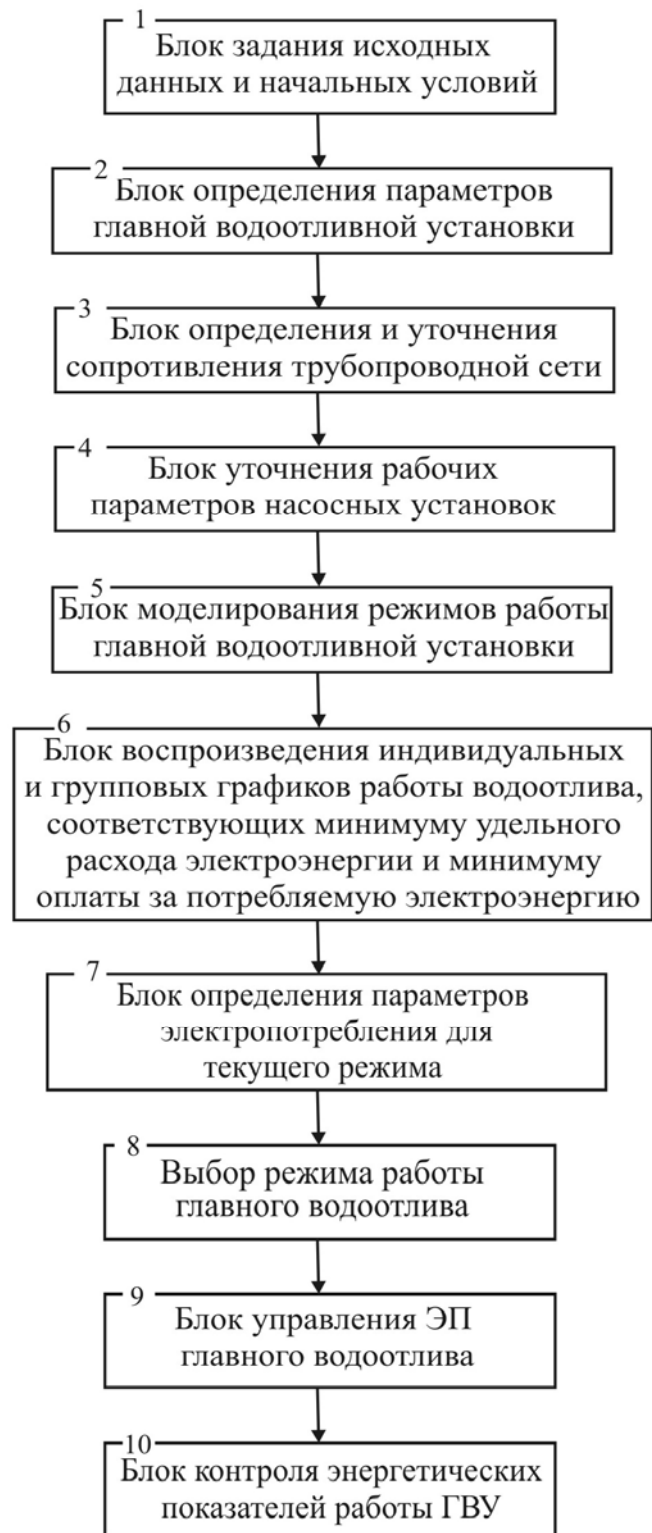


Рис. 3.17. Схема мониторинга параметров главной водоотливной установкой угольной шахты

В блоке 6 воспроизведения индивидуальных и групповых графиков работы водоотлива, которые соответствуют минимуму удельного расхода электроэнергии и минимуму оплаты за потребленную электроэнергию выполняется пе-

ребор смоделированных вариантов режимов работы и выбор из них циклических режимов для заданного периода времени. Среди полученного количества циклических графиков выбираем режим работы водоотлива, который соответствует критерию минимального удельного расхода электроэнергии при минимальной величине оплаты за потребленную электроэнергию.

Здесь имеется возможность воспроизведения графиков работы водоотлива, значения данных критериев которых отличаются от минимального значения на некоторый процент, величина которого может задаваться на усмотрение ответственного персонала (как правило это 1%). Поскольку значение критерия минимального удельного расхода электроэнергии не всегда соответствует минимальной оплате за потребленную электроэнергию, поэтому данный подход расширяет возможность выбора подходящего режима работы ГВУ для конкретных условий.

В блоке 7 определения параметров электропотребления для каждого текущего режима рассчитывается величина удельного расхода электроэнергии, общий расход электроэнергии и оплата за ее потребление в течение суток, общий объем воды, который был откачан в течение суток и др.

В блоке 8 выбора режима работы главного водоотлива выполняется выборка среди смоделированных графиков работы ГВУ в пределах заданного процентного ограничения от минимального значения величины удельного расхода электроэнергии (блок 6), режима функционирования водоотлива.

В блоке 9 управления электроприемниками главного водоотлива осуществляется реализация информации, полученной на выходе блока 8, которая направляется к ответственному персоналу, в случае реализации выбранного режима работы ГВУ вручную, или данный режим реализуется автоматически, при наличии соответствующей системы управления.

В блоке 10 контроля энергетических показателей работы ГВУ осуществляется контроль основного энергетического показателя – удельного расхода электроэнергии. Контроль за численным значением удельного расхода электроэнергии, сравнение его с предыдущим значением и анализ динамики измене-

ний, дает возможность сделать выводы относительно причин изменения этого параметра (см. п. 3.4). Выводы и решение касательно последующих действий принимает обслуживающий технический персонал.

Разработанный и приведенный в данном разделе алгоритм позволяет осуществлять управление работой главной водоотливной установкой по средством энергоэффективного регулирования режимов электропотребления водоотлива. При этом энергоэффективность зависит от технических и технологических условий, выполнение которых может сопровождаться дополнительными затратами (см. раздел 2). Поэтому имеется необходимость в определении области эффективного РРЭ, а также условий, при которых данные решения не реализуемы. Более детально этот вопрос рассмотрен в разделе 4.

Выводы

1. Анализ работы главной водоотливной установки свидетельствует о зависимости ее режимов от технологических и технических параметров и состояний элементов системы шахтного водоотлива. Следовательно, энергоэффективность функционирования водоотлива представлена функционалом, зависящим от нескольких функций.

2. Разработанный алгоритм функционирования ГВУ позволяет с помощью имитационного моделирования получить множество возможных режимов ее работы для любых технологических характеристик установки и технических параметров оборудования. Вариационным исчислением определяется энергоэффективный режим работы ГВУ, который характеризуется минимальным удельным расходом электроэнергии на откачку воды при минимизации оплаты за ее потребление.

3. Анализ полученных на базе разработанной имитационной модели реализаций режимов работы ГВУ показал, что оплата за потребляемую главным водоотливом электроэнергию в течение суток при РРЭ зависит от начального уровня воды в водосборнике и снижается до 10 % при уровне воды в начале су-

ток, близком к максимальному. Это объясняется тем, что наличие воды в водосборнике на максимальном уровне в начале суток приведет к необходимости интенсивной работы насосов в данный период, т. е. в период действия минимального тарифа на электроэнергию, с целью опустошения водосборника к началу утреннего максимума нагрузок в энергосистеме и, как следствие, снизится объем работы насосов в полупиковый период.

4. Полученные функциональные зависимости влияния степени ухудшения технического состояния трубопроводной сети и насосных агрегатов на удельный расход электроэнергии позволяют прогнозировать изменения их технического состояния при соответствующем изменении удельного расхода (рис. 3.11 и 3.14). Мониторинг удельного расхода электроэнергии и характера напора, создаваемого насосами, позволяет своевременно определять причины его изменения, которые, как правило связаны с техническим состоянием оборудования.

5. Анализ параллельной работы насосов позволил определить функциональную зависимость удельного расхода электроэнергии от суммарной производительности одновременно работающих насосов при соответствующем количестве используемых в работе трубопроводов. Следовательно, режим работы насосов в количестве более двух на один трубопровод является неэффективным, ввиду резкого увеличения удельного расхода электроэнергии на откачку воды. При этом, увеличение количества трубопроводов ГВУ, участвующих в процессе откачки воды, минимизирует зависимость удельного расхода электроэнергии от высоты подъема жидкости (рис. 3.15 и 3.16).

РАЗДЕЛ 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЛАВНОГО ВОДООТЛИВА В РЕЖИМЕ ПОТРЕБИТЕЛЯ-РЕГУЛЯТОРА

4.1 Определение областей энергоэффективного использования главной водоотливной установки в режиме потребителя-регулятора

Функционирование шахтного водоотлива в режиме П-Р сопровождается применением РРЭ, на эффективность которого могут влиять как технические, так и технологические параметры и условия (см. разд. 2).

Ухудшение технического состояния трубопроводов, насосов и водосборников снижает их рабочие параметры и, соответственно, приводит к снижению эффективности или даже возможности осуществления РРЭ. Эффективность РРЭ можно оценить как техническими так и экономическими показателями, а именно удельным расходом и оплатой за потребленную электроэнергию с учетом тарифных коэффициентов.

Уменьшение длительности откачивания шахтной воды при РРЭ, ввиду отключения насосов в периоды максимальных нагрузок в энергосистеме, приводит к увеличению удельного расхода электроэнергии на суточном интервале.

Многочисленные изменения технических и технологических свойств системы водоотлива и их взаимная обусловленность влечет к воздействию на энергоэффективность функционирования. К воздействию в результате взаимодействия можно отнести состояние обобщающего КПД группы насосов в зависимости от количества одновременно работающих насосов с различными индивидуальными КПД и режимами их работы. Поэтому следует понимать "взаимодействие" как философскую категорию, отражающую процессы воздействия состояний параметров и характеристик технических и технологических систем на порождение значений обобщающего критерия оценки функционирования ГВУ в режиме регулирования электропотребления.

Рассмотрение системы шахтного водоотлива как совокупности элементов и их взаимодействия дает возможность описания ее теорией множеств [74, 85]. При этом принято дискретное изменение параметров за счет применения коэффициентов.

В процессе функционирования ГВУ множество ее элементов может иметь множество состояний, так например, множество состояний трубопровода A , элементами которого является различная степень зарастания внутреннего диаметра трубопроводной сети:

$$K_{zm} \in A, \\ A = \{K_{zm(0)}, K_{zm(0,1)}, K_{zm(0,2)}, K_{zm(0,3)}, K_{zm(0,4)}, K_{zm(0,5)}, \dots, K_{zm(i)}\}, \quad (4.1)$$

где $K_{zm(0)}, \dots, K_{zm(0,5)}, \dots, K_{zm(i)}$ – коэффициент зарастания трубопровода на 0, 10, 20, 30, 40 и 50 %, ..., i % соответственно, о.е.

Подобное множество B состояний имеет насосный агрегат:

$$K_{yn} \in B, \\ B = \{K_{yn(0)}, K_{yn(0,1)}, K_{yn(0,2)}, K_{yn(0,3)}, K_{yn(0,4)}, K_{yn(0,5)}, \dots, K_{yn(j)}\}, \quad (4.2)$$

где $K_{yn(0)}, \dots, K_{yn(0,5)}, \dots, K_{yn(j)}$ – коэффициент ухудшения технического состояния насосов на 0, 10, 20, 30, 40 и 50 %, ..., j % соответственно, о.е.

Техническое состояние водосборников также можно описать некоторым множеством C , элементы которого определяют степень уменьшения рабочего объема водосборника вследствие его заиливания или при выведении наибольшей ветви в чистку (в случае неравных по объему ветвей) и т. п.:

$$K_{yb} \in C, \\ C = \{K_{yb(0)}, K_{yb(0,1)}, K_{yb(0,2)}, K_{yb(0,3)}, K_{yb(0,4)}, K_{yb(0,5)}, \dots, K_{yb(n)}\}, \quad (4.3)$$

где $K_{yв(0)}, \dots, K_{yв(0,5)}, \dots, K_{yв(n)}$ – коэффициент уменьшения рабочего (регулируемого) объема водосборника на 0, 10, 20, 30, 40, 50 %, ..., n % соответственно, о.е.

При этом множества A, B, C являются конечными, поскольку имеют конечное число элементов i, j, n , максимальные величины которых соответствуют граничным параметрам объекта, позволяющим выполнять его функции при регулировании режимов электропотребления.

В процессе функционирования системы шахтного водоотлива происходит объединение и взаимодействие множеств его элементов, т.е. образуется система множеств M :

$$M = \{A, B, C\},$$

при этом $A \subseteq M, B \subseteq M, C \subseteq M$, т. е. множества A, B, C являются подмножеством системы множеств M .

Взаимодействие подмножеств множества M описывается прямым произведением множеств:

$$A * B = \{ \langle K_{зм(i)}, K_{ун(j)} \rangle : K_{зм(i)} \in A, K_{ун(j)} \in B \}, \quad (4.4)$$

$$A * C = \{ \langle K_{зм(i)}, K_{ыв(n)} \rangle : K_{зм(i)} \in A, K_{ыв(n)} \in C \}, \quad (4.5)$$

$$B * C = \{ \langle K_{ун(j)}, K_{ыв(n)} \rangle : K_{ун(j)} \in B, K_{ыв(n)} \in C \}, \quad (4.6)$$

т.е. любой элемент $(K_{зм(i)}, K_{ун(j)}, K_{ыв(n)})$ каждого из подмножеств (A, B, C) может взаимодействовать с элементами другого множества, например при зарастании трубопровода на 10 % ухудшение технического состояния насосов может соответствовать как 0 % так и 50 %, также рассматривается и изменение объема водосборника, величина которого может взаимодействовать с параметрами дру-

гих элементов. Таким образом, учитывая уравнения (4.1)-(4.3) произведения (4.4)-(4.6) примут вид:

$$A * B = \left\{ \langle K_{zm(0)}, K_{yn(0)} \rangle, \langle K_{zm(0)}, K_{yn(0,1)} \rangle, \langle K_{zm(0)}, K_{yn(0,2)} \rangle, \dots \right. \\ \left. \dots, \langle K_{zm(0,5)}, K_{yn(0)} \rangle, \langle K_{zm(0,5)}, K_{yn(0,1)} \rangle, \langle K_{zm(0,5)}, K_{yn(0,2)} \rangle, \dots \right\}, \quad (4.7)$$

$$A * C = \left\{ \langle K_{zm(0)}, K_{yb(0)} \rangle, \langle K_{zm(0)}, K_{yb(0,1)} \rangle, \langle K_{zm(0)}, K_{yb(0,2)} \rangle, \dots \right. \\ \left. \dots, \langle K_{zm(0,5)}, K_{yb(0)} \rangle, \langle K_{zm(0,5)}, K_{yb(0,1)} \rangle, \langle K_{zm(0,5)}, K_{yb(0,2)} \rangle, \dots \right\}. \quad (4.8)$$

$$B * C = \left\{ \langle K_{yn(0)}, K_{yb(0)} \rangle, \langle K_{yn(0)}, K_{yb(0,1)} \rangle, \langle K_{yn(0)}, K_{yb(0,2)} \rangle, \dots \right. \\ \left. \dots, \langle K_{yn(0,5)}, K_{yb(0)} \rangle, \langle K_{yn(0,5)}, K_{yb(0,1)} \rangle, \langle K_{yn(0,5)}, K_{yb(0,2)} \rangle, \dots \right\} \quad (4.9)$$

Полученные уравнения (4.7)-(4.9) можно реализовать с помощью разработанного и описанного в разделе 3 алгоритма, что позволит определить эффективность работы ГВУ при взаимодействии ее элементов с учетом технических и технологических параметров состояния.

Рассмотрим возможность и целесообразность применения РРЭ шахтного водоотлива на угольных шахтах Западного Донбасса, которые имеют притоки воды от 100 до 1200 м³/ч для граничных и средних условий.

На рис. 4.1 представлены зависимости изменения удельного расхода электроэнергии (w_0) и стоимости (оплаты) потребляемой на суточном интервале времени электроэнергии (C_w) от степени уменьшения внутреннего диаметра трубопровода в результате зарастания (K_{zm}) для различного технического состояния насосов (K_{yn}) на шахтах с притоком воды 100 м³/ч.

На основе выполненного анализа ГВУ шахт Западного Донбасса в качестве исходных данных для построения "областей" были приняты следующие параметры водоотливной установки: насосы типа ЦНС-300, трубопроводы диаметром 250 мм (рабочий и резервный).

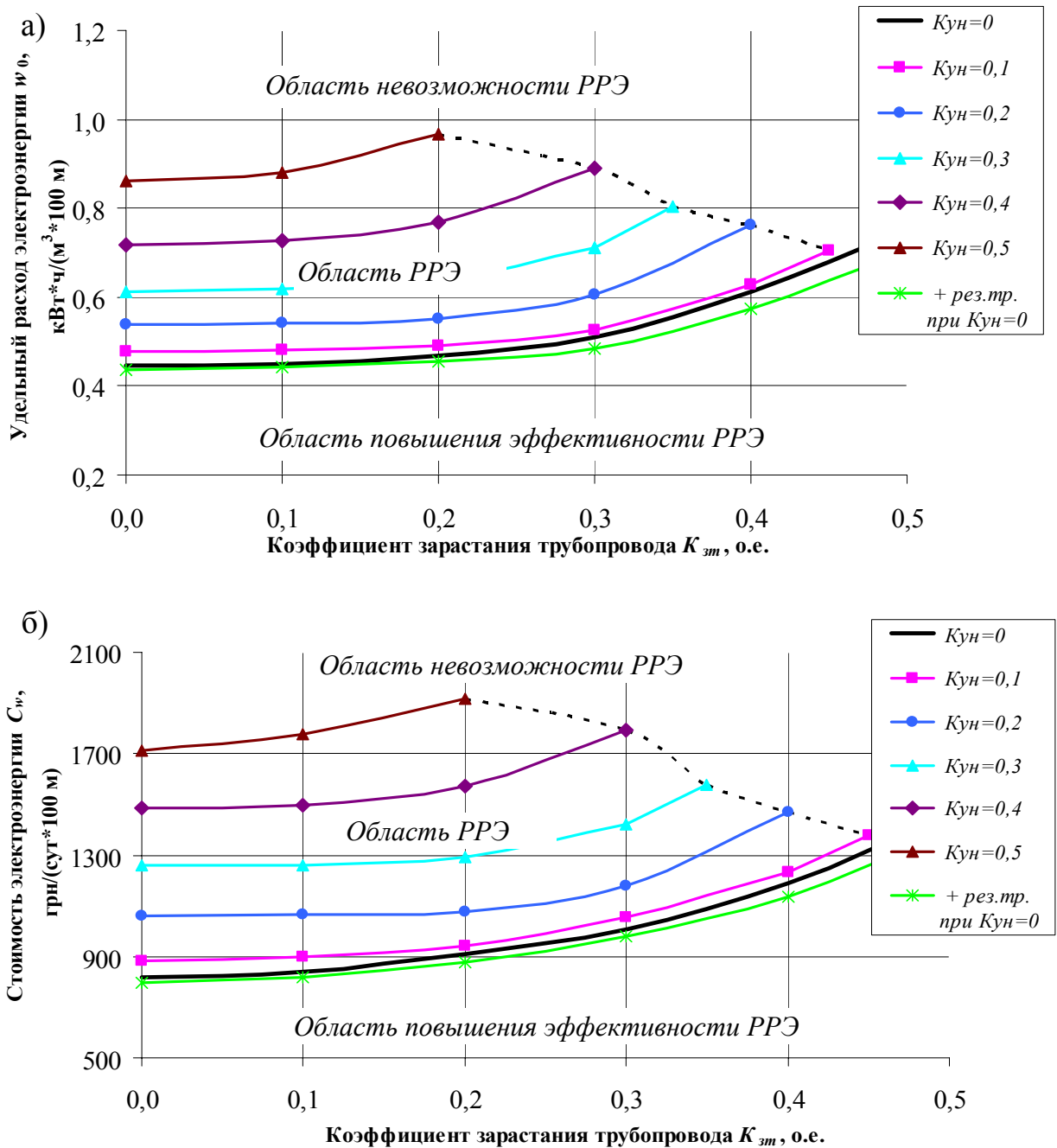


Рис. 4.1. Области применения РРЭ на шахтах с притоком воды $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ при изменении параметров трубопроводов и насосов: технический (а) и экономический (б) показатели

На рис. 4.1, а представлено семь зависимостей, шесть из которых характеризуют режимы работы водоотлива при РРЭ для различных условий технического состояния насосов и трубопроводов, т.е. кривые изменения удельного расхода электроэнергии при зарастании трубопроводов от 0% до 50%

($K_{zm} = 0 \dots 0,5$) для насосов, техническое состояние которых ухудшено от 0 % до 50 % ($K_{yn} = 0 \dots 0,5$).

Полученные зависимости определяют область РРЭ, эффективность которого снижается с увеличением зарастания трубопровода и ограничивается ухудшением технического состояния насосов. Например, работа насосов ГВУ с максимальным КПД при зарастании трубопровода на 50 % (кривая соответствующая " $K_{yn} = 0$ ") приводит к увеличению удельного расхода электроэнергии и оплаты за нее на суточном интервале времени до 67 % (на 0,3 кВт·ч/(м³·100 м)) и 78 % (на 640 грн/(сут.·100 м)) соответственно (рис. 4.1, б). Использование насосов, КПД которых снижено на 50 % (кривая соответствующая " $K_{yn} = 0,5$ "), позволит применять РРЭ при зарастании трубопровода не более 20 %, однако при данных условиях эффективность РРЭ снижается в два раза, что соответствует дополнительному увеличению оплаты за потребляемую электроэнергию на 1100 грн/(сут.·100 м). Дальнейшее ухудшение рабочих параметров трубопроводной сети и насосов не позволит осуществлять РРЭ, т. е. использовать ГВУ в режиме П-Р, при этом процесс откачивания воды будет осуществляться уже независимо от времени суток, т.е. по уровню заполнения водосборника.

Повысить эффективность РРЭ ГВУ можно путем восстановления рабочих параметров основного оборудования и использовании резервного трубопровода для откачивания воды (рис. 4.1, кривая "+рез. тр. при $K_{yn} = 0$ "). Данный режим приведет к дополнительному снижению удельного расхода электроэнергии и ее стоимости от 2 % (на 0,02 кВт·ч/(м³·100 м) и 18 грн/(сут.·100 м)) и 7 % (на 0,05 кВт·ч/(м³·100 м) и 68 грн/(сут.·100 м)) в зависимости от технического состояния трубопроводной сети.

Следовательно, применение РРЭ ограничивается техническими показателями рабочего состояния насосных агрегатов и трубопроводной сети, которые снижают его эффективность в два раза.

Рассмотрим представленные на рис. 4.2 зависимости изменения удельного расхода электроэнергии (w_0) и стоимости (оплаты) потребляемой на суточном интервале времени электроэнергии (C_w) от степени уменьшения внутрен-

него диаметра трубопровода в результате зарастания (K_{zt}) для различной степени ухудшения технического состояния насосов (K_{yn}) на шахтах с притоком воды $600 \text{ м}^3/\text{ч}$ при принятых параметрах ГВУ: насосы типа ЦНС-300, трубопроводы диаметром 273 мм (два рабочих и один резервный).

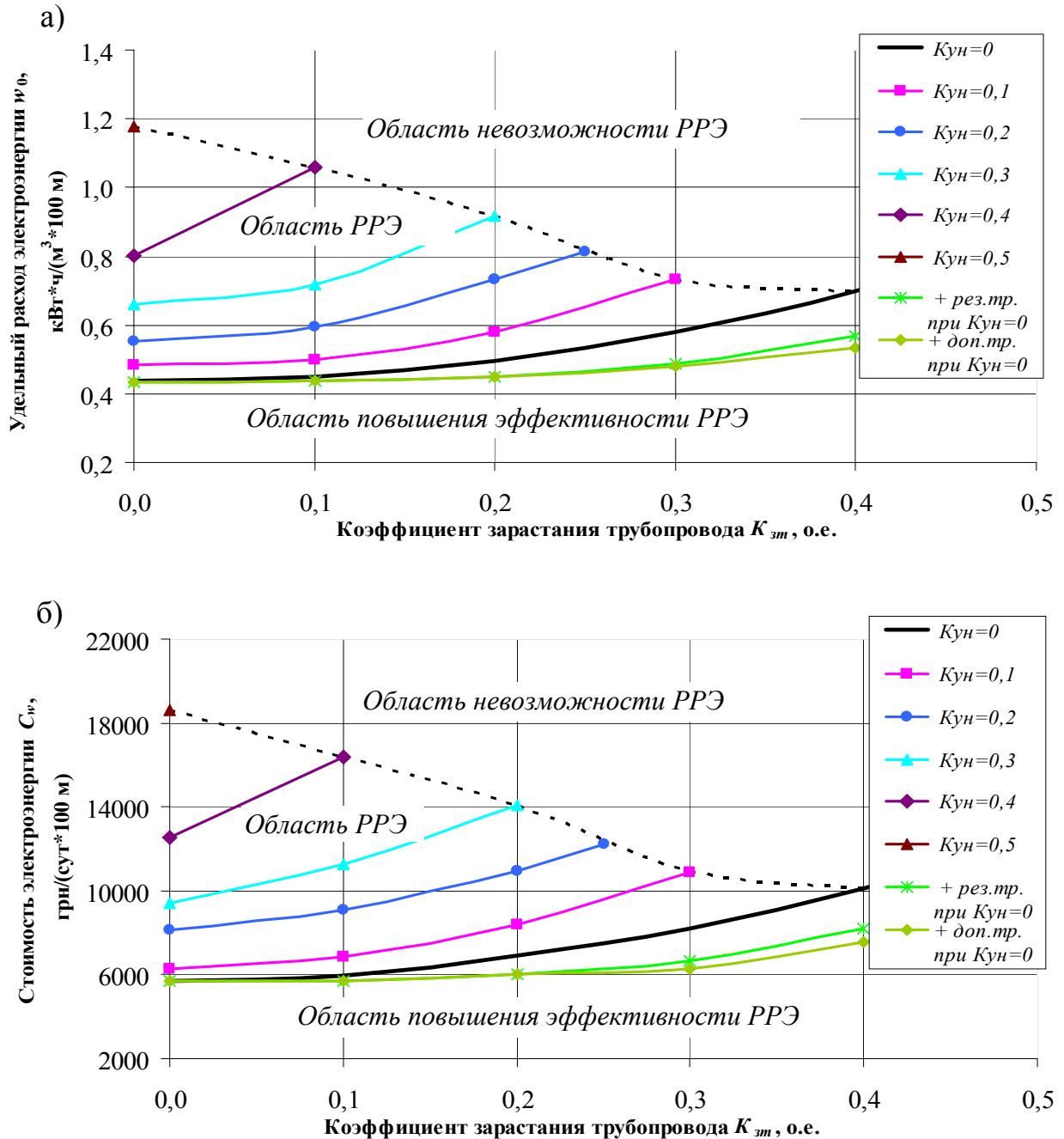


Рис. 4.2. Области применения РРЭ на шахтах с притоком воды $600 \text{ м}^3/\text{ч}$ при изменении параметров трубопроводов и насосов: технический (а) и экономический (б) показатели

На рис. 4.2, а представлено восемь зависимостей, шесть из которых характеризуют область РРЭ шахтного водоотлива, эффективность которого снижается с увеличением зарастания трубопровода и ограничивается ухудшением технического состояния насосов. Например, работа насосов ГВУ с максимальным КПД при уменьшении внутреннего диаметра трубопровода до 50 % (кривая соответствующая " $K_{yn} = 0$ ") приводит к увеличению удельного расхода электроэнергии и оплаты за нее (рис. 4.2, б) за сутки до 98 % (на 0,43 кВт·ч/(м³·100 м)) и 120 % (на 6800 грн/(сут.·100 м)) соответственно. Кроме того, применение РРЭ водоотлива с насосами, имеющими сниженный на 50 % КПД (кривая соответствующая " $K_{yn} = 0,5$ ") возможно лишь при отсутствии обрастания трубопроводов. При этом эффективность регулирования будет снижена в три раза, что эквивалентно увеличению оплаты за электроэнергию на 12900 грн/(сут.·100 м). Дальнейшее ухудшение технических параметров состояния насосов и трубопроводной сети приводит к невозможности РРЭ.

Повысить эффективность РРЭ шахтного водоотлива возможно за счет восстановления рабочих параметров насосов и трубопроводов и применения в процессе откачивания воды резервного трубопровода. Это позволит снизить удельный расход электроэнергии и оплату за нее от 1,5 % до 23 % (до 0,16 кВт·ч/(м³·100 м) и 1930 грн/(сут.·100 м)) в зависимости от технического состояния трубопровода (рис. 4.2, кривая "+рез. тр. при $K_{yn} = 0$ "). Установка дополнительного трубопровода (рис. 4.2, кривая "+доп. тр. при $K_{yn} = 0$ ") позволит повысить эффективность регулирования еще на 5-7 %, однако целесообразность данного мероприятия (для притоков 600 м³/ч) должна определяться дополнительным технико-экономическим обоснованием.

Зависимости, представленные на рис. 4.3, а характеризуют область РРЭ главного водоотлива шахт с притоками 1200 м³/ч при следующих принятых параметрах ГВУ: насосы типа ЦНС-300, трубопроводы диаметром 350 мм (два рабочих и один резервный). Пять кривых из семи определяют эффективность регулирования в зависимости от технического состояния основного оборудования, участвующего в процессе откачивания воды.

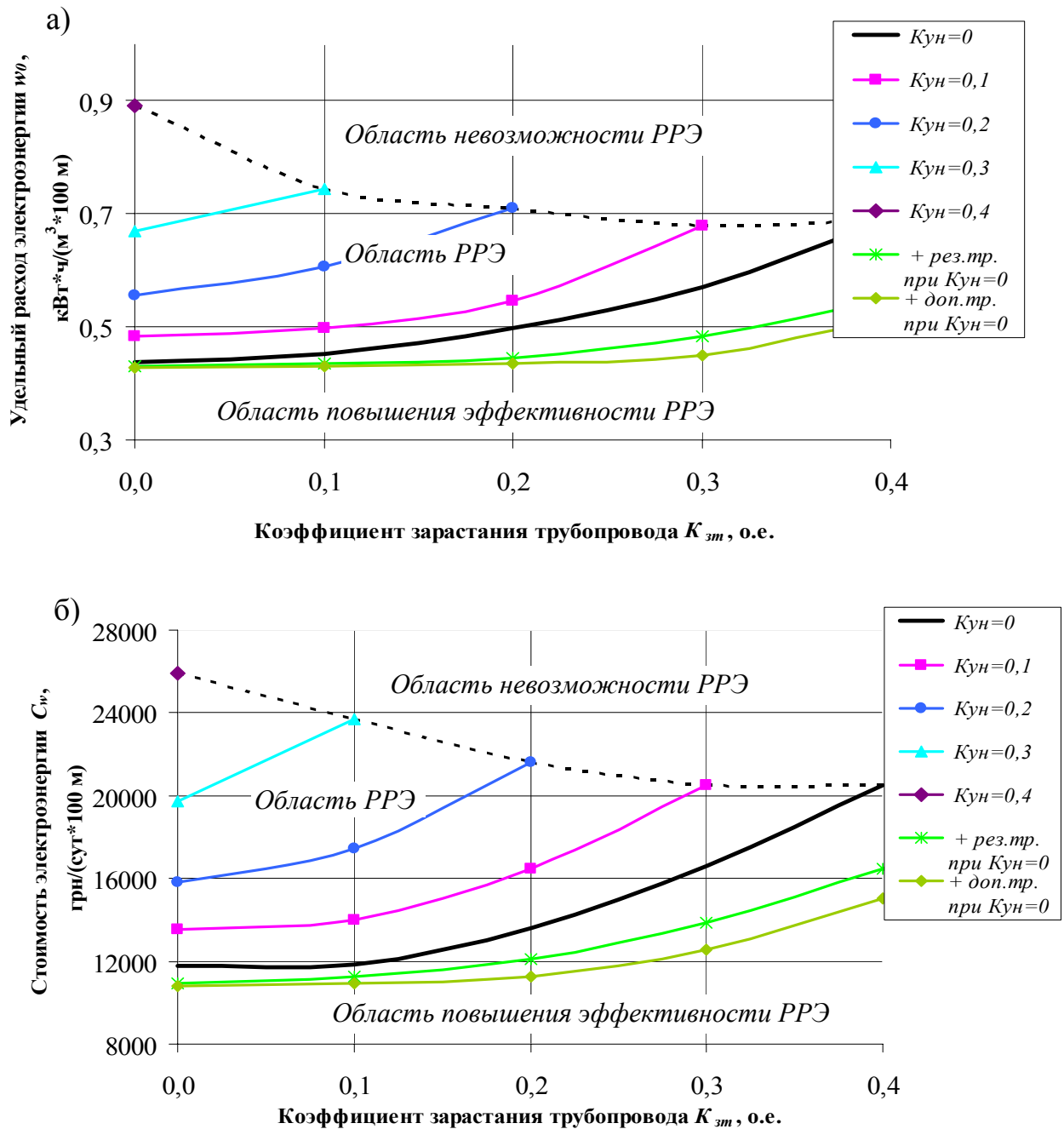


Рис. 4.3. Области применения РРЭ на шахтах с притоком воды 1200 м³/ч при изменении параметров трубопроводов и насосов: технический (а) и экономический (б) показатели

Эффективность РРЭ при работе насосов с максимальным КПД (кривая соответствующая " $K_{ун} = 0$ ") снижается с увеличением степени обрастания трубопровода, что отражается на увеличении технических (рис. 4.3, а) и экономических (рис. 4.3, б) показателей до 57 % (на 0,25 кВт·ч/(м³·100 м)) и 74 % (на

8700 грн/(сут.·100 м)) соответственно. Применение РРЭ главного водоотлива с насосами, имеющими сниженный на 40 % КПД (кривая соответствующая " $K_{ун} = 0,4$ ") возможно лишь при отсутствии обрастания внутренних стенок трубопроводов. При этом эффективность регулирования будет снижена в два раза, т. е. оплата за электроэнергию увеличиться на 14100 грн/(сут.·100 м). Дальнейшее ухудшение параметров технического состояния насосов и трубопроводной сети приводит к невозможности РРЭ.

Восстановления рабочих параметров насосов и трубопроводов и применения в процессе откачивания воды резервного трубопровода способствует повышению эффективности РРЭ главного водоотлива. Данное решение позволит снизить удельный расход электроэнергии от 2 % до 25 % (до 0,14 кВт·ч/(м³·100 м) и 4000 грн/(сут.·100 м)) в зависимости от технического состояния трубопровода (рис. 4.3, кривая "+рез. тр. при $K_{ун} = 0$ "). Установка дополнительного трубопровода (рис. 4.3, кривая "+доп. тр. при $K_{ун} = 0$ ") позволит повысить эффективность регулирования еще до 10 %, при этом целесообразность данного мероприятия (для притоков 1200 м³/ч) должна подтверждаться дополнительным технико-экономическим обоснованием.

Анализируя вышеприведенный материал можно сделать вывод, что ухудшение технического состояния насосов и трубопроводной сети до 50 % приводит к снижению эффективности РРЭ до 2-3 раз.

Эффективность использования резервного трубопровода в процессе регулирования очевидна и в зависимости от водопритока и технического состояния оборудования способствует снижению удельного расхода до и экономических показателей работы водоотлива до 25 %.

Установка дополнительного трубопровода позволит дополнительно снизить технических и экономических показателей работы водоотлива до 10 %, однако целесообразность данного мероприятия должна подтверждаться дополнительными расчетами.

Поскольку энергоэффективность функционирования ГВУ в режиме П-Р зависит от ряда технических и технологических условий и состояний ее работы,

поэтому является функцией нескольких переменных, взаимодействие которых влияет как на энергетические, так и на стоимостные показатели работы водоотлива. Следовательно, энергоэффективность определяется двумя критериями – удельный расход электроэнергии и оплата за ее потребление.

В результате обобщения полученных областей эффективности регулирования режимов электропотребления главного водоотлива (рис. 4.1-4.3) по двум критериям, получим область энергоэффективной работы ГВУ в режиме П-Р по обобщенному критерию с учетом изменения технического состояния насосов и трубопроводов, при их зарастании, приведенную на рис. 4.4.

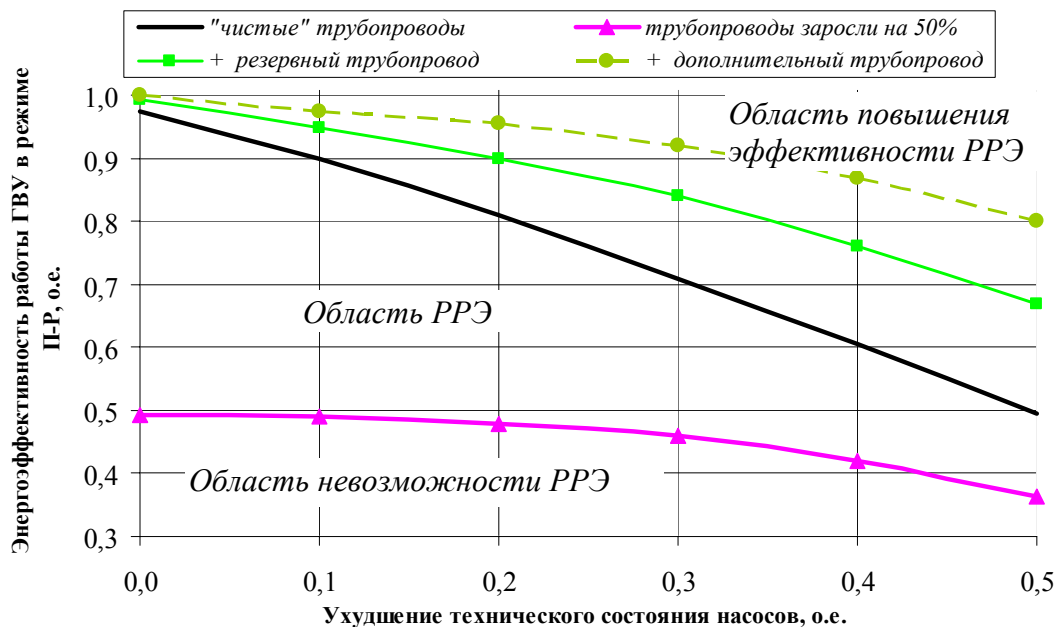


Рис. 4.4. Область энергоэффективной работы ГВУ в режиме П-Р при изменении технического состояния насосов и трубопроводов

Приведенные на рис. 4.4 зависимости определяют энергоэффективность функционирования главного водоотлива при различной эффективности РРЭ для шахт с часовым притоком воды до $1200 \text{ м}^3/\text{ч}$ включительно. Как видно, наибольшая энергоэффективность достигается при работе насосов с максимально возможным КПД и использованием в процессе откачивания воды помимо рабочего еще и резервного или даже дополнительного (при больших при-

токах) трубопровода в чистом состоянии, т. е. без обрастания их внутренних стенок минеральными отложениями.

Кроме того, энергоэффективность работы ГВУ в режиме П-Р практически прямо пропорционально зависит от технического состояния насосов, ухудшение которого до 50 % приводит к снижению энергоэффективности до двух раз (при использовании в работе чистых рабочих трубопроводов).

Заращение рабочих трубопроводов до 50 % (при исправных насосах) приводит к снижению энергоэффективности работы ГВУ также до 50 %, при этом сопутствующее ухудшение технического состояния насосов до 50 % дополнительно снижает энергоэффективность до 15 %.

4.2 Влияние рабочего объема водосборника на технико-экономические показатели работы главной водоотливной установки

Возможность и эффективность РРЭ главного водоотлива зависит также и от объема водосборника, который должен быть достаточным для ограничения работы насосов в часы максимальных нагрузок в энергосистеме (разд. 2). Однако, на практике, данное условие не всегда является выполнимым.

Поскольку при эксплуатации шахтного водоотлива присутствует естественный процесс заиления и, соответственно, чистки водосборника, его рабочий объем периодически изменяется. При участии в процессе накопления воды всего объема водосборника, а также при наличии допустимого процента заиления, возможность и целесообразность применения РРЭ будет очевидна. Однако, водосборник состоит, как минимум, из двух ветвей и при необходимости выведения одной из них в чистку в работе остается только одна ветвь, объема которой может быть недостаточно для полноценного РРЭ. При наличии разных по объему ветвей, выведение в чистку большей ветви может привести к невозможности осуществления РРЭ.

Чистка водосборников осуществляется, как правило, вручную или с частичным применением механизации.

Процесс чистки выполняется звеном горнорабочих в количестве 2 человек, один из которых должен иметь право на управления лебедкой. Перед началом работ по чистке водосборника № 1 производится открытие водоотливных канавок на заезде в водосборник № 1 таким образом, чтобы вода поступала в водосборник № 2. Перед началом работ по очистке водосборника № 2 водоотливные канавки перекрываются таким образом, чтобы вода поступала в водосборник № 1. Производится откачка воды из очищаемого водосборника, при помощи насоса или эрлифта до уровня шлама. Вода перекачивается в работающий водосборник. Машинист электровоза, находясь с локомотивом в хвосте состава, подает 5 порожних вагонеток на заезд водосборника принимающего воду, до тупикового барьера, отцепляет вагонетки и уезжает. Затем при помощи лебедки опускают вагонетку по наклонному участку в водосборник для выполнения погрузки шлама. В случае поломки погрузочной машины чистка водосборника производится звеном горнорабочих, которые направляются в водосборник к вагонетке и с помощью совковых лопат и ведер приступают к погрузке шлама. Вагонетка загружается полностью и при помощи лебедки, а затем и электровоза доставляется к стволу для выдачи на поверхность.

Применение, описанного выше, способа чистки водосборников приводит к большой продолжительности времени выполнения работ, а соответственно к уменьшению рабочего объема водосборника на этот период, что не может не отразиться на эффективности РРЭ.

Причины и продолжительность уменьшения рабочего объема водосборника могут быть различными, а именно выведение одной ветви в чистку и заиление водосборника в период эксплуатации между чистками. Допустимое по ПБ заиление не должно превышать 30 %, т.е. при достижении этой величины одна из ветвей должна выводиться в чистку. Вторая ветвь (если водосборник состоит из двух ветвей) остается в работе, при этом она может уже иметь какой-то уровень заиления, т.е на период чистки одной из ветвей, рабочий объем второй может не соответствовать 100 % его величины.

Немаловажным фактором при этом является равномерность объемов ветвей водосборника. При равных по объему ветвях, выведение в чистку одной из них, уменьшает объем водосборника на 50 % (при двух ветвях водосборника), а наличие заиления оставшейся ветки, уменьшает ее рабочий объем на эту величину.

При неравных ветвях водосборника возможно два варианта выведения заиленных ветвей в чистку, т.е. меньшей либо большей ветви. Уменьшение объема водосборника при выведении меньшей ветки в чистку, с небольшой разницей объемов ветвей, может отразиться лишь на эффективности РРЭ. При этом выведение большей ветки в чистку, может привести к невозможности осуществления РРЭ.

Наличие трех и более ветвей водосборника снижает дефицит рабочего объема в период чистки одной из ветвей.

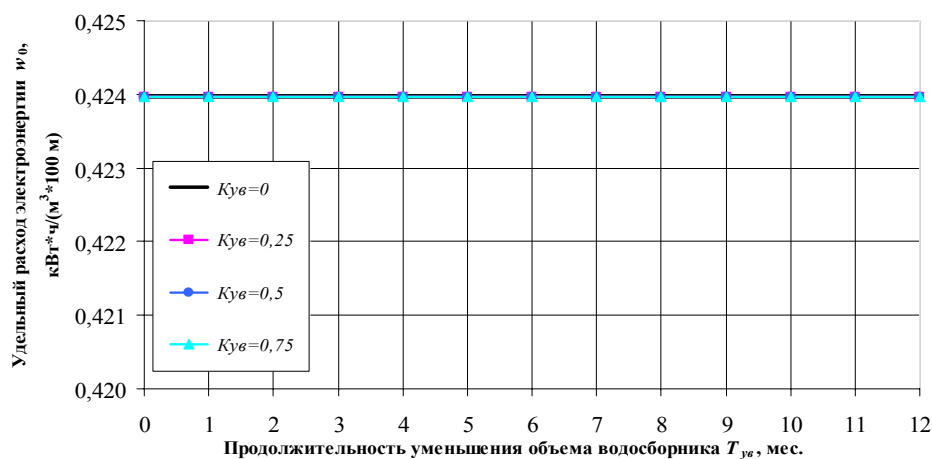
Эффективность применения РРЭ или даже его возможность в таких случаях напрямую зависит от продолжительности уменьшения рабочего объема водосборника. А поскольку процесс чистки водосборника (описано выше) является трудоемким и осуществляется, как правило, вручную посредством рабочего персонала, поэтому данное мероприятие может длиться до нескольких месяцев, в зависимости от объема работы. Это приводит к тому, что на период окончания чистки одной ветки водосборника появляется необходимость в выведении в чистку другой ветви, при этом большую часть времени в году рабочий объем водосборника соответствует объему одной ветви (при водосборнике, состоящем из двух ветвей) и т.п.

На рисунках 4.5 - 4.7 показаны зависимости удельных технических (а) и экономических (б) показателей работы ГВУ (для шахт с притоком воды 100, 600 и 1200 м³/ч) в период ограничения рабочего объема водосборника от его продолжительности. Представлено по четыре зависимости, соответствующих уровню рабочего объема водосборника, т.е. при отсутствии заиления и эксплуатации всего водосборника (прямая " $K_{ye} = 0$ "), а также при уменьшении рабочего

объема водосборника на 25, 50 и 75 %, что соответствует прямым " $K_{yв} = 0,25$ ", " $K_{yв} = 0,5$ " и " $K_{yв} = 0,75$ ".

Уменьшение рабочего объема водосборника на шахтах с притоком воды $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ (рис. 4.5, а) не влияет на удельный расход электроэнергии. Ввиду недостаточности рабочего объема водосборника для накопления воды во время отключения насосов в период максимальных нагрузок в энергосистеме, необходимость в увеличении работы насосов отсутствует. А поскольку приток воды малый, то в работе участвует минимальное количество имеющихся насосов и, соответственно, удельный расход электроэнергии не изменяется.

а)



б)

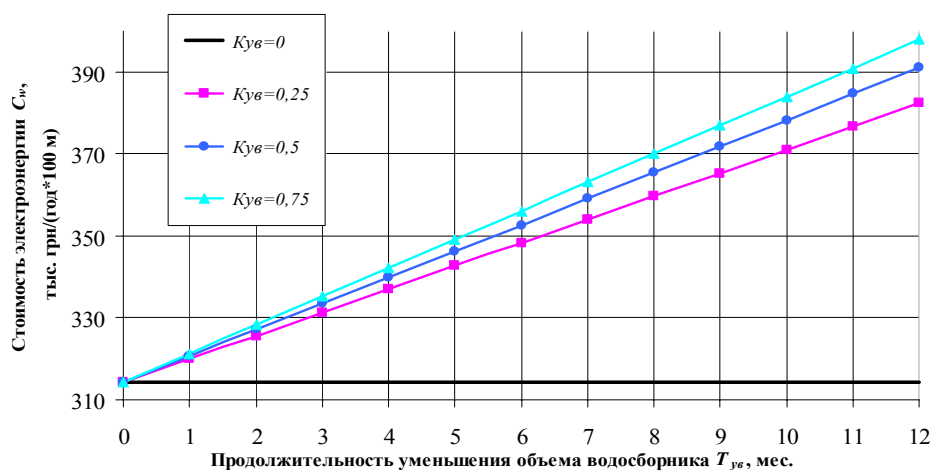


Рис. 4.5. Зависимость удельных технических (а) и экономических (б) показателей работы ГВУ от рабочего объема водосборника на шахтах с притоком воды $100 \text{ м}^3/\text{ч}$

При уменьшении рабочего объема водосборника эффективность РРЭ снижается, что естественно отражается на экономических показателях работы ГВУ (рис. 4.5, б). С увеличением объема, не участвующего в процессе накопления воды, увеличивается и оплата (стоимость) за потребляемую электроэнергию, поскольку повышается необходимость работы насосов независимо от характера нагрузок в энергосистеме. Так например, уменьшение рабочего объема водосборника на 25, 50 и 75 % в течение одного месяца приводит к увеличению стоимости электроэнергии на 1,8; 2,0 и 2,2 % соответственно, что эквивалентно увеличению на 5665, 6390 и 6960 грн/(год·100 м). Увеличение продолжительности ограничения рабочего объема водосборника до шести месяцев приведет к увеличению оплаты за электроэнергию уже на 10,8; 12,2 и 13,3 % соответственно, что эквивалентно увеличению на 33,99; 38,34 и 41,76 тыс. грн/(год·100 м).

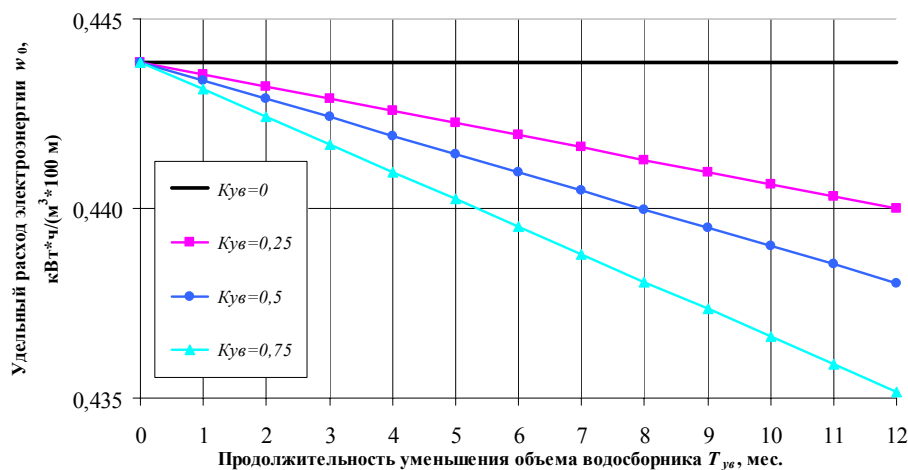
Следовательно, несвоевременное и длительное восстановление рабочего объема водосборника до норм, регламентируемых нормативными документами, негативно отразится на экономических показателях работы ГВУ.

Уменьшение рабочего объема водосборника на шахтах с притоком воды 600 м³/ч (рис. 4.6, а), где используется уже большее количество насосов, приводит к снижению удельного расхода электроэнергии.

Ограничение рабочего объема водосборника сопровождается снижением эффективности РРЭ, применение которого связано с необходимостью использования дополнительно резервных насосов, что и приводит к увеличению расхода электроэнергии. Снижение эффективности РРЭ или его невозможность отражаются на оплате за потребляемую электроэнергию (рис. 4.6, б).

Для шахт с притоком воды 600 м³/ч уменьшение рабочего объема водосборника на 25, 50 и 75 % в течение одного месяца приводит к снижению удельного расхода электроэнергии на 0,07; 0,11 и 0,16 % и к увеличению оплаты за ее потребление на 1,0; 1,4 и 2,4 % соответственно, что эквивалентно увеличению на 18,92; 27,09 и 44,7 тыс. грн/(год·100 м).

а)



б)

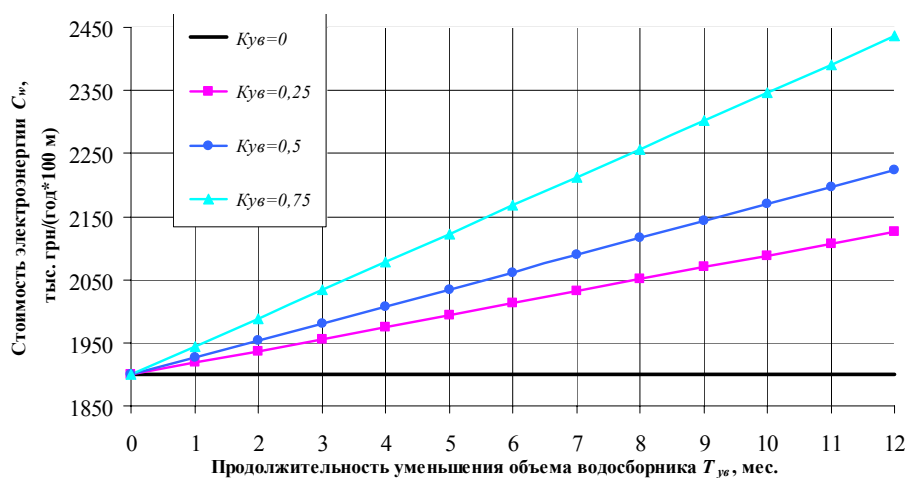


Рис. 4.6. Зависимость удельных технических (а) и экономических (б) показателей работы ГВУ от рабочего объема водосборника на шахтах с притоком воды $600 \text{ м}^3/\text{ч}$

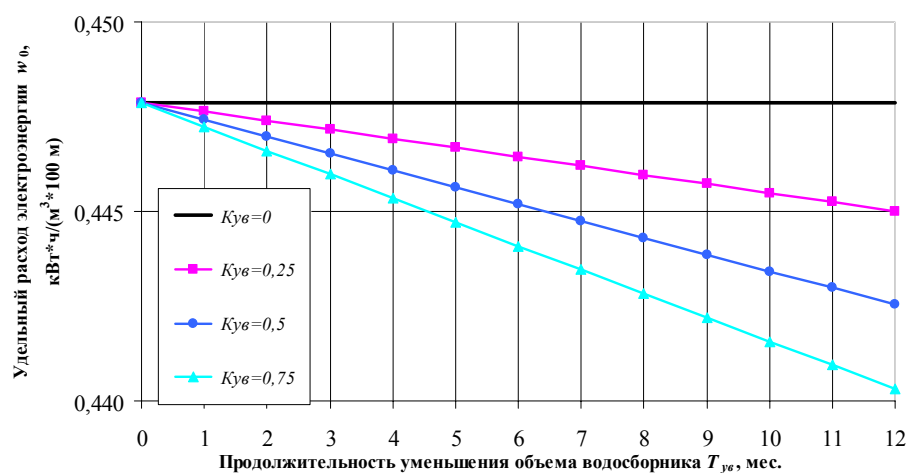
Увеличение продолжительности ограничения рабочего объема водосборника до шести месяцев приведет к снижению расхода электроэнергии на 0,44; 0,66 и 0,99 % и к увеличению оплаты за ее потребление уже на 6,0; 8,6 и 14,1 % соответственно, что эквивалентно увеличению на 113,52; 162,54 и 268,2 тыс. грн/(год·100 м).

Следовательно, снижение эффективности РРЭ приводит к ожидаемому увеличению оплаты за электроэнергию, однако способствует снижению ее расхода.

Ограничение рабочего объема водосборника на шахтах с притоком воды $1200 \text{ м}^3/\text{ч}$ (рис. 4.7) в течение месяца на 25, 50 и 75 % приводит к снижению

удельного расхода электроэнергии на 0,05; 0,1 и 0,14 %, однако увеличивает стоимость за нее на 0,5; 1,2 и 2,4 % соответственно, что эквивалентно увеличению на 19,747; 45,92 и 89,28 тыс. грн/(год·100 м). Несвоевременное восстановление рабочих параметров водосборника и увеличение продолжительности данных мероприятий до шести месяцев приведет к снижению удельного расхода электроэнергии на 0,32; 0,6 и 0,85 % и к увеличению оплаты за ее потребление на 3,1; 7,3 и 14,1 % соответственно, что эквивалентно увеличению на 118,48; 275,52 и 535,68 тыс. грн/(год·100 м).

а)



б)

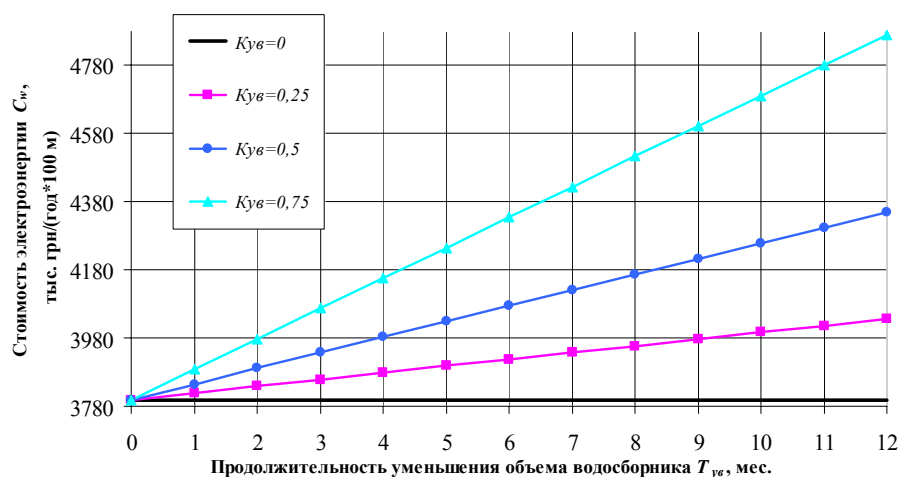


Рис. 4.7. Зависимость удельных технических (а) и экономических (б) показателей работы ГВУ от рабочего объема водосборника на шахтах с притоком воды 1200 м³/ч

Из приведенных выше зависимостей (рис. 4.5 - 4.7) следует, что не зависимо от притока ограничение рабочего объема водосборника до 75 % в течение года приводит к увеличению оплаты за потребляемую электроэнергию до 28 %.

Изменение удельного расхода электроэнергии при РРЭ прямо пропорционально изменению объема водосборника, т. е. уменьшение объема водосборника приводит к снижению величины удельного расхода электроэнергии.

4.3 Определение границ энергоэффективного использования главной водоотливной установки в режиме потребителя-регулятора

Работа насосов ГВУ в режиме П-Р приводит к снижению величины оплаты за потребляемую электроэнергию и, как правило, сопровождается увеличением интенсивности работы насосных установок в периоды внепиковых нагрузок в энергосистеме. Данное явление отражается непосредственно на удельном расходе электроэнергии, величина которого также зависит и от водопритока шахты. Угольные шахты Украины имеют различную степень водообильности пластов и, соответственно, величина водопритока различна, как правило от 50 до 1300 м³/ч. От величины водопритока зависит количество насосов ГВУ и, соответственно, эффективность применения РРЭ будет различна, поэтому возникает необходимость в определении областей энергоэффективного использования водоотлива в режиме П-Р.

Рассмотрим энергоэкономические показатели работы водоотлива в режиме П-Р для суточного интервала на шахтах с малым притоком воды от 50 до 300 м³/ч. На главном водоотливе с данными характеристиками предусматривается один рабочий и один резервный трубопровод ($D_{mp} = 200-250 \text{ мм}^2$). Применение РРЭ приводит к увеличению количества работающих насосов на рабочий трубопровод и может сопровождаться увеличением расхода электроэнергии (рис. 4.8). Применение дополнительно резервного трубопровода для РРЭ может привести к повышению энергоэффективности использования ГВУ в режиме П-Р (рис. 4.9).

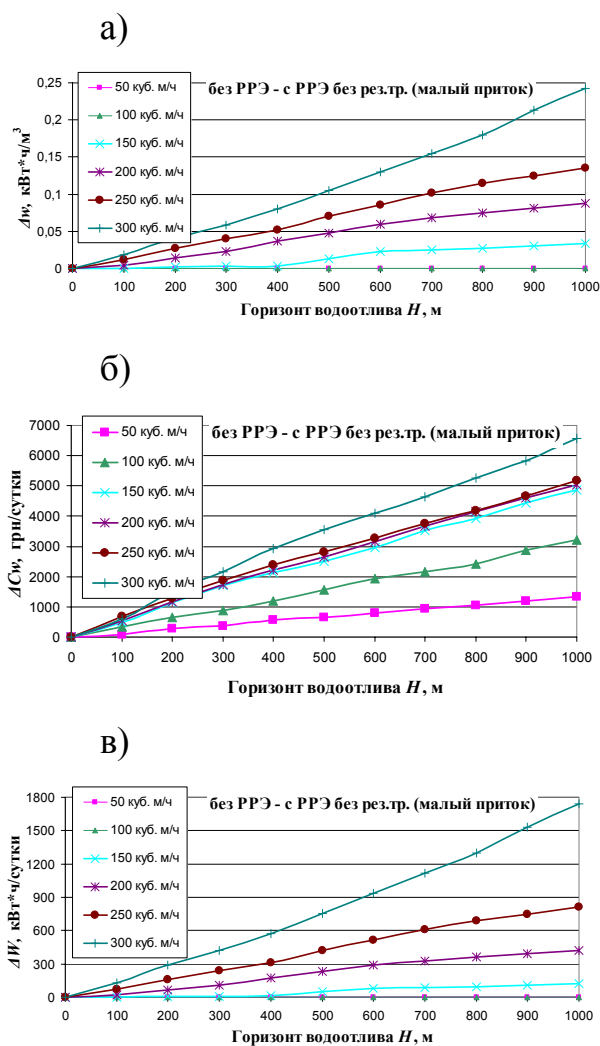


Рис. 4.8. Изменение удельного расхода (а), оплаты (б) и суточного расхода электроэнергии (в) при применении РРЭ без использования резервного трубопровода (при малых притоках)

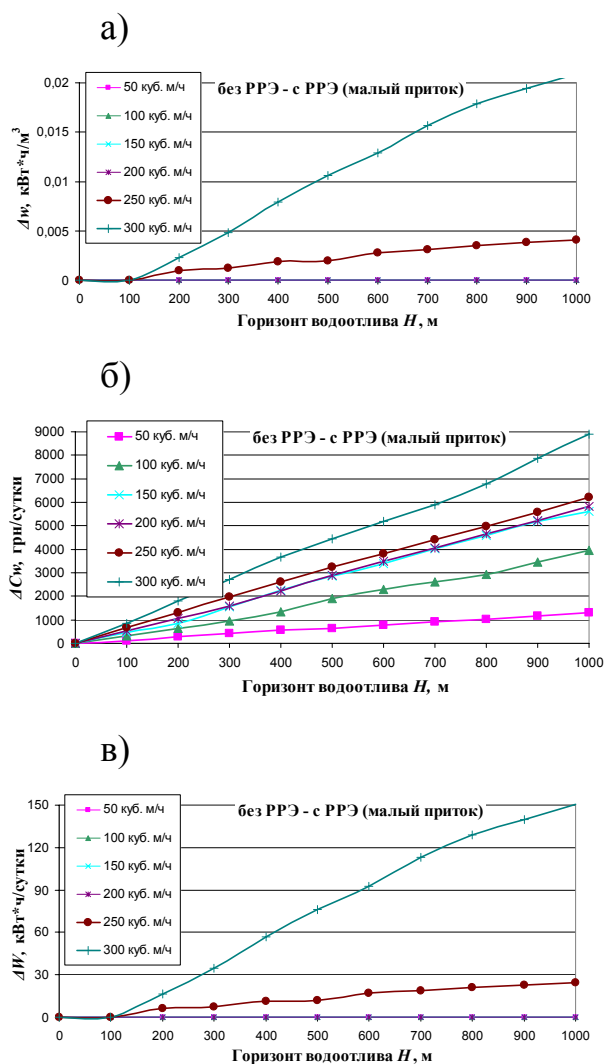


Рис. 4.9. Изменение удельного расхода (а), оплаты (б) и суточного расхода электроэнергии (в) при применении РРЭ с использованием резервного трубопровода (при малых притоках)

При малом водопритоке (до $300 \text{ м}^3/\text{ч}$) и использовании насосов с номинальной подачей не менее $180 \text{ м}^3/\text{ч}$ удельный расход электроэнергии на откачку воды для суточного интервала не зависит от величины притока воды, если регулирование режима электропотребления не выполняется, а режим работы насосов зависит (отстраивается) от уровня воды в водосборнике.

Работа насосов ГВУ шахты с водопритоком до $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ включительно при выполнении РРЭ не приводит к увеличению удельного расхода электроэнергии на откачку воды для суточного интервала не зависимо от режима использования резервного трубопровода (рис. 4.8 а, 4.9 а), однако снижает затраты на оплату потребленной водоотливом электроэнергии до 30% (до 4000 грн/сутки при тарифе 1,24 грн/кВт·ч) (рис. 4.8 б, 4.9 б). Причем использование резервного трубопровода для РРЭ приведет к отсутствию увеличения расхода электроэнергии при водопритоке до $200 \text{ м}^3/\text{ч}$ включительно и до $300 \text{ м}^3/\text{ч}$ включительно для шахт с горизонтом водоотлива до 100 м (рис. 4.9 а).

Применение РРЭ водоотлива на шахтах с водопритоком до $300 \text{ м}^3/\text{ч}$ приведет ожидаемому снижению оплаты за потребляемую электроэнергию до 30% (до 7000 грн/сутки при действующем тарифе) и к увеличению расхода электроэнергии до 6% (рис. 4.8). Общее электропотребление возрастет при этом на величину до 1800 кВт·ч/сутки. Однако использование дополнительно резервного трубопровода позволит снизить увеличение удельного расхода электроэнергии до 1%, увеличить ожидаемую прибыль от снижения оплаты за потребляемую электроэнергию до 9000 грн/сутки, а также снизить увеличение общего расхода электроэнергии до 150 кВт·ч/сутки (рис. 4.9).

Следовательно, целесообразность выполнения РРЭ главного водоотлива на шахтах с притоком воды до $300 \text{ м}^3/\text{ч}$ очевидна, поскольку увеличение удельного расхода электроэнергии, для суточного интервала, вследствие интенсивной работы насосов на превышает 1%, при условии использования в данном процессе резервного трубопровода, в то время как оплата за потребляемую водоотливом электроэнергию возможно снизить до 30%.

Рассмотрим энергоэкономические показатели работы водоотлива в режиме П-Р для суточного интервала на шахтах с притоком воды от 300 до $1300 \text{ м}^3/\text{ч}$. На главном водоотливе с данными характеристиками предусматривается, как правило, два рабочих и один резервный трубопровод ($D_{mp} = 300\text{-}350 \text{ мм}^2$), использование которого при РРЭ отражается на технических и экономических показателях работы установки (рис. 4.10 - 4.11).

При водопритоке до $700 \text{ м}^3/\text{ч}$ включительно и использовании насосов с номинальной подачей не менее $300 \text{ м}^3/\text{ч}$ удельный расход электроэнергии на откачку воды для суточного интервала не зависит от величины притока воды, если регулирование режима электропотребления не выполняется, а режим работы насосов зависит (отстраивается) от уровня воды в водосборнике.

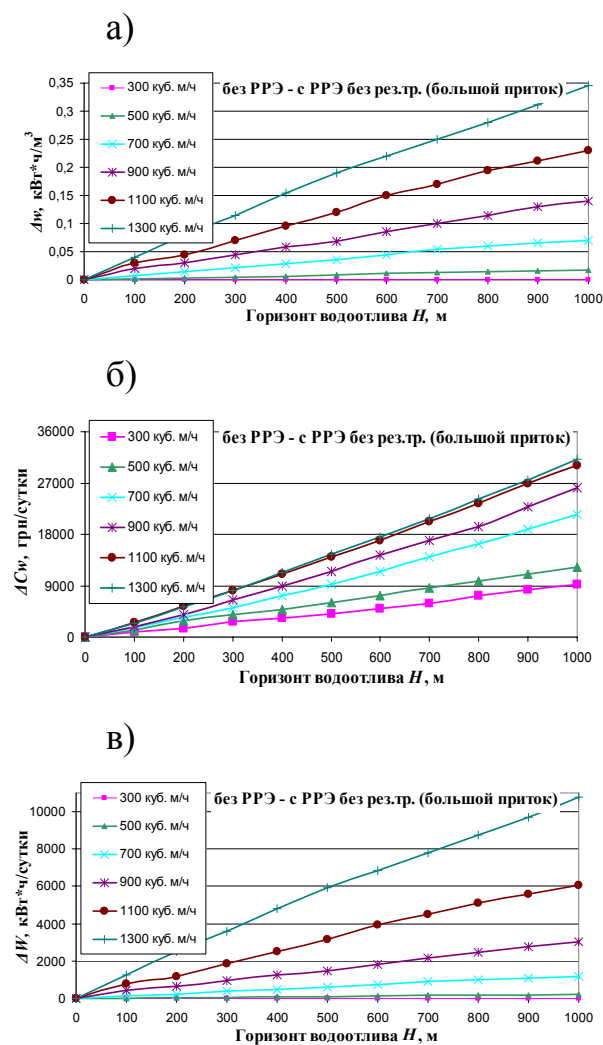


Рис. 4.10. Изменение удельного расхода (а), оплаты (б) и суточного расхода электроэнергии (в) при применении РРЭ без использования резервного трубопровода (при больших притоках)

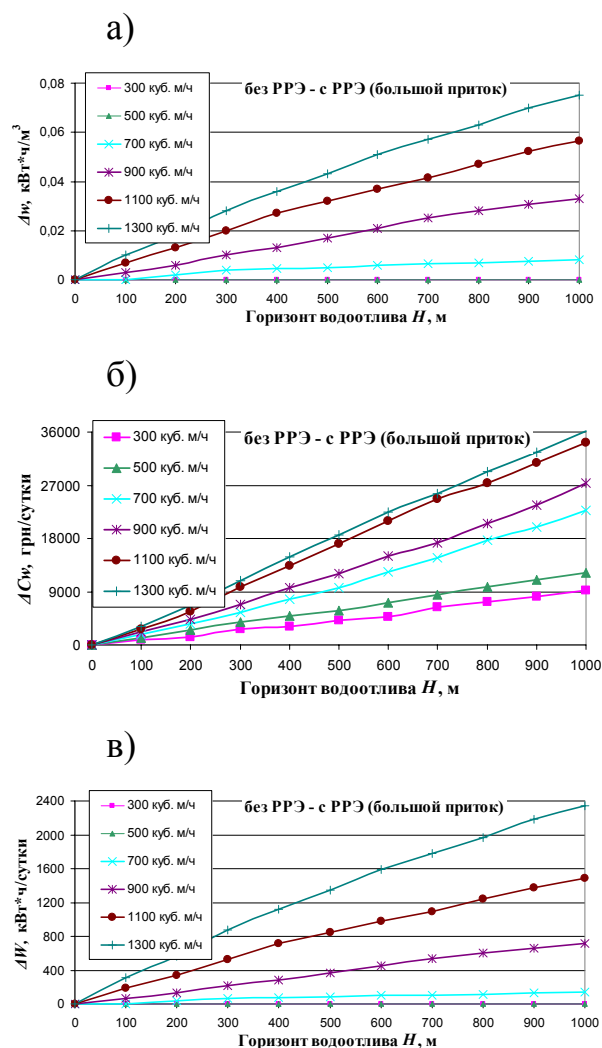


Рис. 4.11. Изменение удельного расхода (а), оплаты (б) и суточного расхода электроэнергии (в) при применении РРЭ с использованием резервного трубопровода (при больших притоках)

Использование резервного трубопровода для целей РРЭ приведет к отсутствию увеличения расхода электроэнергии при водопритоке до 500 м³/ч включительно и до 700 м³/ч включительно для шахт с горизонтом водоотлива до 100 м (рис. 4.11 а).

Применение РРЭ водоотлива шахт с водопритоком свыше 300 м³/ч приведет ожидаемому снижению оплаты за потребляемую электроэнергию до 27% (до 32000 грн/сутки при действующем тарифе), к увеличению расхода электроэнергии до 9% и возрастанию общего электропотребления до 11000 кВт·ч/сутки (рис. 4.10).

Использование дополнительно резервного трубопровода позволит снизить увеличение удельного расхода электроэнергии до 2%, возрастание общего электропотребления снизится до 2300 кВт·ч/сутки и увеличится ожидаемая прибыль от снижения оплаты за потребляемую электроэнергию до 36000 грн/сутки (рис. 4.11).

Следовательно, увеличение удельного расхода электроэнергии на откачку воды для суточного интервала и снижение оплаты при регулировании режима электропотребления ГВУ шахты прямо пропорциональны водопритоку и высоте его подъема.

Выводы

1. Анализ полученных областей эффективности РРЭ главного водоотлива (рис. 4.1-4.3) показал, что возможность РРЭ ограничивается техническими параметрами рабочего состояния насосных агрегатов и трубопроводной сети, ухудшение которых снижает эффективность регулирования. Как следствие, энергоэффективность работы ГВУ в режиме П-Р практически прямо пропорционально зависит от технического состояния насосов (рис. 4.4), ухудшение которого до 50 % приводит к снижению энергоэффективности до двух раз.

2. Применение РРЭ шахтного водоотлива сопровождается увеличением количества одновременно работающих насосов на рабочий трубопровод и при-

водит к увеличению расхода электроэнергии. Однако, эффективное регулирование режима электропотребления ГВУ с часовым притоком воды, не превышающем рабочей производительности одного насоса, не приводит к увеличению удельного расхода электроэнергии на откачку воды на суточном интервале при условии использования резервного трубопровода. При этом, снижается оплата за потребленную электроэнергию в среднем до 23 % (рис. 4.9).

3. Применение РРЭ главного водоотлива приводит к увеличению удельного расхода электроэнергии до 9 % (рис. 4.8, 4.10), однако использование резервного трубопровода для откачки воды позволяет снизить прирост удельного расхода электроэнергии на откачку воды по сравнению с режимом использования только рабочих трубопроводов на 7 %, а также способствует дополнительному снижению оплаты за потребленную ГВУ электроэнергию до 5 %, в зависимости от водопритока и технического состояния оборудования (рис. 4.9, 4.11).

4. Уменьшение рабочего объема водосборника ГВУ угольной шахты приводит к отсутствию технологической возможности для накопления воды в период максимальных нагрузок в энергосистеме и, как следствие, к снижению эффективности регулирования или даже его невозможности. Следовательно, необходимость в увеличении работы насосов отсутствует, а при малых притоках воды в работе участвует минимальное количество имеющихся насосов и, соответственно, удельный расход электроэнергии не изменяется (рис. 4.5). Для больших притоков воды удельный расход электроэнергии на откачку воды при РРЭ прямо пропорционален объему водосборника. При этом ограничение рабочего объема водосборника до 75 % в течение года, независимо от водопритока, приводит к увеличению оплаты за потребляемую электроэнергию до 28 % (рис. 4.5-4.7).

РАЗДЕЛ 5

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГЛАВНОЙ ВОДООТЛИВНОЙ УСТАНОВКИ В РЕЖИМЕ ПОТРЕБИТЕЛЯ-РЕГУЛЯТОРА

5.1 Достоверность результатов моделирования режимов работы главного водоотлива угольной шахты

В качестве основного метода исследования используется метод машинного эксперимента, реализованный на базе разработанной имитационной модели. Для определения достоверности выполняемых исследований были получены некоторые фактические данные по ГВУ на шахте "Благодатная" (табл. 5.1):

- геодезическая высота нагнетания – 210 м;
- высота всасывания – 3-5 м;
- внутренний диаметр всасывающего трубопровода – 249 мм;
- внешний диаметр всасывающего трубопровода – 273 мм;
- внутренний диаметр напорного трубопровода – 249 мм;
- внешний диаметр напорного трубопровода – 273 мм;
- общая длина каждого напорного трубопровода – 425.

Таблица 5.1

Фактические данные ГВУ шахты "Благодатная"

Наименование насосной установки	Фактическая производительность насоса $Q_{факт}$, м ³ /ч	Тип электродвигателей	Номинальная мощность электродвигателя, кВт	Фактическая сила тока, потребляемая электродвигателем, А	Коэффициент мощности электродвигателя
ЦНС 300/300 №1	350	ВАО2-450	400	40	0,9
ЦНСШ 300/290 №2	390	ВАО2-450	400	39	0,89
ЦНС 300/300 №3	360	ВАО2-500	400	40	0,9
ЦНСШ 300/290 №4	390	ВАО2-450	400	38	0,86

Фактический КПД насоса и удельный расход электроэнергии на откачку воды определяются расчетным путем с использованием фактических параметров его работы.

Зависимость для определения потребляемой мощности насосом в зависимости от его фактических параметров имеет вид:

$$P_n = \frac{\rho Q_\phi H_\phi}{102 \cdot 3600 \eta_n \eta_\delta \eta_c}; \text{ кВт},$$

где Q_ϕ – фактическая подача насоса, м³/ч;

H_ϕ – фактический напор (давление), создаваемый насосом, м;

$\rho = 1020$ кг/м³ – плотность шахтной откачиваемой воды;

η_δ – КПД приводного двигателя насоса (для двигателей серии ВАО2 номинальный КПД составляет 94–95%, поэтому допускается принимать близким к номинальному, т.е. 0,9–0,92);

$\eta_c = 0,95–0,97$ – КПД электрической сети.

Если преобразовать эту формулу относительно КПД насоса:

$$\eta_n = \frac{\rho Q_\phi H_\phi}{102 \cdot 3600 P_n \eta_\delta \eta_c}.$$

Такой формулой удобно пользоваться, зная расход электроэнергии насосом за 1 час W_n (кВт·ч) или потребляемую мощность P_n (кВт), а также объем откачанной воды Q_ϕ (м³/ч) и средний напор H_ϕ (м) за этот же период времени:

$$\eta_n = \frac{\rho Q_\phi H_\phi}{102 \cdot 3600 W_n \eta_\delta \eta_c}.$$

Если фактический напор неизвестен (его сложно точно измерить), то можно определить его расчетным путем:

$$H_p = H_z + H_{вс} + h_{мп}, \text{ м,}$$

где H_z – геодезическая высота подъема воды, м;

$H_{вс} = 3 \div 5$ м – высота всасывания, м;

$h_{мп}$ – потери напора в нагнетательном трубопроводе:

$$h_{мп} = \frac{0,083 \lambda_{мп} L Q_{\phi}^2}{d^5} = \frac{0,083 \cdot 0,03 \cdot 425 \cdot (350/3600)^2}{0,249^2} = 10,45 \text{ м,}$$

где $\lambda_{мп}$ – коэффициент трения воды об стенки труб (для шахтной воды $\lambda_{мп} = 0,03$);

$L = 425$ м – длина трубопровода;

Q_{ϕ} – объем воды, протекающей по трубопроводу, м³/с;

$d = 0,249$ м – диаметр нагнетательного трубопровода.

Выполним расчет для насоса №1 главного водоотлива гор. 210 м:

$$H_p = H_z + H_{вс} + h_{мп} = 210 + 4 + 10,45 = 224,45 \text{ м;}$$

$$\eta_n = \frac{\rho Q_{\phi} H_p}{102 \cdot 3600 W_n \eta_o \eta_c} = \frac{1020 \cdot 350 \cdot 224,5}{102 \cdot 3600 \cdot 392,8 \cdot 0,92 \cdot 0,97} = 0,622 \text{ или } 62,2\%.$$

Аналогично определяем для других насосов, результаты сводим в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Определение фактических энергетических параметров насосов

№ п/п	Тип насоса*	Горизонт, м*	Фактическая подача, м ³ /ч*	Расчетный напор, м	Потребляемая энергия, кВт·ч*	Фактический КПД насоса, %	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/м ³
1	ЦНС-300/300	210	350	224,5	392,8	62,2	1,12
2	ЦНСШ-300/290	210	390	227,0	378,7	72,8	0,97
3	ЦНС-300/300	210	360	225,1	392,8	64,2	1,09
4	ЦНСШ-300/290	210	390	227,0	369,0	74,7	0,95

* фактические данные шахты

Основным энергетическим параметром, характеризующим эффективность потребления электроэнергии насосами водоотлива, является ее удельный расход на откачку 1 м³ воды. Он определяется (см. табл. 5.2):

$$w = \frac{W_n}{Q_\phi} = \frac{392,8}{350} = 1,12 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3.$$

В табл. 5.3 выполнено сравнение фактических (или расчетных) параметров насосов с аналогичными величинами, полученными с помощью разработанного алгоритма имитационного моделирования режимов работы главной водоотливной установки.

Таблица 5.3

Сравнение фактических и номинальных (расчетных) параметров насосов

№ п/п	Тип насоса	Подача, м ³ /ч			Напор, м			Мощность насоса, кВт		
		фактическая	по модели	погрешность, %	расчетный	по модели	погрешность, %	потребляемая	по модели	изменение, %
1	ЦНС-300/300	350	333,2	4,8	224,5	222,9	0,7	392,8	321,1	18,2
2	ЦНСШ-300/290	390	358,1	8,2	227,0	223,2	1,7	378,7	334,5	11,6
3	ЦНС-300/300	360	333,2	7,4	225,1	222,9	1,0	392,8	321,1	18,2
4	ЦНСШ-300/290	390	358,1	8,2	227,0	223,2	1,7	369,0	334,5	9,3

Продолжение таблицы 5.3

№ п/п	Тип насоса	КПД насоса, %			Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/м ³		
		фактический	номинальный, не менее	снижение, %	расчетный	по модели	увеличение, %
1	ЦНС-300/300	62,2	70	7,8	1,12	0,96	16,3
2	ЦНСШ-300/290	72,8	75	2,2	0,97	0,93	4,3
3	ЦНС-300/300	64,2	70	5,8	1,09	0,96	13,2
4	ЦНСШ-300/290	74,7	75	0,3	0,95	0,93	2,1

Анализ основных технологических параметров работы насосов позволяет утверждать о достоверности результатов, полученных с помощью имитационной модели. Погрешность моделирования в этом случае не превышает 8,2% по сравнению с фактической подачей, замеренной с помощью расходомера, или 1,7% по сравнению с напором, рассчитанным по аналитическим зависимостям.

Мощность насоса, рассчитанная по модели, определяется для близких к номинальным параметрам насосной установки и трубопроводной сети. Увеличение ее фактического потребляемого значения, особенно на 18,2% для обоих насосов ЦНС-300/300, свидетельствует о незначительном ухудшении их технического состояния, а снижение фактического КПД насосов по сравнению с номинальным на 7,8% также подтверждает этот вывод.

5.2 Экономическая оценка результатов исследований энергоэффективности работы главной водоотливной установки

Экономическую оценку представленных в работе мероприятий, направленных на повышение энергоэффективности работы шахтного водоотлива, представлено на конкретных примерах в условиях ПАО "ДТЭК Павлоград-уголь":

ГВУ № 1 (шахта "Благодатная"). Горизонт водоотлива 210 м, максимальный приток воды 350 м³/ч, ГВУ имеет водосборник, состоящий из двух ветвей объемом 900 и 640 м³, четыре насоса ЦНС 300-300 (из которых 2 рабочих и 2 резервных) и два напорных трубопровода диаметром 249 мм (1 рабочий и 1 резервный).

ГВУ № 2 (шахта "им. Н.И. Сташкова"). Горизонт водоотлива 225 м, максимальный приток воды 1200 м³/ч, ГВУ имеет водосборник, состоящий из двух ветвей объемом 2000 и 950 м³, десять насосов ЦНС 300-300 (4 рабочих, 4 резервных и 2 в ремонте) и три напорных трубопровода диаметром 350 мм (2 рабочих и 1 резервный).

5.2.1 Снижение оплаты за электроэнергию при функционировании главной водоотливной установки

Предположим, что при существующих технических и технологических условиях функционирования водоотлива используются минимальные принципы РРЭ, т. е. режим работы насосов в пиковый период зависит от текущего состояния водосборника.

С помощью разработанного и описанного в п. 3.2 алгоритма смоделируем режимы работы ГВУ № 1 при следующих вариантах начальных условий и исходных данных:

1) работа ГВУ с существующим объемом водосборника, равном $900 + 640 = 1540 \text{ м}^3$ и заилением 10 %, т. е. рабочий объем: $1540 \text{ м}^3 - 10 \% = 1386 \text{ м}^3$, с одним рабочим трубопроводом;

2) работа ГВУ с существующим объемом водосборника при условии выведения ветви с меньшим объемом (640 м^3) в чистку, т. е. рабочий объем составляет 900 м^3 с одним рабочим трубопроводом;

3) работа ГВУ с существующим объемом водосборника при условии выведения ветви с большим объемом (900 м^3) в чистку, т. е. рабочий объем составляет 640 м^3 , с одним рабочим трубопроводом (рис. 5.1);

4) работа ГВУ с двумя трубопроводами (рабочий и резервный) и с существующим объемом водосборника, равным $900 + 640 = 1540 \text{ м}^3$ и заилением 10 %, т. е. рабочий объем: $1540 \text{ м}^3 - 10 \% = 1386 \text{ м}^3$;

5) работа ГВУ с объемом водосборника, рассчитанным в соответствии с разработанным и описанным в п. 2.1-2.2 способом, т. е. водосборник состоит из двух равных по объему ветвей с удельным объемом каждой $4,6 \text{ м}^3/(\text{м}^3/\text{ч})$ и заилением 10 %: $2 \times 4,6 \times Q_{\max} = 2 \times 1610 = 3220 \text{ м}^3 - 10 \% = 2898 \text{ м}^3$, с одним рабочим трубопроводом;

6) работа ГВУ с увеличенным объемом водосборника при условии выведения одной из ветвей в чистку, т. е. с рабочим объемом равным $4,6 \times Q_{\max} = 1610 \text{ м}^3$ и с одним рабочим трубопроводом (рис. 5.2);

7) работа ГВУ с двумя трубопроводами (рабочий и резервный) и с увеличенным объемом водосборника, равным $2 \times 4,6 \times Q_{\max} = 2 \times 1610 = 3220 \text{ м}^3 - 10\% = 2898 \text{ м}^3$ при заилении 10 %.

Технико-экономические показатели режимов работы ГВУ, полученные в результате моделирования, приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Технические и экономические показатели режимов работы ГВУ № 1

Вар.	Удельный расход электроэнергии w_0 , кВт·ч/м ³ (на H=210 м)	Расход электроэнергии по зонам суток $W_{зон}$, кВт·ч			Оплата за потребляемую электроэнергию по зонам суток $C_{w, зон}$, грн		
		пик	полупик	ночь	пик	полупик	ночь
1	1,0035	322,1	4809,4	3267,8	670,9	6083,0	1418,2
2	0,9895	966,3	4302,9	3014,5	2013	5442,3	1308,3
3	0,9754	1610,5	3796,4	2761,2	3355	4801,6	1198,4
4	0,9614	322,1	4509,4	3221	670,9	5703,5	1397,9
5	1,0088	0	4302,9	4027,6	0	5442,3	1748
6	1,0088	0	4556,2	3774,3	0	5762,6	1638
7	0,9614	0	4187,3	3865,2	0	5296,1	1677,5

Продолжение таблицы 5.4

Вар.	Объем откачиваемой воды по зонам суток $V_{зон}$, м ³			Расход электроэнергии в сутки $W_{сут}$, кВт·ч	Оплата за потребляемую электроэнергию в сутки $C_{w, сут}$, грн	Объем откачиваемой воды в сутки $V_{сут}$, м ³
	пик	полупик	ночь			
1	335,0	4798,9	3236,1	8399,3	8172,1	8370,0
2	1005,1	4353,4	3013,3	8283,7	8763,6	8371,8
3	1675,1	3908	2790,6	8168,1	9355,0	8373,7
4	335	4690,3	3350,2	8052,5	7772,3	8375,5
5	0	4353,4	3904,2	8330,5	7190,3	8257,6
6	0	4576,2	3681,5	8330,5	7400,6	8257,7
7	0	4355,3	4020,3	8052,5	6973,6	8375,6

На рис. 5.1 и 5.2 приведены график наполнения водосборника и график электрических нагрузок ГВУ № 1 для условий существующего и увеличенного объема соответственно. Существующий водосборник шахты имеет две неравные по вместимости ветви и при выведении большей из них в чистку – объема меньшей, как видно из рис. 5.1, недостаточно для полного исключения работы насосов из зон максимальных нагрузок в энергосистеме.

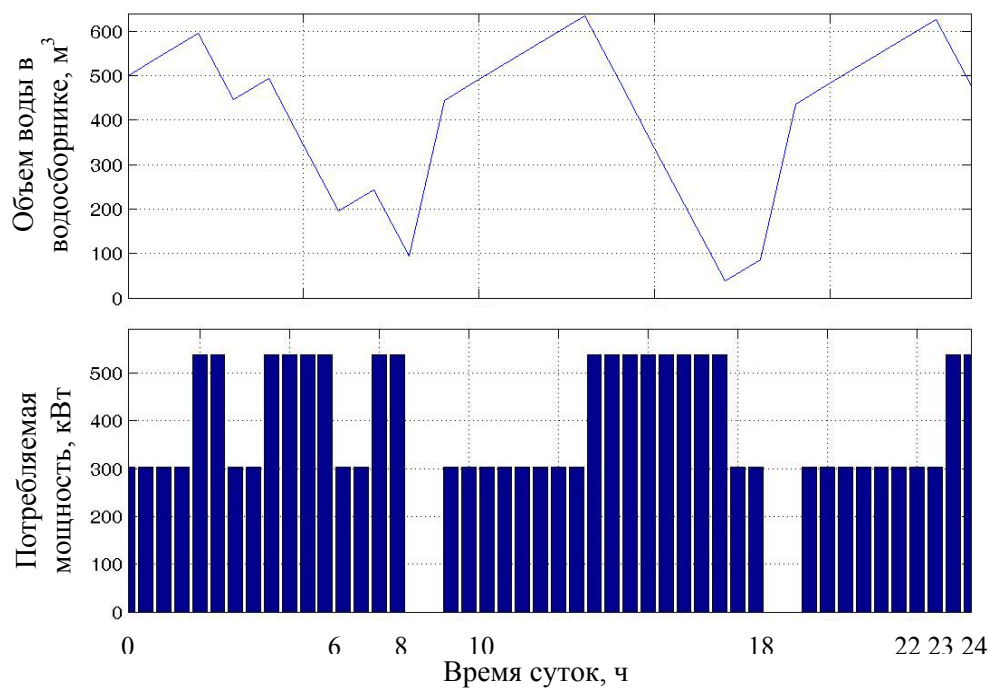


Рис. 5.1. Работа ГВУ № 1 с существующим объемом водосборника при выведении ветви с большим объемом в чистку

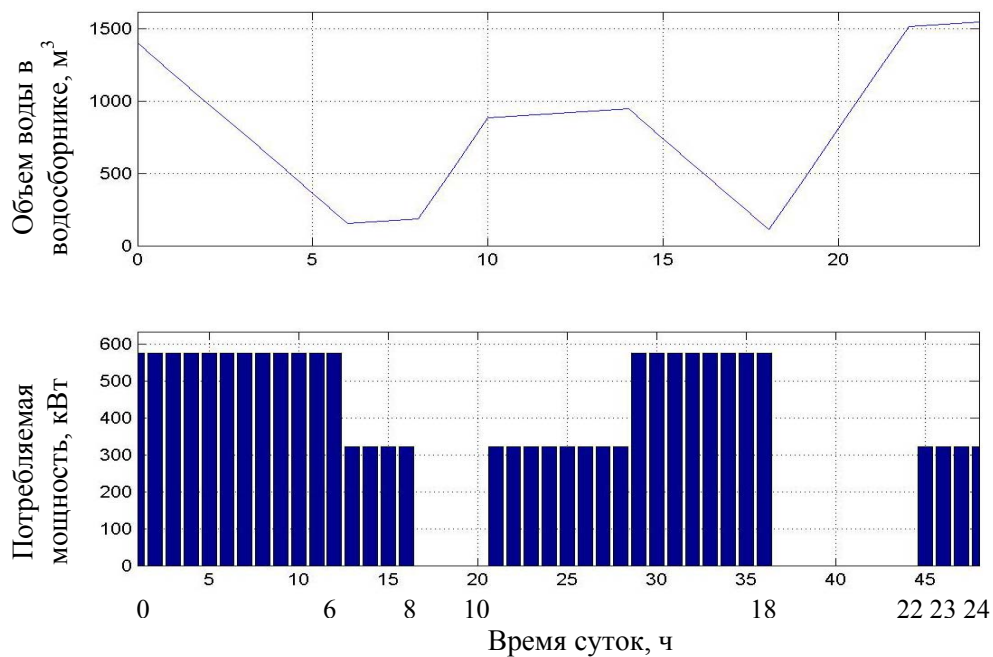


Рис. 5.2. Работа ГВУ № 1 с увеличенным объемом водосборника при выведении одной ветви в чистку

Следовательно, эффективность регулирования режимов электропотребления в периоды чистки водосборника будет низкой. Решить данную проблему предлагается путем сооружения водосборника с равными по вместимости вет-

выми, объем которых учитывает наибольшую длительность максимальных нагрузок в энергосистеме и заилиение. Применение данного способа определения объема водосборника позволит полностью исключить работу насосов в периоды пиковых нагрузок независимо от графика чистки его ветвей. Как видно из рис. 5.2 это позволит осуществлять эффективное регулирование режимов электропотребления ГВУ на протяжении всего года.

Для полученных технико-экономических показателей (табл. 5.4) определим изменения величин расхода электроэнергии и ее оплаты для годового интервала времени при использовании следующих мероприятий по повышению энергоэффективности ГВУ № 1:

- увеличение существующей емкости водосборника до величины $2 \times 4,6 \times Q_{\max} = 2 \times 1610 = 3220 \text{ м}^3$ при следующем графике чистки его ветвей: 3 месяца в году находится в чистке первая ветвь (варианты 2 и 6), 3 месяца – вторая ветвь (варианты 3 и 6) и 6 месяцев – в работе находятся две ветви, заиленные в среднем на 10 % (варианты 1 и 5):

$$\begin{aligned} \Delta W_2^{ГВУ1} &= (8283,7 \cdot 90 + 8168,1 \cdot 90 + 8399,3 \cdot 185) - \\ &- (8330,5 \cdot 90 + 8330,5 \cdot 90 + 8330,5 \cdot 185) = 6,44 \text{ МВт} \cdot \text{ч в год}; \\ \Delta C_w^{ГВУ1} &= (8763,6 \cdot 90 + 9355 \cdot 90 + 8172,1 \cdot 185) - \\ &- (7400,6 \cdot 90 + 7400,6 \cdot 90 + 7190,3 \cdot 185) = 475,3 \text{ тыс. грн в год.} \end{aligned}$$

Увеличение емкости водосборника способствует накоплению большего объема воды в период пиковых нагрузок, которую необходимо откачать во внепиковые периоды увеличенным количеством насосов, что приведет возрастанию расхода электроэнергии на 0,22 % (6,44 МВт·ч в год), однако при этом снизится оплата за ее потребление на 15,3 % (475,3 тыс. грн в год).

Увеличение длительности чистки ветвей водосборника способствует снижению расхода электроэнергии, однако сопровождается возрастанием оплаты за ее потребление. (см. п. 4.2).

- использование в работе резервного трубопровода при существующем объеме водосборника (варианты 1 и 4) и при условии увеличения емкости (варианты 5 и 7):

$$\Delta W_{z(1,4)}^{ГВУ1} = (8399,3 - 8052,5)365 = 126,6 \text{ МВт} \cdot \text{ч в год};$$

$$\Delta C_{w(1,4)}^{ГВУ1} = (8172,1 - 7772,3)365 = 145,9 \text{ тыс. грн в год};$$

$$\Delta W_{z(5,7)}^{ГВУ1} = (8330,5 - 8052,5)365 = 101,5 \text{ МВт} \cdot \text{ч в год};$$

$$\Delta C_{w(5,7)}^{ГВУ1} = (7190,3 - 6973,6)365 = 79,1 \text{ тыс. грн в год}.$$

При работе ГВУ № 1 с существующей емкостью водосборника использование резервного трубопровода в процессе РРЭ позволит снизить расход электроэнергии и оплату за нее на 4,13 % (126,6 МВт·ч в год) и 4,9 % (145,9 тыс. грн в год) соответственно. Для условий увеличения емкости водосборника использование резервного трубопровода снизит расход электроэнергии и оплату за ее потребление на 3,3 % (101,5 МВт·ч в год) и 3,01 % (79,1 тыс. грн в год) соответственно.

- эффективность применения всех предлагаемых мероприятий (при условии круглогодичной работы обеих ветвей водосборника, заиленных на 10 %, без выведения в чистку): увеличение емкости водосборника и использование резервного трубопровода (варианты 1 и 7):

$$\Delta W_{z(1,7)}^{ГВУ1} = (8399,3 - 8052,5)365 = 126,6 \text{ МВт} \cdot \text{ч в год};$$

$$\Delta C_{w(1,7)}^{ГВУ1} = (8172,1 - 6973,6)365 = 437,5 \text{ тыс. грн в год}.$$

Увеличение емкости водосборника совместно с использованием резервного трубопровода позволит снизить годовой расход электроэнергии и оплату за нее на 4,13 % (126,6 МВт·ч в год) и 14,7 % (437,5 тыс. грн в год) соответственно.

Аналогично получены технико-экономические показатели режимов работы ГВУ № 2, которые представлены в табл. 5.5, при следующих вариантах начальных условий и исходных данных:

1) работа ГВУ с существующим объемом водосборника, равном $2000 + 950 = 2950 \text{ м}^3$ и заилением 10 %, т. е. рабочий объем: $2950 \text{ м}^3 - 10 \% = 2655 \text{ м}^3$, с двумя рабочими трубопроводами (рис. 5.3);

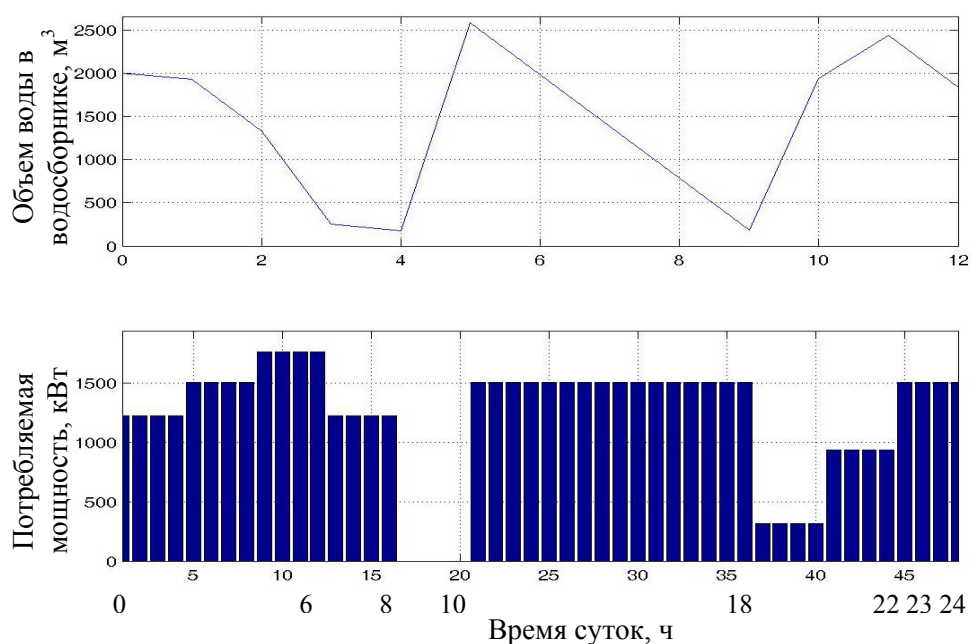


Рис. 5.3. Работа ГВУ № 2 с существующим объемом водосборника при заилении 10 %

2) работа ГВУ с существующим объемом водосборника при условии выведения ветви с меньшим объемом (950 м^3) в чистку, т. е. рабочий объем составляет 2000 м^3 с двумя рабочими трубопроводами;

3) работа ГВУ с существующим объемом водосборника при условии выведения ветви с большим объемом (2000 м^3) в чистку, т. е. рабочий объем составляет 950 м^3 , с двумя рабочими трубопроводами;

4) работа ГВУ с тремя трубопроводами (рабочие и резервный) и с существующим объемом водосборника, равным $2000 + 950 = 2950 \text{ м}^3$ и заилением 10 %, т. е. рабочий объем: $2950 \text{ м}^3 - 10 \% = 2655 \text{ м}^3$;

5) работа ГВУ с объемом водосборника, рассчитанным в соответствии с разработанным и описанным в п. 2.1 - 2.2 способом, т. е. водосборник состоит из двух равных по объему ветвей с удельным объемом каждой $4,6 \text{ м}^3/(\text{м}^3/\text{ч})$ и заилением 10 %: $2 \times 4,6 \times Q_{\max} = 2 \times 5520 = 11040 \text{ м}^3 - 10 \% = 9936 \text{ м}^3$, с двумя рабочими трубопроводами;

6) работа ГВУ с увеличенным объемом водосборника при условии выведения одной из ветвей в чистку, т. е. с рабочим объемом равным $4,6 \times Q_{\max} = 5520 \text{ м}^3$ и с двумя рабочими трубопроводами;

7) работа ГВУ с тремя трубопроводами (рабочие и резервный) и с увеличенным объемом водосборника, равным $2 \times 4,6 \times Q_{\max} = 2 \times 5520 = 11040 \text{ м}^3 - 10 \% = 9936 \text{ м}^3$ при заилении 10 %.

Таблица 5.5

Технические и экономические показатели режимов работы ГВУ № 2

Вар.	Удельный расход электроэнергии w_0 , кВт·ч/м ³ (на Н=210 м)	Расход электроэнергии по зонам суток $W_{зон}$, кВт·ч			Оплата за потребляемую электроэнергию по зонам суток $C_{w, зон}$, грн		
		пик	полупик	ночь	пик	полупик	ночь
1	0,9957	2498	15982	10492	5203,9	20214	4553,4
2	0,9925	3758	15150	9659,6	7828,6	19162	4192,3
3	0,9898	6771,9	13194	8581,7	14107	16687	3724,5
4	0,9848	2519,9	15532	10419	5249,5	19645	4522
5	1,017	0	14241	15131	0	18012	6306,3
6	1,0077	0	16799	12231	0	21247	5134,7
7	0,991	0	13109	15471	0	16580	6540,8

Продолжение таблицы 5.5

Вар.	Объем откачиваемой воды по зонам суток $V_{зон}$, м ³			Расход электроэнергии в сутки $W_{сут}$, кВт·ч	Оплата за потребляемую электроэнергию в сутки $C_{w, сут}$, грн	Объем откачиваемой воды в сутки $V_{сут}$, м ³
	пик	полупик	ночь			
1	2550,1	15971	10446	28972	29971,3	28967,1
2	3843,1	15184	9659,1	28567,6	31182,9	28686,2
3	6853,2	13326	8661,8	28547,6	34518,5	28841,0
4	2586	15806	10517	28470,9	29416,5	28909,0
5	0	14163	14693	29372	24318,3	28856,0
6	0	16731	12079	29030	26381,7	28810,0
7	0	13379	15456	28580	23120,8	28835,0

Для полученных технико-экономических показателей (табл. 5.5) определим изменения величин расхода электроэнергии и ее оплаты для годового интервала времени при использовании следующих мероприятий по повышению энергоэффективности ГВУ № 2:

- увеличение существующей емкости водосборника до величины $2 \times 4,6 \times Q_{\max} = 2 \times 5520 = 11040 \text{ м}^3$ при следующем графике чистки его ветвей: 3 месяца в году находится в чистке первая ветвь (варианты 2 и 6), 3 месяца – вторая ветвь (варианты 3 и 6) и 6 месяцев – в работе находятся две ветви, зайденные в среднем на 10 % (варианты 1 и 5):

$$\Delta W_z^{ГВУ2} = (28567,6 \cdot 90 + 28547,6 \cdot 90 + 28972 \cdot 185) - \\ - (29030 \cdot 90 + 29030 \cdot 90 + 29372 \cdot 185) = 157,03 \text{ МВт} \cdot \text{ч в год};$$

$$\Delta C_w^{ГВУ2} = (31182,9 \cdot 90 + 34518,5 \cdot 90 + 29971,3 \cdot 185) - \\ - (26381,7 \cdot 90 + 26381,7 \cdot 90 + 24318,3 \cdot 185) = 2181,96 \text{ тыс. грн в год.}$$

Увеличение емкости водосборника способствует снижению оплаты за электроэнергию на 19,3 % (2181,96 тыс. грн в год) и приводит к увеличению ее расхода на 1,52 % (157,03 МВт·ч в год).

- использование в работе резервного трубопровода при существующем объеме водосборника (варианты 1 и 4) и при условии увеличения емкости (варианты 5 и 7):

$$\Delta W_z^{ГВУ2(1,4)} = (28972 - 28470,9)365 = 182,9 \text{ МВт} \cdot \text{ч в год};$$

$$\Delta C_w^{ГВУ2(1,4)} = (29971,3 - 29416,5)365 = 202,5 \text{ тыс. грн в год};$$

$$\Delta W_z^{ГВУ2(5,7)} = (29372 - 28580)365 = 289,1 \text{ МВт} \cdot \text{ч в год};$$

$$\Delta C_w^{ГВУ2(5,7)} = (24318,3 - 23120,8)365 = 437,1 \text{ тыс. грн в год.}$$

При работе ГВУ № 2 с существующей емкостью водосборника использование резервного трубопровода в процессе РРЭ позволит снизить расход электроэнергии и оплату за ее потребление на 1,73 % (182,9 МВт·ч в год) и 1,85 % (202,5 тыс. грн в год) соответственно. При условии увеличения емкости водосборника использование резервного трубопровода снизит расход электроэнергии и оплату за ее потребление на 2,7 % (289,1 МВт·ч в год) и 4,92 % (437,1 тыс. грн в год) соответственно.

- эффективность применения всех предлагаемых мероприятий (при условии круглогодичной работы обеих ветвей водосборника, заиленных на 10 %, без выведения в чистку): увеличение емкости водосборника и использование резервного трубопровода (варианты 1 и 7):

$$\Delta W_{z(1,7)}^{ГВУ2} = (28972 - 28580)365 = 143,1 \text{ МВт} \cdot \text{ч в год};$$

$$\Delta C_{w(1,7)}^{ГВУ2} = (29971,3 - 29416,5)365 = 2500 \text{ тыс. грн в год.}$$

Увеличение емкости водосборника совместно с использованием резервного трубопровода позволит снизить годовой расход электроэнергии и плату за ее потребление на 1,35 % (143,1 МВт·ч в год) и 22,9 % (2,5 млн. грн в год) соответственно.

Применение всех предлагаемых мероприятий на ГВУ № 1 и 2 будет способствовать суммарному снижению расхода электроэнергии и платы за нее на 5,5 % и 37,5 %:

$$\Delta W_{z(1,7)}^{ГВУ1,2} = 126,6 + 143,1 = 269,7 \text{ МВт} \cdot \text{ч в год};$$

$$\Delta C_{w(1,7)}^{ГВУ1,2} = 437,5 + 2500 = 2,94 \text{ млн. грн в год.}$$

Однако, применение на ГВУ № 1 и 2 только части рекомендуемых мероприятий, не требующих дополнительных капитальных вложений, например,

использование в работе (при РРЭ) резервного трубопровода позволит снизить суммарный расход электроэнергии и оплату за нее на 5,8 % и 6,7 %:

$$\Delta W_{z(1,4)}^{ГВУ1,2} = 126,6 + 182,9 = 309,5 \text{ МВт} \cdot \text{ч в год};$$

$$\Delta C_{w(1,4)}^{ГВУ1,2} = 145,9 + 202,5 = 348,4 \text{ тыс. грн в год.}$$

5.2.2 Снижение расхода топлива на тепловых электростанциях

Уровень энергоэффективности функционирования шахтного водоотлива в режиме П-Р определяется не только величиной снижения оплаты за потребляемую электроэнергию, но и величиной снижения расхода топлива на тепловых электростанциях для покрытия максимальных электрических нагрузок (см. п. 1.1).

Удельный расход топлива на производство определяется двумя составляющими: при равномерном ГЭН g_{0w} и на покрытие неравномерной части ГЭН g_{0p} . При помощи П-Р возможно скорректировать величину расхода топлива для покрытия неравномерной части ГЭН [1]:

$$\begin{aligned} g_{0p} &= \frac{0,12287}{\eta_{nm}} \left(\frac{1+\alpha}{2\sqrt{\alpha}} - 0,416\alpha - 0,584 \right) = \\ &= \frac{0,12287}{0,3} \left(\frac{1+0,75}{2\sqrt{0,75}} - 0,416 \cdot 0,75 - 0,584 \right) = 0,0468 \text{ кг у.т./кВт} \cdot \text{ч,} \end{aligned}$$

где α – коэффициент неравномерности ГЭН энергосистемы (для условий выполняемой экономической оценки принимаем 0,75);

$g_0 = 410$ г у.т./кВт·ч – средняя величина удельного расхода условного топлива (табл. 1.6 [1]);

$$\eta_{nm} = \frac{0,12287}{g_0} = \frac{0,12287}{0,410} = 0,3 \text{ – коэффициент преобразования теплоты топлива}$$

в электрическую энергию.

С учетом принятой теплоты сгорания угля 25 МДж/кг определим величину удельного расхода натурального топлива:

$$g_{0p} = \frac{Q_{ум}}{Q_{нт}} 0,0468 = \frac{29,3}{25} 0,0468 = 0,0548 \text{ кг н.т./кВт}\cdot\text{ч} \approx 55 \text{ г н.т./ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Оценочная номинальная мощность 11-ти ГВУ шахт Западного Донбасса составляет 6400 кВт, из которых расчетная рабочая – 5000 кВт. Определим электроэнергию, выводимую из зоны максимальных (пиковых) нагрузок в течение года:

$$\Delta W_{П} = P_p t_{П} T_z = 5000 \cdot 6 \cdot 365 = 10950 \text{ МВт}\cdot\text{ч в год}.$$

Расход топлива на покрытие выведенной энергии составляет:

$$\Delta G = \Delta W_{П} g_{0p} = 10950 \cdot 55 = 602,25 \text{ т в год}.$$

При рыночной стоимости угля 1500 грн/т снижение расхода топлива в денежном эквиваленте составит:

$$C_g = C_0 \Delta G = 1500 \cdot 602,25 = 903,4 \text{ тыс. грн в год}.$$

Следовательно, исключение работы насосов ГВУ шахт Западного Донбасса в период максимальных нагрузок в энергосистеме (при глубоком регулировании режимов электропотребления) позволит снизить расход топлива на ТЭС на 602 т в год, что эквивалентно 903 тыс. грн.

Выводы

1. Сравнение результатов имитационного моделирования с фактическими данными, полученными экспериментальным путем, позволяет утверждать о погрешности получаемых результатов исследований, не превышающей 9 %, а также о погрешности, не превышающей 2 % по сравнению с данными, рассчитанными по аналитическим зависимостям.

2. Разработанные и предложенные к реализации технологические условия для функционирования водоотлива позволят осуществлять эффективное регулирование режимов электропотребления. Увеличение емкости водосборника, в соответствии с разработанным способом (п. 2.1-2.2), позволит снизить оплату за потребление электроэнергии до 20 %, однако расход электроэнергии, в результате интенсивной работы насосов во внепиковые периоды, увеличится до 2 %. Использование резервного трубопровода в процессе откачки воды позволит дополнительно снизить оплату за потребление электроэнергии, а также уменьшить ее расход.

3. Повышение эффективности РРЭ позволяет полностью исключить работу насосов главного водоотлива в периоды максимальных нагрузок в энергосистеме и, как следствие, способствует уменьшению неравномерности ГЭН. Снижение мощности, необходимой для покрытия неравномерной части ГЭН, способствует уменьшению расхода топлива на ТЭС, что является важным и необходимым ввиду его дефицита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена научно-прикладная задача, заключающаяся в комплексной оценке влияния изменяющихся технических и технологических параметров состояния и режимов работы главной водоотливной установки на энергоэффективность ее функционирования в режиме потребителя-регулятора, что обусловило необходимость разработки имитационной модели для реализации алгоритма моделирования возможных и выбора соответствующих критерию минимального удельного расхода электроэнергии режимов работы водоотлива.

Основные выводы и результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Установлено, что существующий объем водосборников ГВУ большинства шахт Западного Донбасса не соответствует действующим Правилам безопасности в угольных шахтах и Правилам технической эксплуатации угольных шахт для возможности осуществления эффективного регулирования режимов электропотребления и, соответственно, не позволяет в полной мере использовать шахтный водоотлив в режиме П-Р.

2. Разработанный способ определения объема водосборника ГВУ угольных шахт, учитывающий неравномерность объемов его ветвей, позволит повысить эффективность работы водоотлива в режиме П-Р посредством полного исключения работы насосов в часы максимума нагрузки в энергосистеме на протяжении всего года независимо от режима чистки ветвей водосборника. Изменение удельного расхода электроэнергии при РРЭ прямо пропорционально зависит от изменения вместимости водосборника, при этом ограничение его рабочего объема до 75 % в течение года, независимо от величины водопритока, приводит к увеличению оплаты потребления электроэнергии до 28 %.

3. Доказано, что неравномерность объемов ветвей большинства существующих водосборников угольных шахт является причиной либо невозможности использования водоотлива в режиме П-Р (при выведении в чистку большей по вме-

стимости ветви и недостаточном объеме оставшейся в работе), либо избыточного объема (при выведении в чистку меньшей по вместимости ветви), а соответственно и излишнего объема горно-строительных подземных работ на сооружение водосборника. Следовательно, сооружение равных по вместимости ветвей водосборника и одновременное увеличение их количества позволит снизить необходимый для эффективного регулирования объем водосборника до 15 %, что отразится на уменьшении объема подземных горно-строительных работ.

4. Установлено, что параллельная работа насосов на ограниченное количество трубопроводов приводит к снижению их индивидуальной производительности и, соответственно, суммарной, что приводит к необходимости увеличения числа включаемых насосов и, как следствие, к возрастанию удельного расхода электроэнергии. При этом режим работы насосов в количестве более двух на один трубопровод является неэффективным, ввиду резкого увеличения удельного расхода электроэнергии.

5. Доказано, что использование резервного трубопровода для целей РРЭ шахтного водоотлива позволяет снизить прирост удельного расхода электроэнергии на откачку воды по сравнению с режимом использования только рабочих трубопроводов до 7 %, а также способствует дополнительному снижению оплаты потребленной ГВУ электроэнергии до 5 % в зависимости от водопритока и технического состояния оборудования. При этом увеличение емкости водосборника в соответствии с разработанным способом совместно с использованием резервного трубопровода в процессе откачивания воды при РРЭ позволит снизить годовой расход электроэнергии и оплату ее потребления до 4 % и 23 % соответственно в зависимости от водопритока. Кроме того установлено, что величина оплаты потребленной главным водоотливом электроэнергии в течение суток при РРЭ зависит от начального уровня воды в водосборнике и может быть снижена на величину до 10 % при уровне воды в начале суток, близком к максимальному.

6. Установлено, что энергоэффективность функционирования ГВУ зависит от множества условий и состояний системы водоотлива, что позволяет представить ее в виде функционала, зависящего от нескольких функций. Разработанный алгоритм моделирования режимов работы ГВУ позволяет из множества сформированных режимов ее функционирования для любых технологических характеристик водоотлива и технических параметров насосов и трубопроводной сети с помощью вариационного исчисления выбрать энергоэффективный режим работы.

7. Реализация разработанного алгоритма осуществляется с помощью разработанной имитационной модели определения режима работы насосов ГВУ с учетом их рабочих параметров, которая позволяет моделировать схемы всех возможных вариантов работы водоотливной установки для заданных условий, а также определять из них варианты с циклическим режимом работы насосов водоотлива в течение расчетного периода времени. При этом формируется любой из возможных графиков наполнения водосборника и соответствующий ему график электрических нагрузок ГВУ, а также определяется режим с минимальным удельным расходом электроэнергии при минимизации оплаты ее потребления. Для выбранного (текущего) режима определяется оплата потребленной электроэнергии и ее общий расход за сутки, а также удельный расход электроэнергии на откачку воды. Как следствие, получена возможность выбора режима работы ГВУ с минимальными энергетическими показателями при условии достижения максимального снижения оплаты потребляемой электроэнергии в результате РРЭ водоотлива.

8. Полученные функциональные зависимости влияния степени ухудшения технического состояния трубопроводной сети и насосных агрегатов на удельный расход электроэнергии позволяют прогнозировать такие изменения технического состояния при соответствующем возрастании удельного расхода, мониторинг величины которого позволит своевременно определять причины такого увеличения. Ухудшение технического состояния насосов и трубопроводов приводит к изменению их рабочих параметров, при этом увеличивается

продолжительность выполняемой ими работы по откачке воды и, как следствие, возрастает расход электроэнергии на выполнение того же объема работы. Таким образом, возможность РРЭ ограничивается техническим состоянием элементов системы водоотлива, которые снижают его эффективность в два-три раза в зависимости от водопритока.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Разумный Ю.Т. Аспекти вирішення проблем нерівномірності споживання електричної енергії: монографія / Ю.Т. Разумний, А.В. Рухлов. – Д.: Національний гірничий університет, 2012. – 95 с.
2. Рухлова Н.Ю. О проблеме эффективного электропотребления главным водоотливом шахты / Н.Ю. Рухлова // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 89. – С. 143-145.
3. Патон Б. Помогут ли газовые турбины преодолеть проблемы энергосистемы Украины / Б. Патон, А. Халатов // Зеркало недели. – 2008. – № 47. – С. 3–8.
4. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. [Електронний ресурс] / Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2014. – Режим доступа:
<http://mpe.kmu.gov.ua/fuel/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358>.
5. Разумный Ю.Т. Режимы электроспоживання вугільних шахт: навч. посіб. / Ю.Т. Разумний. – Д.: НГА України, 2002. – 126 с.
6. Правила безпеки у вугільних шахтах: НПАОП 10.0-1.01-10. – К.: Державний комітет з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду, 2010. – С. 432.
7. Правила технічної експлуатації вугільних шахт: СОУ 10.1-00185790-002-2005. – К.: Мінвуглепром України, 2006. – С. 353.
8. Нормирование топливно-энергетических ресурсов и регулирование режимов электропотребления: сборник инструкций / под общей ред. В.В. Дегтярева. – Минуглепром СССР, М.: Недра, 1983. – 224 с.
9. Разумный Ю.Т. Оценка дополнительных технологических устройств для регулирования режимов электропотребления на угольных шахтах / Ю.Т. Разумный, В.Н. Герасимович // Энергоатомиздат „Промышленная энергетика”. – 1987. – №6.

10. Пивняк Г.Г. О выборе способа регулирования режимов электропотребления / Г.Г. Пивняк, Ю.Т. Разумный, В.Т. Заика // Всесоюзная научная конференция „Пути экономии и повышение эффективности режимов электропотребления (доклады). – Смоленск, 1987.

11. Заика В.Т. Комплексная оценка и повышение энергоэффективности работы шахтных водоотливных установок / В.Т. Заика, В.Г. Разводов // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2000. – Вип. 64. – С. 17–26.

12. Разумный Ю.Т. Эффективность потребителей-регуляторов электрической нагрузки на угольных шахтах / Ю.Т. Разумный, В.Н. Герасимович, В.С. Мочков // Уголь Украины. – 1988. – №9.

13. Разумный Ю.Т. Методические рекомендации по проектированию технологических устройств для регулирования режимов электропотребления на шахтах / Ю.Т. Разумный, В.Н. Герасимович, В.С. Мочков // Уголь Украины. – 1988. – № 10.

14. Разумный Ю.Т. Методические основы определения эффективности применения потребителей-регуляторов электрической нагрузки на угольных шахтах / Ю.Т. Разумный, В.Н. Герасимович // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1988. – №9.

15. Разумный Ю.Т. Эффективность регулирования режимов электропотребления на угольных шахтах в условиях нового тарифа на электроэнергию / Ю.Т. Разумный, В.Н. Герасимович // Энергоатомиздат „Промышленная энергетика”. – 1989. – №22.

16. Разумный Ю.Т. Методические основы определения экономической эффективности применения потребителей регуляторов электрической нагрузки на угольных шахтах / Ю.Т. Разумный, В.Н. Герасимович // Техника. Межведомственный научн.-техн. сб. Горная электромеханика и автоматики. – 1989. – №54.

17. Разумный Ю.Т. Оптимальное количество ветвей водосборника главного водоотлива шахты / Ю.Т. Разумный, В.С. Мочков // Уголь Украины. – 1989. – № 3. – С. 33-34.

18. Разумный Ю.Т. Регулирование электропотребления строящихся шахт в часы максимальной нагрузки / Ю.Т. Разумный, В.В. Гамаюнов, И.П. Титов, В.И. Загний // Уголь Украины. – 1990. – №12.

19. Разумный Ю.Т. Проблемы использования водоотливных установок угольных шахт в качестве потребителей-регуляторов / Ю.Т. Разумный, Е.С. Ильченко // РВК НГУ Наук.-техн. зб. Гірничя електромеханіка та автоматика. – 2004. – Вип. 73.

20. Разумный Ю.Т. Принципы управления режимами электропотребления при ограничениях электроснабжения / Ю.Т. Разумный, А.В. Рухлов // Наукові праці ДонНТУ, серія "Електротехніка і енергетика". – Донецьк: РВК ДонНТУ, 2004. – №79.

21. Разумный Ю.Т. Моделирование режимов работы многоагрегатных шахтных водоотливных установок / Ю.Т. Разумный, Е.С. Родная // Технічна електродинаміка. Тем. вип. Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 4. – 2006.

22. Разумный Ю.Т. Критерий экономической эффективности режимов работы многоагрегатных водоотливных установок / Ю.Т. Разумный, Е.С. Родная // Уголь Украины. – 2006. – №2.

23. Разумный Ю.Т. Умови ефективного регулювання режимів електроспоживання головним водовідливом шахт / Ю.Т. Разумный, А.В. Рухлов, К.С. Родна // РВК НГУ, Науковий вісник НГУ. – 2010. – №1.

24. Праховник А.В. Исследование электрических нагрузок и разработка экономически целесообразных графиков электропотребления ЦПП угольных шахт: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.09.03 „Электротехнические комплексы и системы” / А.В. Праховник. – Киев, 1971. – 24 с.

25. Праховник А.В. Управление электропотреблением водоотливных установок: Механизация и автоматизация управления / А.В. Праховник, С.П. Шевчук, В.Ф. Находов // Вестник КПИ – 1979. – №3. – С. 30-33.

26. Данильчук Г.И. Автоматизация шахтного водоотлива с учетом графика нагрузки энергосистемы / Г.И. Данильчук, А.В. Праховник, С.П. Шевчук // Вестник КПИ "Серия горной электромеханики и автоматики". – №4. – С. 35-37.

27. Данильчук Г.И. Автоматизация электропотребления водоотливных установок / Г.И. Данильчук, С.П. Шевчук, П.К. Василенко. – К.: Техника, 1981. – 102 с.

28. Шевчук С.П. Повышение эффективности водоотливных установок: учебное пособие для горных специальностей электромеханического профиля / С.П. Шевчук. – К.: УМК ВО Минвуза УССР, 1990. – 103 с.

29. Шевчук С.П. О влиянии внепикового управления электропотреблением водоотлива горных предприятий на допустимое время перерыва в его работе / С.П. Шевчук // Вестник КПИ "Серия горной электромеханики и автоматики" – 1992. – №23. – С. 34-38.

30. Шевчук С.П. Повышение надежности и экономичности функционирования мощных водоотливных установок горных предприятий: автореф. дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук: спец. 05.15.16 „Горные машины” / С.П. Шевчук. – Днепропетровск, 1997.

31. Праховник А.В. Вирівнювання графіків електричних потужностей енергосистем за допомогою споживачів-регуляторів дискретної дії / А.В. Праховник, В.П. Розен, В.Є. Майстренко // Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці: тези доповідей 1-ої міжнародної наук.-техн. конф. Львів, 19-22 вересня, 1995. – Львів, 1995. – С. 269-270.

32. Розен В.П. Оперативное планирование и управление электрической нагрузки промышленных предприятий (на примере угольных шахт): автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.09.03 „Электротехнические комплексы и системы” / В.П. Розен. – Киев, 1983.

33. Розен В.П. Тарифы на электрическую энергию как средства выравнивания графиков нагрузки энергосистем: тезисы докл. / В.П. Розен, В.В. Прокопенко, В.Е. Майстренко // Материалы конф. "Кризисные ситуации в

энергетике: экономическая оценка и моделирование решений по их нейтрализации", Киев, 1994. – С. 38-39.

34. Розен В.П. Управление потребителями-регуляторами дискретного действия / В.П. Розен // Материалы 1-ой международной конф. по управлению использованием энергии, Киев, 12-15 декабря, 1995. – Киев, 1995. – С. 111-116.

35. Розен В.П. Виявлення споживачів-регуляторів електричної потужності / В.П. Розен, Н.В. Нечипоренко // Вісник НТТУ "КПІ", серія "Гірництво". – 1999. – №1. – С. 127-130.

36. Хронусов Г.С. Принципы формирования комплексов потребителей-регуляторов мощности на горнорудных предприятиях / Г.С. Хронусов // Известия вузов. Горный журнал. – 1986. – №6. – С. 91-97.

37. Хронусов Г.С. Управление электропотреблением горнорудного предприятия в периоды режимных ограничений электроэнергосистем / Г.С. Хронусов, Н.В. Ручьев, М.И. Школьник // Известия вузов. Горный журнал. – 1987. – №4. – С. 109-113.

38. Хронусов Г.С. Управление водоотливными установками в условиях ограничения электропотребления / Г.С. Хронусов // Известия вузов. Горный журнал. – 1987. – №7. – С. 90-96.

39. Хронусов Г.С. Оценка эффективности функционирования комплексов потребителей-регуляторов мощности горных предприятий / Г.С. Хронусов // Известия вузов. Горный журнал. – 1988. – №10. – С. 89-94.

40. Хронусов Г.С. Комплексы потребителей-регуляторов мощности на горнорудных предприятиях / Г.С. Хронусов. – М.: 1989. – 200 с.

41. Хронусов Г.С. Формирование эффективных режимов электропотребления горнодобывающих предприятий на основе комплексов потребителей-регуляторов мощности: автореф. дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук: спец. 05.09.03 „Электротехнические комплексы и системы” / Г.С. Хронусов. – Свердловск, 1990. – 42 с.

42. Гордеев В.И. Регулирование максимума нагрузки промышленных электрических сетей / В.И. Гордеев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 184 с. – (Экономия топлива и электроэнергии).

43. Червонный Е.Н. Методы исследования возможностей регулирования электропотребления промышленных предприятий / Е.Н. Червонный // Электромеханика. – 1988. – №9. – С. 47-51.

44. Грядущий Б.А. Современное состояние и пути дальнейшего развития главных водоотливных и вентиляторных установок шахт / Б.А. Грядущий, Э.И. Антонов, В.А. Стешенко // РВК ДонНТУ, Наукові праці ДонНТУ, серія "Гірничо-електромеханічна". – 2011. – №22 (195). – С. 60-65.

45. Черняховский Р.Л. Адаптация режимов работы электромеханических комплексов шахтного водоотлива к графикам энергосистемы в условиях переменных притоков: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.09.03 „Электротехнические комплексы и системы” / Р.Л. Черняховский. – Санкт-Петербург, 2003.

46. Боченков Д.А. Энергосберегающее регулирование режима работы главных водоотливных установок шахт и рудников средствами электропривода: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.09.03 „Электротехнические комплексы и системы” / Д.А. Боченков. – Новочеркасск, 2010.

47. Мамедов А.Ш. Разработка и обоснование мероприятий по повышению энергоэффективности комплексов шахтного водоотлива: На примере шахт ОАО "Севуралбокситруда": автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.05.06 „Горные машины” / А.Ш. Мамедов. – Екатеринбург, 2004.

48. Алябьев Н.М. Экономия электроэнергии на угольной шахте. / Н.М. Алябьев, В.К. Ефремов. – Москва: Недра, 1969. – 170 с.

49. Энергоэффективность комплекса шахтного водоотлива / Г.Г. Пивняк, А.С. Бешта, А.В. Балахонцев [и др.] // Электротехнические комплексы и систе-

мы: научно-технический журнал. – Киев: "Техника". – 2011. – №03(79). – С. 394–396.

50. Правила безопасности в угольных шахтах: ДНАОП 1.1.30-1.01-00. – К.: Госнадзорохрантруда Украины, 2000. – С. 495.

51. Правила технической эксплуатации угольных и сланцевых шахт: НАОП 1.1.30-1.05.75. – К.: Минуглепром СССР, 1975.

52. Разумний Ю.Т. Визначення ємності водозбірника головного водовідливу / Ю.Т. Разумний, А.В. Рухлов, К.С. Родна // Уголь Украины. – 2010. – № 4. – С. 31–32.

53. Наннес Ю.В. О требованиях по шахтному водоотливу новых ПТЭ и подготавливаемых ПБ / Ю.В. Наннес, В.Н. Недолужко, С.А. Федор // Уголь Украины. – 2008. – № 5. – С. 15–17.

54. Грабчак Л.Г. Проведение горно-разведочных выработок и основы разработки месторождений полезных ископаемых / Л.Г. Грабчак, Ю.Н. Малышев, В.И. Комащенко, Б.И. Федунец. – Изд-во Академии горных наук, 1997. – 576 с.

55. Гойхман В.М. Регулирование энергопотребления и экономия электроэнергии на угольных шахтах / В.М. Гойхман, Ю.П. Миновский. – М.: Недра, 1988. – 190 с.

56. Разумний Ю.Т. Математическое моделирование режимов работы многоагрегатных шахтных водоотливных установок / Ю.Т. Разумний, К.С. Родна. // Наук. вісн. Національного гірничого університету, 2006. – № 1. – С. 80–84.

57. Яценко А.М. Рациональный суточный график работы шахтной водоотливной установки / А.М. Яценко, В.И. Ковалев, Э.И. Антонов. // Уголь Украины, 2005. – № 7. – С. 12–13.

58. Рухлова Н.Ю. Оценка энергоэффективности работы главного водоотлива шахты в режиме потребителя-регулятора / Н.Ю. Рухлова // Гірничая електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб., 2013. – Вип. 90. – С. 137-139.

59. Пат. № 82512 Україна, МПК Е 02 D 19/00. Спосіб визначення об'єму водозбірника головної водовідливної установки шахти / Разумний Ю.Т., Рух-

лов А.В., Рухлова Н.Ю.; заявник и патентовладелец Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет". – № у 2013 00039; заявл. 02.01.13 ; опубл. 12.08.13, Бюл. № 15.

60. Разумный Ю.Т. Повышение энергоэффективности главной водоотливной установки угольной шахты / Ю.Т. Разумный, Н.Ю. Рухлова, А.В. Рухлов. // Науковий вісник НГУ: Наук.-техн. зб. – 2013. – № 5. – С. 67-72.

61. Рухлова Н.Ю. Влияние технологических условий работы главного водоотлива угольной шахты на повышение энергоэффективности его использования: Матеріали міжнародної конф. "Форум гірників – 2013", 2-5 жовтня 2013 р., Дніпропетровськ / Днепропетровск: ДВНЗ "НГУ", Т. 4. – 2013. – С. 168-172.

62. Рухлов А.В. Технологические условия работы главного водоотлива в режиме эффективного потребителя-регулятора / А.В. Рухлов, Н.Ю. Рухлова // Уголь Украины, 2014. – № 12. – С. 34-37.

63. Яценко А.М. Пути повышения экономичности работы водоотливных комплексов / А.М. Яценко // Уголь Украины, 2004. – № 4. – С. 29–32.

64. Яценко А.М. Повышение безопасности и эффективности шахтного водоотлива / А.М. Яценко, Э.И. Антонов, И.А. Яценко // Уголь Украины, 2006. – № 1. – С. 40–42.

65. Бессараб В.И. Управление шахтной водоотливной установкой в аварийных и аномальных режимах работы / В.И. Бессараб, Р.В. Федюн, В.А. Попов // Наукові праці ДонНТУ, серія "Обчислювальна техніка та автоматизація". – Донецьк: РВК ДонНТУ, – 2006. – №106. – С. 26-33.

66. Гейер В.Г. Шахтные вентиляторные и водоотливные установки: Учебник для вузов / В.Г. Гейер, Г.М. Тимошенко.– М.: Недра, 1987.– 304 с.

67. Стационарные установки / под общей ред. Б.Ф. Братченко.– М.: Недра, 1977.– 440 с.

68. Применение разрядно-импульсной технологии для восстановления пропускной способности водоводных магистралей в условиях крупного металлургического предприятия / А.Г. Мнухин, А.М. Брюханов, И.П. Горошко и др. // Металл и литье Украины. – 2003. – № 3.

69. Даньшин Н.К. К энергосбережению через инновации [Электронный ресурс] / Н.К. Даньшин // Интернет проект "Угольный портал". – 2009. – Режим доступа к журн.:

http://www.coal.dp.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=264:2009-07-06-18-33-32&catid=146:energy1&Itemid=50.

70. Усачев В.П. Магнитно-импульсная очистка полимерных трубопроводов от минеральных отложений [Электронный ресурс] / В.П. Усачев, Н.К. Даньшин // Спец. инф.-аналит. изд. "Полимерные трубы": Технологии и материалы. – 2013. – Режим доступа к журн.:

<http://polypipe.info/technologies-materials/420-magnitnoimpulsnayao4istka>.

71. Паламарчук Н.В. Главные резервы экономии электроэнергии при эксплуатации шахтных водоотливных установок / Н.В. Паламарчук // Уголь Украины, 2001. – № 7. – С. 21–24.

72. Пат. № 86645 Україна, МПК F 15 В 1/00, МПК F 04 D 27/00. Спосіб керування головною водовідливною установкою вугільної шахти / Разумний Ю.Т., Рухлов А.В., Рухлова Н.Ю.; заявник и патентовласник Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет". – № u 2013 07312; заявл. 10.06.13 ; опубл. 10.01.14, Бюл. № 1.

73. Рухлова Н.Ю. Моделирование энергоэффективных режимов работы шахтного водоотлива: Збірник наукових праць I Міжнародної наук.-техн. конф. викладачів, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об'єктів", 17-18 жовтня 2013 р., Донецьк. – Донецьк: ДВНЗ "ДонНТУ", 2013. – С. 56-57.

74. Математический энциклопедический словарь / Под ред. А.П. Бицюкова. – М.: Московская энциклопедия, 1988. – 644 с.

75. Рухлов А.В. Метод определения мощности аварийной брони электропитания угольных шахт: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.09.03 / Рухлов Артем Владимирович. – Д., 2005. – 163 с.

76. Рухлов А.В. Моделирование графиков электрической нагрузки угольных шахт: Монография. / А.В. Рухлов. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2008. – 119 с.

77. Методика расчета режимов параллельной работы насосов водоотлива шахт, имеющих большие притоки: РТМ 07.02.010-78. – М.: Минуглепром СССР, 1978. – 54 с.

78. Руководящий технический материал по снижению затрат электроэнергии при эксплуатации действующих водоотливных установок на шахтах угольной промышленности: РТМ 07.02.005-85. – М.: Минуглепром СССР, 1985. – 82 с.

79. Холоменюк М.В. Методика розрахунків водовідливних установок гірничих підприємств: методичні вказівки для студентів напряму підготовки 0902 Інженерна механіка / М.В. Холоменюк. – Д.: Національний гірничий університет, 2007. – 67 с.

80. Бронштейн И.Н. Справочник по математике / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев – Изд. 7-е, стереотипное. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1967. – 139 с.

81. Пат. № 93990 Україна, МПК F 15 B 1/00, МПК F 04 D 27/00. Спосіб керування головною водовідливною установкою вугільної шахти / Разумный Ю.Т., Рухлов А.В., Рухлова Н.Ю.; заявник и патентовласник Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет". – № u 2014 04663 ; заявл. 30.04.14 ; опубл. 27.10.14, Бюл. № 20.

82. Рухлова Н.Ю. Моделирование энергоэффективных режимов работы шахтного водоотлива: Матеріали міжнародної конф. "Форум гірників – 2014", 1-4 жовтня 2014 р., Дніпропетровськ / Днепропетровск: ТОВ "ЛізуновПрес", Т. 3. – 2014. – С. 160-163.

83. Разумный Ю.Т. Енергоефективна робота водовідливної установки вугільної шахти / Ю.Т. Разумный, Н.Ю. Рухлова, А.В. Рухлов // Науковий вісник НГУ: Наук.-техн. зб. – 2015, – № 2 (146).–С. 74-79.

84. Rukhlova N. Simulation of the energy-effective operating modes of the mine main pumping / N. Rukhlova // Power Engineering, Control and Information Technologies in Geotechnical Systems: Taylor & Francis Group, London, 2015 annual publication. – P. 121-125.

85. Волкова В.И. Основы теории систем и системного анализа / В.И. Волкова, А.А. Денисов. – СПб.: Изд. СПбГТУ, 1997. – 510 с.

Приложение А

"УТВЕРЖДАЮ"

Заместитель директора

ООО НПЦ ДТЭК

В.А. Путря

"25" марта 2015 г.

АКТ

о внедрении результатов исследований

Рухловой Натальи Юрьевны

выполненных в диссертационной работе

на тему: "Повышение энергоэффективности работы главного водоотлива угольной шахты в режиме потребителя-регулятора"

Настоящий акт составлен о том, что НПЦ ДТЭК принят к использованию в проектной документации, при проектировании главных водоотливных установок, новый способ определения объема водосборника, отображающий научные и практические результаты кандидатской диссертационной работы Рухловой Н.Ю. и учитывающий:

- возможность управлять режимами электропотребления путем отключения насосов в часы максимума нагрузки энергосистемы на протяжении всего года не зависимо от режима чистки ветвей водосборника;

- возможность уменьшить необходимый для эффективного регулирования объем водосборника и, как следствие, объем горно-строительных работ, при сооружении равных по вместимости ветвей водосборника с одновременным увеличением их количества.

Начальник электротехнического отдела
ООО НПЦ ДТЭК

/К.В. Гичев/

Главный специалист
электротехнического отдела ООО НПЦ ДТЭК

/В.И. Загний/

Приложение Б

"УТВЕРЖДАЮ"

Главный инженер шахты "Благodatная"

ШУ "Героев Космоса"

ПАО "ДТЭК Павлоградуголь"

В.А. Конотоп

" ____ " _____ 2015 г.

АКТ

о внедрении результатов исследований

Рухловой Натальи Юрьевны

выполненных в диссертационной работе

на тему: "Повышение энергоэффективности работы главного водоотлива угольной шахты в режиме потребителя-регулятора"

Настоящий акт составлен о том, что на шахте "Благodatная" внедрены следующие научные и практические результаты кандидатской диссертационной работы Рухловой Н.Ю.:

1. Разработанный алгоритм моделирования режимов работы главной водоотливной установки, позволяющий из множества смоделированных режимов ее работы для любых технологических характеристик установки и технических параметров оборудования выбрать наиболее энергоэкономичный режим, который характеризуется минимальным удельным расходом электроэнергии на откачку воды при условии минимальной оплаты за ее потребление.

2. Способ управления режимами работы главной водоотливной установки при применении энергоэффективного регулирования режимов ее электропотребления по разработанному алгоритму, позволяющего осуществлять контроль энергетических показателей функционирования

водоотлива. Контроль за численным значением основного энергетического показателя – удельного расхода электроэнергии, сравнение его с предыдущим значением и анализ динамики изменений, дает возможность сделать выводы относительно причин изменения этого параметра, которыми могут являться – ухудшение технического состояния оборудования главной водоотливной установки.

Главный механик

/С.В. Грехов/

Главный энергетик

/В.А. Фролов/