

Министерство образования и науки Украины
Государственное высшее учебное заведение
"НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ"



Ю.Т. Разумный

Н.Ю. Рухлова

А.В. Рухлов

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ГЛАВНОГО
ВОДООТЛИВА УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ**

Монография

Днепропетровск

НГУ

2016

УДК 622.53:65.011.46

ББК 33.17

Р 17

Затверджено вченою радою Державного ВНЗ "Національний гірничий університет" (протокол № 5 від 26.04.2016).

Рецензенти:

Розен В.П. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації управління електротехнічними комплексами Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут";

Кольсун В.А. – канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем у промисловості та транспорті Державного вищого навчального закладу "Криворізький національний університет".

Разумний Ю.Т.

Р 17 Энергоэффективность работы главного водоотлива угольной шахты: монография / Ю.Т. Разумный, Н.Ю. Рухлова, А.В. Рухлов; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Днепропетровск: НГУ, 2016. – 109 с.

ISBN 978–966–350–600–5

Изложены результаты исследований в области повышения энергоэффективности работы главного водоотлива угольной шахты. Разработаны алгоритмы и модели, позволяющие рассчитать минимальный удельный расход электроэнергии на откачивание воды для разных условий функционирования водоотлива.

Изложенный материал будет интересен широкому кругу читателей, деятельность которых связана с исследованиями и эксплуатацией технологических установок, а также аспирантам и студентам высших учебных заведений.

Викладено результати досліджень в області підвищення енергоефективності роботи головного водовідливу вугільної шахти. Розроблено алгоритми та моделі, які дозволяють розрахувати мінімальні питомі витрати електроенергії на відкачування води для різних умов функціонування водовідливу.

Викладений матеріал буде корисний широкому колу читачів, діяльність яких пов'язана з дослідженнями та експлуатацією технологічних установок, а також аспірантам і студентам вищих навчальних закладів.

УДК 622.53:65.011.46

ББК 33.17

© Ю.Т. Разумный, Н.Ю. Рухлова,
А.В. Рухлов, 2016

© Державний ВНЗ "НГУ", 2016

ISBN 978–966–350–600–5

ПРЕДИСЛОВИЕ

Главный водоотлив предназначен для откачки воды, поступающей из горных выработок, на поверхность шахты. Главная водоотливная установка (ГВУ) включает в себя водосборник, состоящий не менее чем из двух ветвей, необходимое количество насосных агрегатов и трубопроводную сеть не менее чем из двух трубопроводов. Как потребитель электроэнергии главный водоотлив обладает рядом особенностей, основная из которых заключается в возможности накапливать воду в водосборник с последующей ее откачкой.

Указанная особенность ГВУ привлекала внимание многих специалистов и ученых, в том числе и авторов данной работы, в части использования ее в качестве потребителя – регулятора (П–Р) активной нагрузки.

В предлагаемой читателю работе кратко затронуты вопросы, связанные с работой главного водоотлива шахты по своему основному назначению. Однако главной ее целью является ознакомление с результатами многолетних исследований и наработка таких научно-технических решений, реализация которых позволит эффективно использовать ГВУ в качестве П–Р. Под выражением "эффективно" авторы понимают такие решения и действия специалистов, которые будут выгодны не только энергосистеме, но и потребителю электроэнергии (шахте). Будет ошибочной работа в ущерб потребителю электроэнергии только для удовлетворения интересов другой стороны – ее производителя (энергосистемы).

Функционирование главного водоотлива угольной шахты в режиме П–Р предусматривает применение регулирования режимов электропотребления (РРЭ), которое направлено на определение графика работы насосов во внепиковый период. Исключение их работы в периоды максимальных электрических 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 это 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 РРЭ, а именно, технико-экономические показатели работы ГВУ, зависит от технических и технологических условий: технического состояния основного оборудования (насосов, трубопроводов и водосборников) и достаточности объема водосборника для накопления воды в период максимальных нагрузок. Снижение рабочих параметров данного оборудования способствует ухудшению технико-экономических показателей работы водоотлива при регулировании режимов электропотребления.

Повышение энергоэффективности работы главного водоотлива угольных шахт как П–Р неразрывно связано с проблемой неравномерности электропотребления, которая обусловлена свободным режимом потребления электроэнергии, особенно характерным для жилищно-коммунального сектора.

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].

Решение проблемы неравномерности графика электрических нагрузок (ГЭН) возможно путем огромных капиталовложений на создание гидроаккумулирующих или (и) газотурбинных электрических станций в энергосистеме. Однако для сооружения ГАЭС необходимо располагать перепадами геодезических отметок поверхности земли не менее чем 100 м, которые в Украине отсутствуют. Устройство ГТУ требует наличия горючих газов, главным образом – природного газа, которого в Украине недостаточно.

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 способствует снижению неравномерности ГЭН и отразится, в свою очередь, на величине общего удельного расхода топлива на ТЭС.

Согласно постановлению № 37 от 22.01.2015 г. НКРЭКУ были приняты новые значения тарифных коэффициентов при расчете 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 вследствие дефицита электроэнергии в энергосистеме Украины в пиковые периоды, что обусловлено нехваткой топливно-энергетических ресурсов и дисбалансом между производством и потреблением электроэнергии.

Опыт эксплуатации ГВУ шахты показывает, что насосная установка работает недостаточно эффективно – существует перерасход электроэнергии. Экономичная и надежная работа водоотлива большей частью определяется фактическим режимом работы насоса, который в процессе эксплуатации постоянно изменяется в результате повышенного износа оборудования при перекачивании вод с содержанием твердых частиц и кислот, а также из-за "обрастания" элементов трубопровода. К тому же режимы работы существующих ГВУ характеризуются их неэффективным использованием как П–Р. Поэтому работа главного водоотлива в режиме потребителя–регулятора давала предприятиям незначительную экономию денежных средств, но и приводила к вынужденному перерасходу электроэнергии в другие периоды суток. Увеличение расхода электроэнергии происходит за счет интенсивной работы насосов в определенные периоды суток, что приводит к увеличению удельного расхода электроэнергии, поскольку будут использоваться не только рабочие, но и резервные насосные агрегаты. Следовательно, для реализации таких режимов работы необходимо создать условия, при которых ГВУ будет работать в зоне максимального коэффициента полезного действия (КПД), а трубопроводная сеть была бы выполнена таким образом, чтобы откачивание воды проводилось с минимальным расходом электроэнергии. Кроме того, насосная установка не должна работать с недостаточным или с избыточным напором. Первое приведет к ненормальному ре-

жиму работы насоса (кавитация, помпаж и др.) и, соответственно, к выходу его из строя, а второе – к увеличению удельного расхода электроэнергии. Критерием экономичной работы водоотливной установки является величина расхода электроэнергии на кубический метр воды, откаченной из шахты на поверхность [4].

Снижение объема расходуемой на водоотлив электроэнергии может достигаться за счет мероприятий, направленных на устранение утечек в нагнетательном трубопроводе, снижение сопротивления всасывающего и нагнетательного трубопроводов путем увеличения сечения труб и выбором кратчайшей трассы при прокладывании трубопроводов, повышение КПД насоса, а также в результате снижения избыточного напора, развиваемого насосом. Применение указанных мер позволяет учитывать расчетные (реальные) параметры: напор, производительность и КПД насоса.

Необходимо учитывать и тот факт, что на большинстве шахт имеются многоагрегатные ГВУ, насосы которых работают параллельно, что не может не отразиться на рабочих характеристиках насосных агрегатов [4]. Следовательно, удельный расход электроэнергии зависит от многих факторов, влияние которых усиливается при интенсивной работе ГВУ в процессе регулирования электропотребления, что приводит к необходимости учета данного параметра как одного из критериев энергоэффективной работы водоотлива.

Исходя из изложенного, в монографии авторы приводят результаты наблюдений, анализа и исследований в виде научно-технических решений по повышению энергоэффективности работы главного водоотлива как потребителя–регулятора.

Авторы выражают искреннюю благодарность работникам угольных шахт Западного Донбасса и научно-проектного центра "ДТЭК" за предоставление исходных материалов и поддержку во время выполнения исследований режимов работы ГВУ, а также за положительную оценку полученных результатов.

Монография написана на основе результатов исследований, полученных при подготовке кандидатской диссертации Рухловой Н.Ю. На протяжении исследований и завершающем этапе академик НАН Украины профессор Г.Г. Пивняк проявлял внимание к этой работе и высказал ряд ценных замечаний, за что ему весьма признательны.

Авторы с благодарностью примут и учтут все критические замечания и предложения от читателя.

1. ПАРАМЕТРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ГЛАВНОГО ВОДООТЛИВА

1.1. Параметры водосборника

Для эффективной работы главного водоотлива шахты в режиме П–Р основными параметрами являются общий объем водосборника, а также вместимости и количество его ветвей.

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 [6], 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. [7] было рекомендовано применять водосборник ГВУ объемом, равным не менее 8-часовому нормальному притоку. В 2005 году выходит новое издание ПТЭ [8], где рекомендуется применять водосборник ГВУ объемом, уже равным не менее 12-часовому нормальному притоку. Из приведенного видно, что несогласованность в рекомендациях нормативных документов, которые должны дополнять друг друга, несомненно присутствует. При этом в нормативных документах отсутствуют требования к объемам ветвей водосборника.

В работе [9] показано, что рекомендации, приведенные в ПТЭ редакции 2005 г. [8], не есть строго обоснованными. 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 является не настолько простой технической задачей. Необходимо учитывать количество ветвей, прочность породы, разную вместимость ветвей и многие другие факторы. Также в работе [9] показано, что удельный объем водосборника зависит не только от количества его ветвей, но и от их неравномерности.

В результате предложений, рассмотренных в работах [9, 10], в 2010 году выходит новое издание ПБ [11], где рекомендуется водо-

сборник ГВУ объемом, уже равным не менее 8-часовому притоку. При этом ничего не указывается про характер водопритока (нормальный или максимальный) и степень заиления водосборника.

Притоки воды в шахту с годами эксплуатации, а также в течение каждого года являются переменными, иногда со значительным диапазоном изменений [12]. Такие притоки характеризуются медленными изменениями в течение всего периода эксплуатации шахты с наложением сезонных повышений водопритока, вызванных весенне-осенними паводками и дождями. Следовательно, в зависимости от его характера требуемая вместимость водосборника может отличаться в два раза, а в результате полученный объем может 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 [11] и ПТЭ [8] для применения РРЭ, поэтому эффективность использования ГВУ таких шахт в режиме П–Р будет небольшой.

В табл. 1.1 приведены параметры ГВУ некоторых действующих шахт Западного Донбасса, в табл. 1.2 – требуемые нормативными документами [8, 11] для эффективного применения РРЭ параметры водосборников по вместимости, а также отражено соответствие им существующих ветвей.

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 [8, 11] для использования РРЭ как при нормальном, так и максимальном притоке. 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 и ПТЭ для применения РРЭ независимо от водопритока, что, в свою очередь, лишает их возможности эффективно работать в режиме П–Р.

Таблица 1.1

Параметры некоторых ГВУ действующих шахт

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

Таблица 1.2

Показатели соответствия параметров ГВУ действующих шахт ПАО "ДТЭК Павлоградуголь"
требованиям нормативных документов

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

Определение энергоэффективности шахтного водоотлива сводилось преимущественно к расчету режимов электропотребления, однако при этом не учитывались технологические условия. Следовательно, для повышения энергоэффективности ГВУ необходимо выполнить некоторые технологические и организационные требования, одним из которых является выбор целесообразных объемов водосборника и его ветвей.

При нормальных условиях работы ГВУ, исходя из необходимости ремонта и чистки, водосборник должен иметь не менее двух ветвей (выработок). На большинстве действующих шахт вместимость водосборника не удовлетворяет требованиям новых ПТЭ [8] 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 их фактическом (регулируемом) 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 водосборника, что позволяет в часы максимума активной нагрузки в энергосистеме полностью отключать потребители технологического процесса по откачке шахтных вод из подземных выработок до отстойника на поверхности [13, 14]. Это связано с тем, что при проектировании водосборника не учитывались заиление и режим чистки, а объемы его ветвей определялись только горно-геологическими условиями. Следовательно, ветви водосборника имели, как правило, разную вместимость. При выведении большей по объему ветви в чистку объема оставшейся (меньшей) ветви, которая к этому времени уже имела какой-то процент заиления, было недостаточно для отключения насосных агрегатов 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 снижать электропотребление. Однако для условий работы в часы ночного провала нагрузок или полу-

пикового периода возникает необходимость в интенсивной откачке 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 обоснование целесообразности данного решения. Потребляемая мощность ГВУ прямо пропорциональна подаче и напору $P = f(Q; H)$, поэтому при незначительных притоках воды и небольших глубинах использование водоотлива для регулирования электропотребления может не иметь ни технического, ни экономического обоснования. Поэтому следует более корректно подойти к этому вопросу. Это можно решить путем определения граничных условий целесообразности использования водоотлива как П–Р, т. е. возникает необходимость в формировании четкого представления об областях применения ГВУ для РРЭ и повышения эффективности работы технологической установки.

При исследованиях сложных технических систем, примером которых является шахтный водоотлив, достаточно трудно определить целевую направленность. Если речь идет об эксплуатации технических систем, которые в той или иной мере обеспечивают интересы их организаторов и общества в целом, то эффективная работа таких систем не характеризуется единственным показателем эффективности. В этом случае приходится использовать и другие вспомогательные показатели, которые дополняют основной показатель эффективности [15, 16]. 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 выборе взвешивающих коэффициентов такой способ получения обобщенного показателя эффективности ничем не лучше рассмотренного выше. Произвольный выбор взвешивающих коэффици-

ентов для получения рационального решения, которое, в конечном итоге, окажется компромиссным, приводит к таким же произвольным "рациональным" результатам.

Полностью лишиться субъективности при рассмотрении 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 выбранных 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.

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

Использование энергоемких установок как П–Р на примере ГВУ поможет частично решить проблему неравномерности графика электрических нагрузок энергосистемы страны.

Эффективное РРЭ 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 заилением водосборника, количеством и распределением объемов его ветвей с учетом их неравномерности.

Анализируя вышеизложенное, можно сделать вывод о необходимости и целесообразности использования главного водоотлива в режиме П–Р при оценивании энергоэффективности его работы по удельному расходу электроэнергии с учетом условия минимизации оплаты за ее потребление [17].

В соответствии с требованиями НКРЭКУ суммарная продолжительность двух периодов максимальных (пиковых) нагрузок в энергосистеме не должна превышать шести 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 для 4-часового максимального притока воды [18, 19]:

$$\begin{aligned} V_{\partial} &= K_z t_m Q_{\max}, \text{ м}^3, \\ V_{\partial} &= 1,15 \cdot 4 \cdot Q_{\max} = 4,6 Q_{\max}, \text{ м}^3, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где $K_z = 1,15$ – среднее значение заиления ветви водосборника относительно 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, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Процесс чистки водосборника является периодическим и последовательным, т. е. ветви чистятся по очереди при достижении одной из них уровня заиления, равного 30 %. Поэтому принимается, что заиление оставшихся в работе ветвей соответствует средним (промежуточным) значениям. С учетом этого и режима чистки водосборников шахт Западного Донбасса в выражении (1.1) для получения необходимого объема водосборника, достаточного для РРЭ, принимаем среднее значение заиления, равное 15 %. Однако такое решение не является обязательным и значение K_z может корректироваться в зависимости от периодичности чистки ветвей и ее продолжительности для условий конкретной шахты.

1.2. Анализ объемов ветвей водосборника главного водоотлива

В соответствии с Правилами безопасности [11] ГВУ должна состоять из двух и более ветвей, что дает возможность производить ре-

гулярную чистку водосборника. Причем, объем каждой из ветвей и его равномерность относительно друг-друга нормативными документами не регламентируется.

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

Принимается допущение, что при равных вместимостях ветвей, разделив достаточный объем водосборника V_0 на количество его ветвей, получим объем одной ветви:

$$V_в^0 = \frac{K_3 t_m Q_{\max}}{n_в}, \quad (1.2)$$

где $n_в$ – количество ветвей водосборника.

Обязательность регулярной чистки водосборника приводит к поочередному выводу одной из его ветвей из работы, тогда необходимый для РРЭ объем водосборника рассчитывается так:

$$V_в^{PPЭ} = \frac{K_3 t_m Q_{\max}}{n_в - n_ч}, \quad (1.3)$$

где $n_ч$ – количество ветвей водосборника, находящихся в чистке.

Феномен состоит в том, что при выполнении РРЭ следует определить, во сколько раз величина $V_в^{PPЭ}$ будет больше $V_в^0$:

$$\frac{\frac{K_3 t_m Q_{\max}}{n_в - n_ч}}{\frac{K_3 t_m Q_{\max}}{n_в}} = \frac{n_в}{n_в - n_ч}. \quad (1.4)$$

Таким образом, при условии равенства объемов ветвей выражение (1.1) приобретает вид, позволяющий определить объем всего водосборника:

$$V_{вод} = \frac{n_g}{n_g - n_u} K_3 t_m Q_{max} = \frac{n_g}{n_g - n_u} 4,6 Q_{max}. \quad (1.5)$$

Следовательно, необходимый объем водосборника зависит и от множителя $K_v = \frac{n_g}{n_g - n_u}$. Характер изменения множителя K_v от количества ветвей водосборника n_g (при $n_u = 1$) представлен на рис. 1.1.

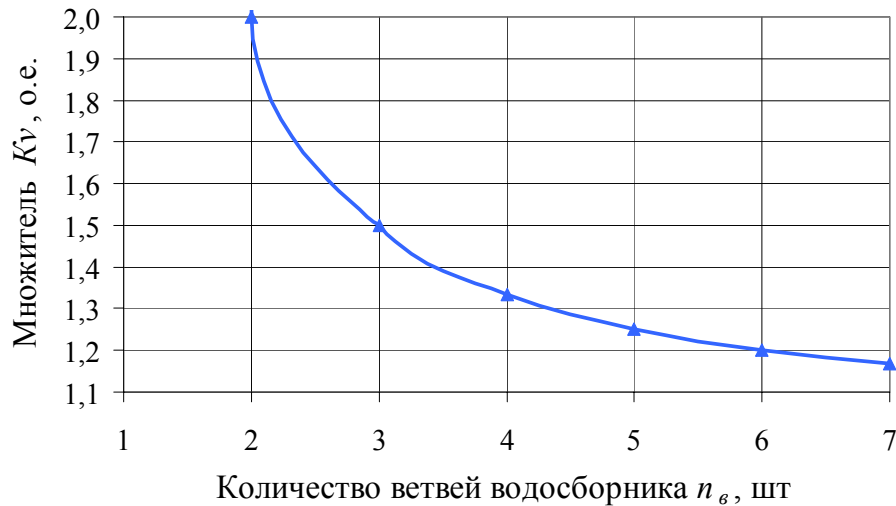


Рис. 1.1. График зависимости множителя K_v от количества ветвей водосборника n_g

С учетом зависимости (1.2) и характера изменения множителя K_v согласно рис. 1.1 можно утверждать, что необходимый для регулирования режимов электропотребления объем водосборника при равных вместимостях ветвей уменьшается с устройством 3-х ветвей по сравнению с 2-мя на 33 %, а с 3-х на 4 ветви – на 12,56 %, и так далее на 6,6 и 4,2 % соответственно. Безусловно, увеличение количества ветвей снижает необходимый объем водосборника, особенно это справедливо при $n_g = 3$ и 4. Последующее увеличение количества ветвей (5 и более) способствует незначительному снижению необходимого объема водосборника, но при этом значительно усложняет его строительство.

При современном конструктивном устройстве водосборника с учетом выполнения условий сопряжения горных выработок его ветви редко бывают равными по объему. Это обстоятельство определяет своеобразные особенности минимизации необходимого для регулирования режимов электропотребления объема водосборника при ус-

ловии использования водоотлива как эффективного П–Р. К таким особенностям следует отнести то, что величины объемов ветвей водосборника V_{ei} описываются следующим неравенством:

$$V_{e1} > V_{e2} > \dots > V_{ei}. \quad (1.6)$$

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

$$V_{e2} + V_{e3} + \dots + V_{ei} = \sum_{i=2}^{n_g} V_i \geq 4,6Q_{\max}. \quad (1.7)$$

Анализ объемов ветвей действующих ГВУ шахт (см. табл. 1.1), а также изучение многочисленных планов размещения горных выработок, которые относятся к водоотливу, показали, что объем каждой следующей ветви водосборника увеличивается 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. 1.3.

Таблица 1.3

Параметры водосборников некоторых ГВУ действующих шахт

Шахта	Приток воды, м ³ /ч		Количество ветвей водосборника, шт.	Объем ветвей водосборника, м ³	Разница в объемах 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

Отличие объемов ветвей водосборников действующих шахт (особенно, когда $n_g = 2$) приводит к невозможности эффективного регулирования режима электропотребления в период чистки большей по вместимости ветви, т. е. не удастся полностью исключить работу насосов на период максимума нагрузок в энергосистеме. Эту проблему можно решить путем сооружения равных по объему ветвей, что в свою очередь будет способствовать эффективному РРЭ независимо от режима чистки водосборника [20, 21].

Напомним, что при существующем конструктивном устройстве водосборника с учетом сопряжения и взаимного расположения горных выработок, его ветви редко бывают равными по объему, а их количество согласно ПБ и ПТЭ не может быть меньше двух (самые распространенные значения 2 и 3). Исходя из выражения (1.5) с учетом неравенства (1.6) и условия (1.7) получены удельные (на 1 м^3 притока воды в час) объемы водосборника $v_{вод}$ и его ветвей v_g (равных и неравных) в зависимости от их количества n_g (см. табл. 1.4).

На основании анализа значений объемов ветвей действующих ГВУ шахт (см. табл. 1.3) вместимости ветвей водосборника (для табл. 1.4) определим следующим образом:

$$v_{g,i+1} = v_{g,i} K_{н.в}, \quad (1.8)$$

где $v_{g,i}$ и $v_{g,i+1}$ – удельные объемы ветвей водосборника;
 $K_{н.в}$ – коэффициент (принимается в пределах 1,25–1,35).

Таблица 1.4

Значения удельного объема водосборника $v_{вод}$ в зависимости от количества его ветвей n_g

Количество ветвей водосборника n_g , шт.	Удельные объемы водосборника $v_{вод}$ и его ветвей v_g , $\text{м}^3/(\text{м}^3/\text{ч})$, при условии				Разность между объемами неравных и равных ветвей $\Delta v_{вод}$, $\text{м}^3/(\text{м}^3/\text{ч})$
	равенства объемов ветвей		неравенства объемов ветвей		
	$v_{вод}$	v_g	$v_{вод}$	v_g	
2	9,2	$2 \times 4,6$	10,35	5,75; 4,6	1,15
3	6,9	$3 \times 2,3$	8,0	3,4; 2,6; 2,0	1,10
4	6,13	$4 \times 1,53$	7,2	2,6; 2,0; 1,5; 1,1	1,07
5	5,75	$5 \times 1,15$	6,7	2,1; 1,6; 1,3; 0,95; 0,75	0,95
6	5,52	$6 \times 0,92$	6,45	1,85; 1,5; 1,1; 0,85; 0,65; 0,5	0,93

Данные табл. 1.4 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 $8,0 \text{ м}^3/(\text{м}^3/\text{ч})$ для неравных по объему ветвей и только $6,9 \text{ м}^3/(\text{м}^3/\text{ч})$ для равных. Разность между удельными объемами $\Delta v_{вод}$ составляет $1,1 \text{ м}^3/(\text{м}^3/\text{ч})$, 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 (1.4) $4,6 \text{ м}^3/(\text{м}^3/\text{ч})$.

Как видно из табл. 1.4, при количестве ветвей свыше 5-ти наблюдается 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 $5,75 - 5,52 = 0,23 \text{ м}^3/(\text{м}^3/\text{ч})$. При количестве ветвей водосборника более 5-ти значительно усложняется процесс его сооружения и технологическая схема, что подтверждается соответствующим опытом проектирования, строительства и эксплуатации шахтных водоотливных установок.

На основании данных табл. 1.4 построены кривые зависимости удельных объемов водосборника от количества его ветвей (рис. 1.2), а на рис. 1.3 показано распределение относительных объемов ветвей по режимам работы ГВУ, что удовлетворяет условию (1.4).

Кривые относительного распределения объемов ветвей водосборника при выведении в чистку ветвей с равными объемами, а также наибольшей или наименьшей ветви при неравных их объемах, приведены на рис. 1.3.

Сплошные линии 1 и 1' соответствуют варианту использования равных по объему ветвей при выводе одной из имеющихся в чистку (рис. 1.3). Возрастающая кривая 1 отображает объем водосборника, предназначенный для аккумуляции воды, в зависимости от количества ветвей (см. данные табл. 1.4), а убывающая кривая 1' – объем ветви, находящейся в чистке. Штрихпунктирные линии 2 (возрас-

тающая) 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.

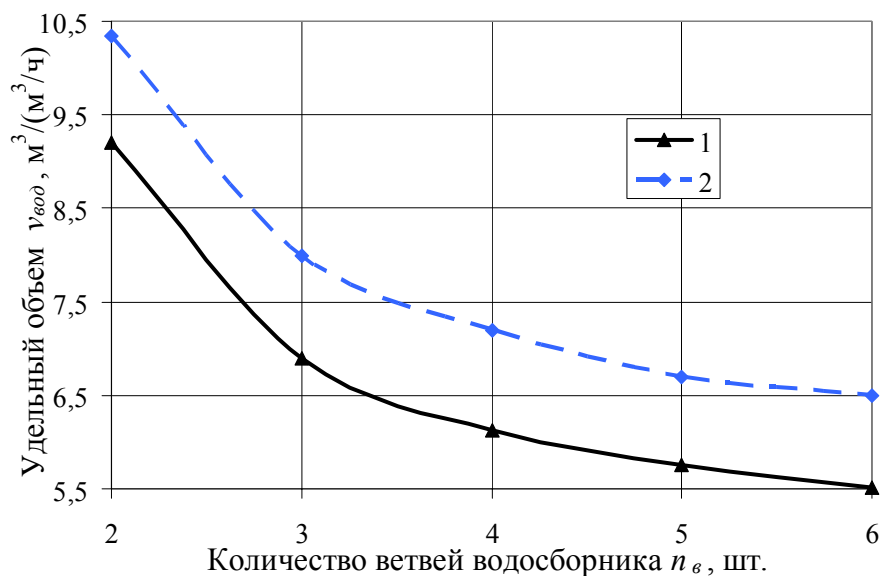


Рис. 1.2. Кривые зависимости удельного объема водосборника $v_{вод}$ от количества его ветвей $n_{в}$ при равных (кривая 1) и неравных (кривая 2) по вместимости ветвях

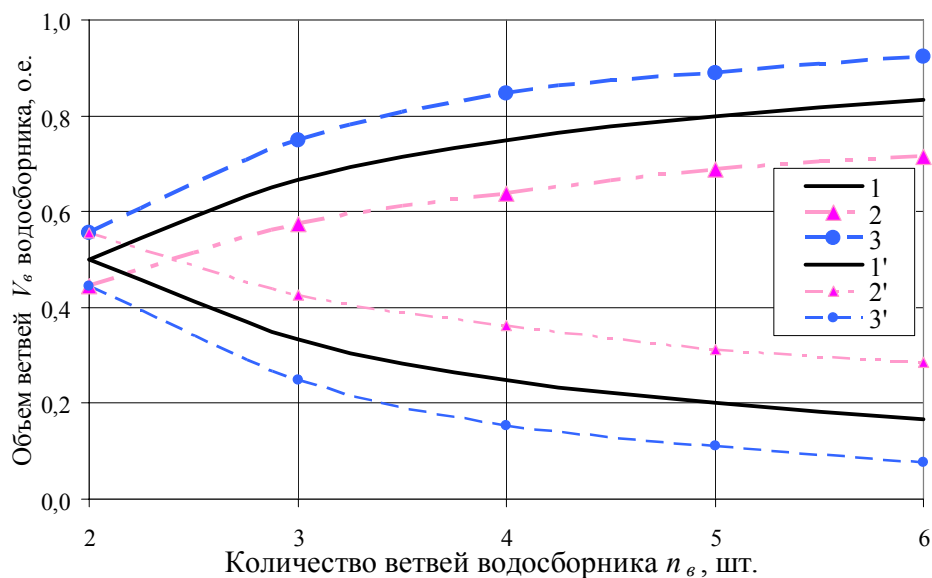


Рис. 1.3. Кривые зависимости относительного объема ветвей водосборника от их количества

Анализируя зависимости, представленные на рис. 1.2 и рис. 1.3, а также данные табл. 1.4, можно сделать вывод, что при равных по объему ветвях водосборника его необходимая вместимость $V_{вод}$ 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 вместимости ветвях водосборника, когда в чистке находится большая ветвь (V_{max}), сумма объемов ветвей, оставшихся в работе (при $n_e = 3$ и более), по условию (1.4) 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. 1.3). 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 сооружению водосборника главного водоотлива для условия неравности его ветвей по вместимости [19, 21].

Уменьшение необходимого объема водосборника обеспечивается увеличением количества его ветвей и одновременным снижением неравности их вместимостей.

Неравность объемов ветвей большинства существующих водосборников становится причиной либо невозможности использования водоотлива как П–Р (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.

Такой избыточный объем горных работ может быть экономически оправдан при отключении насосов в полупиковый режим. Если в этом режиме прибыли нет, то целесообразно строить 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.

1.3. Анализ параметров трубопроводной сети главной водоотливной установки

Согласно работе [11] ГВУ должна быть оборудована не менее чем двумя напорными трубопроводами, один из которых является резервным. Количество трубопроводов определяется в соответствии с общим числом рабочих насосов и предполагаемым количеством па-

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 трубопроводных става.

В большинстве случаев наиболее энергоэкономичный режим 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 проанализировано в разделе 2.

Рассмотрим пример построения напорных характеристик насосных установок и трубопроводной сети для условного водоотлива, состоящего из четырех рабочих и четырех резервных насосов типа ЦНС 300×300 (рис. 1.4). Видим, 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, на расход электроэнергии. По построенным кривым может быть определена подача отдельного или суммарная подача всех одновременно работающих насосов при включении на любое количество трубопроводов. Следовательно, например, 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 четырех насосов на два трубопровода, а расход электроэнергии при этом значительно возрастает.

Поскольку число и диаметр трубопроводов ГВУ принимаются исходя из количества рабочих насосов, то возможность применения дополнительно резервных насосов не учитывается. Использование ГВУ в режиме П–Р неизбежно предусматривает выполнение РРЭ, а именно: включение резервных насосов на параллельную работу в пе-

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

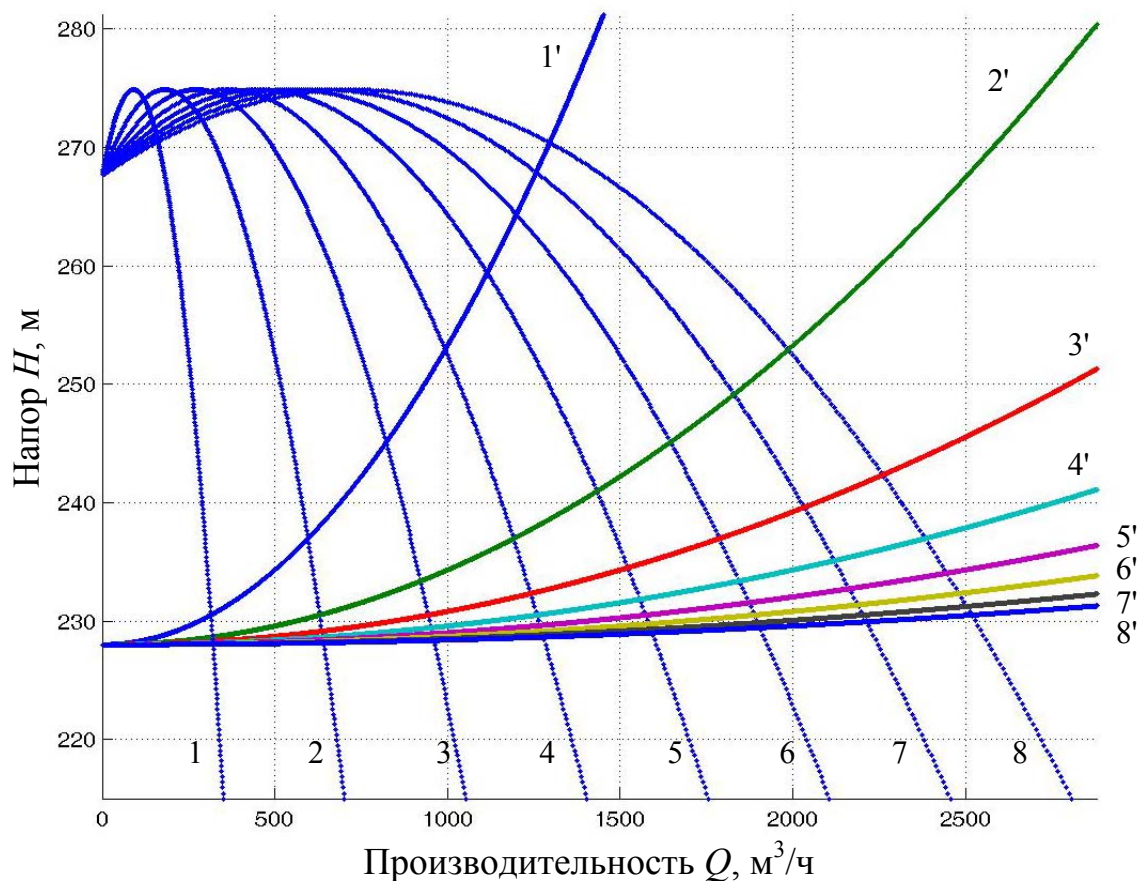


Рис. 1.4. Кривые зависимостей $H_n = f(Q)$ и $H_{тр} = f(Q)$ для условно принятой насосной установки: 1–8 и 1'–8' – соответственно количество параллельно работающих насосов и трубопроводов

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

Влияние технического состояния оборудования на работу водоотлива изучалось учеными НИИГМ им. М.М. Федорова [22, 23], однако, как правило, предлагалось решение этих проблем путем увеличения объема водосборника до 16-часового притока воды, что не может быть экономически обоснованным.

1.4. Влияние технического состояния насосов на работу водоотлива

В процессе длительной эксплуатации насосного агрегата наблюдается ухудшение его технического состояния и, как правило, снижение КПД. Динамика преобразования напорной характеристики насоса, а соответственно и рабочих параметров при снижении его КПД представлена на рис. 1.5.

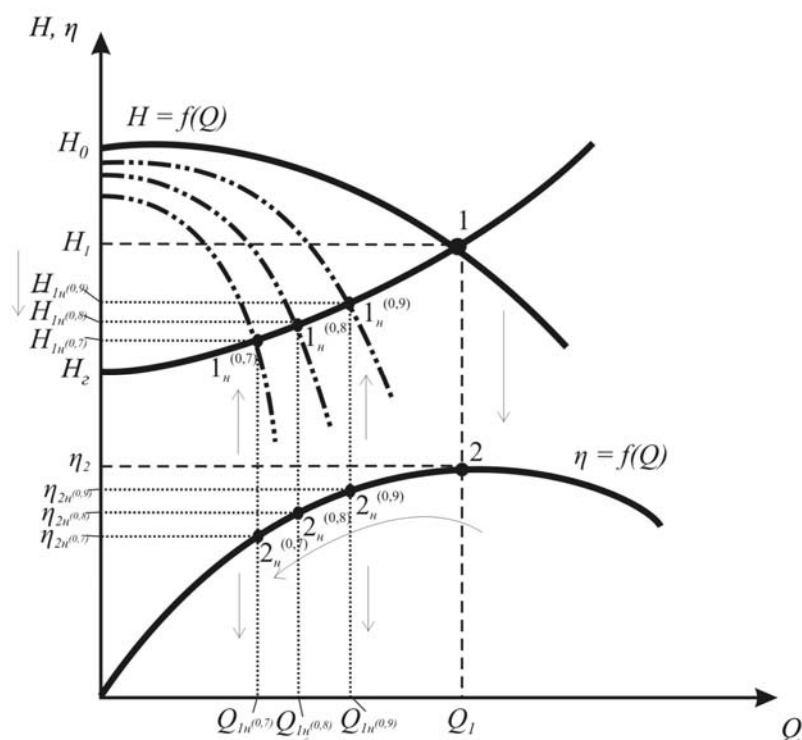


Рис. 1.5. Общий вид характеристик насоса: $H_n = f(Q)$ – напорной, $\eta = f(Q)$ – КПД и $H_{mp} = f(Q)$ – трубопроводной сети при снижении КПД насосного агрегата

На рис. 1.5 изображены напорная характеристика насоса $H_n = f(Q)$, его КПД $\eta = f(Q)$ и характеристика трубопроводной сети $H_{mp} = f(Q)$. Здесь 1 – рабочая точка насоса на характеристике сети и 2 – на характеристике КПД, которые и определяют рабочие параметры насоса: напор H_1 , производительность Q_1 и его КПД η_2 .

При ухудшении технического состояния насоса соответственно снижается и его КПД, т.е. происходит смещение рабочей точки 2 на 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 на характеристике трубопроводной сети, а это в свою очередь приводит к изменению рабочих параметров насоса: напора и производительности ($H_{1H(0,9)}$, $H_{1H(0,8)}$, $H_{1H(0,7)}$ и $Q_{1H(0,9)}$, $Q_{1H(0,8)}$, $Q_{1H(0,7)}$ соответственно при этом будут уменьшаться).

Следовательно, ухудшение рабочих параметров насоса способствует снижению его производительности и, как следствие, увеличению общей продолжительности его работы по откачиванию единицы объема воды, что приведет к возрастанию расхода электроэнергии на выполнение данной работы (раздел 2).

1.5. Влияние технического состояния трубопроводов на работу водоотлива

Дополнительным фактором, который приводит к интенсивному зарастанию трубопроводов твердыми отложениями, является чрезвычайно высокая минерализация шахтной воды. Это, в свою очередь, повышает давление в трубах, увеличивает расход электроэнергии насосами, снижает производительность откачки (рис. 1.6). Для поддержания ее на проектном уровне потребовалась бы прокладка дополнительных труб и установка насосов, а это является очень затратным мероприятием и практически мало используемым.

Для очистки труб от минеральных отложений в настоящее время применяется масса различных способов – механических, химических, гидродинамических. Известны некоторые механические способы очистки труб от минеральных отложений, которые в виду своей сложности применяются периодически:

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 от-

сутствие объективной информации о величине и твердости отложений не позволяет масштабно использовать данный способ.

Одним из путей решения существующей проблемы обрастания трубопроводов минеральными отложениями является использование новейшей техники и современных технологий магнитной обработки шахтной жидкости [24, 25], которые позволяют ликвидировать причины, вызывающие отложения. Этот метод особенно актуален для условий горнодобывающей промышленности, когда технологические процессы требуют бесперебойной работы всего водоотливного комплекса – от шахтной насосной до водоотстойника на поверхности. Однако при этом проблема обрастания трубопроводов минеральными отложениями все еще остается актуальной на многих предприятиях горнодобывающей промышленности, в том числе – на шахтах.

На рис. 1.6 изображены напорные характеристики трубопроводной сети $H_{mp} = f(Q)$ при обрастании трубопровода минеральными отложениями, напорная характеристика насоса $H_n = f(Q)$ и его КПД $\eta = f(Q)$. Здесь 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. уменьшении его внутреннего диаметра, соответственно снижается и его пропускная способность. Вследствие этого изменяется сопротивление трубопроводной сети и происходит смещение рабочей точки 1.

Так, при уменьшении внутреннего диаметра трубопровода на 10, 20 и 30 %, происходит смещение рабочей точки 1 на характеристике насоса, что соответствует параметрам 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 – снижаться ($Q_{1m^{(0,9)}}$, $Q_{1m^{(0,8)}}$, $Q_{1m^{(0,7)}}$). Изменение положения 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 из-за обрастания его минеральными отложениями приводит к снижению пропускной способности и невозможности откачивать необходимый объем воды имеющимися насосами. При этом возрастает общая продолжительность работы по откачиванию единицы объема

воды, что, как следствие, способствует увеличению расхода электроэнергии на выполнение данной работы (см. раздел 2).

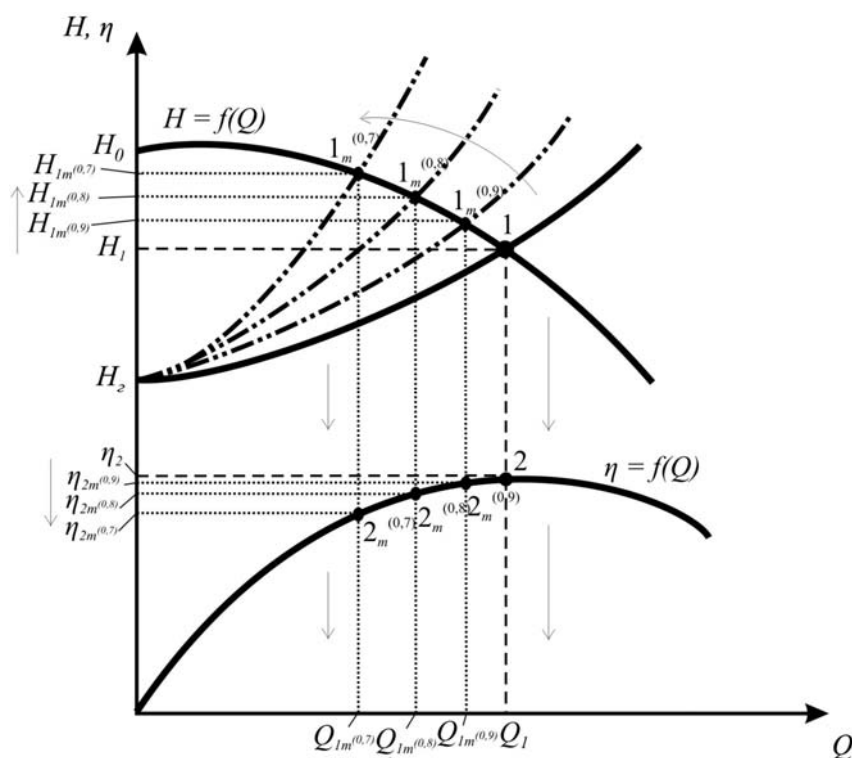


Рис. 1.6. Общий вид напорных характеристик трубопроводной сети при обрастании трубопровода

1.6. Совместное влияние технического состояния насосов и трубопроводов на работу водоотлива

Одновременное ухудшение технического состояния основного оборудования водоотлива – насосов и трубопроводов, приводит еще к более низким показателям эффективной работы ГВУ [26, 27].

На рис. 1.7 показан ориентировочный вид напорных характеристики трубопроводной сети и насоса при одновременном ухудшении их технического состояния.

Так, например, в результате обрастания трубопровода минеральными отложениями на 10 % происходит снижение производительности насоса до 10 %, а ухудшение технического состояния насоса на 10 % может привести к снижению его производительности до 30 %. Одновременное ухудшение технического состояния насоса и трубопровода на 10 % способствует снижению производительности уже до 45 %. Подобная тенденция приводит либо к необходимости

использования дополнительного насоса для выполнения работы, рассчитанной для одного агрегата, в результате чего происходит увеличение потребляемой мощности, либо к повышению продолжительности работы по откачиванию воды, что также может быть причиной увеличения расхода электроэнергии и снижения возможностей ГВУ при РРЭ (см. раздел 2).

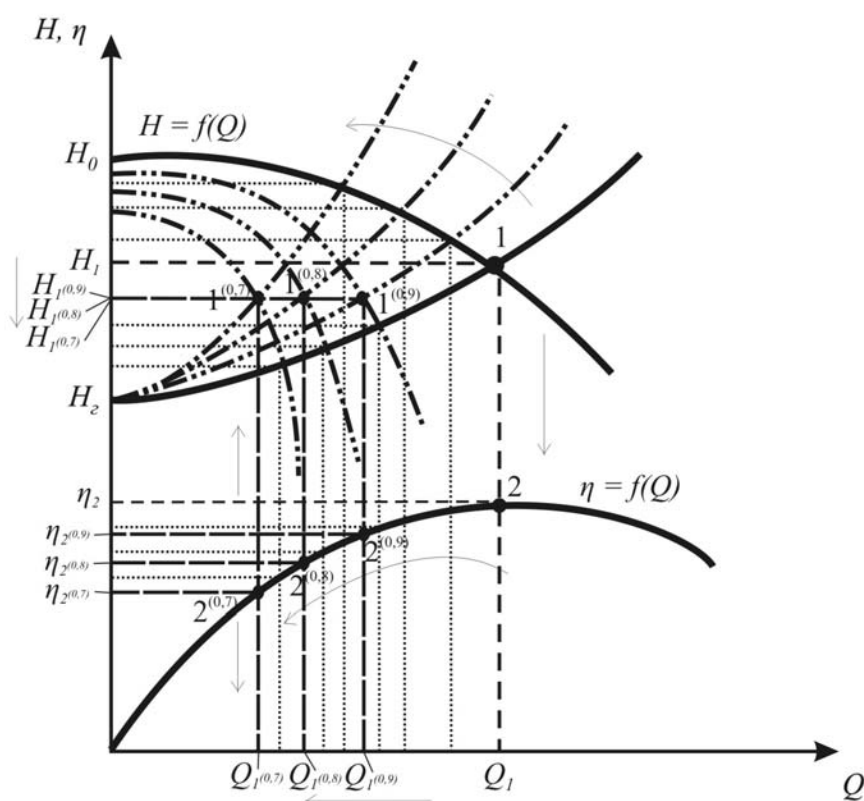


Рис. 1.7. Ориентировочный вид напорных характеристик трубопроводной сети и насоса при одновременном ухудшении их технического состояния

Дальнейшее ухудшение рабочих параметров основного оборудования ГВУ приводит к невозможности выполнения ими своих функций, а одновременность этих факторов ускоряет данный процесс, и, как следствие, может вызвать затопление шахты.

Следовательно, мониторинг и своевременное восстановление рабочих параметров основного оборудования шахтного водоотлива оказывает большое влияние на эффективность регулирования режимов электропотребления, что более подробно рассматривается в разделе 2.

2. КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЛАВНОГО ВОДООТЛИВА В РЕЖИМЕ ПОТРЕБИТЕЛЯ–РЕГУЛЯТОРА

2.1. Принципы регулирования режимов электропотребления главного водоотлива

Энергоэффективность функционирования шахтного водоотлива напрямую зависит от регулирования режимов электропотребления насосными установками. Процесс РРЭ целесообразно осуществлять при использовании одноставочного дифференцированного по времени суток тарифа, когда исключается работа основного оборудования ГВУ в периоды максимума нагрузок в энергосистеме [28, 29]. Вид графика электрических нагрузок ГВУ с двумя насосами номинальной мощностью $P_n = 500$ кВт и напряжением $U_n = 6$ кВ каждый и объемом водосборника 1500 м^3 при применении РРЭ представлен на рис. 2.1.

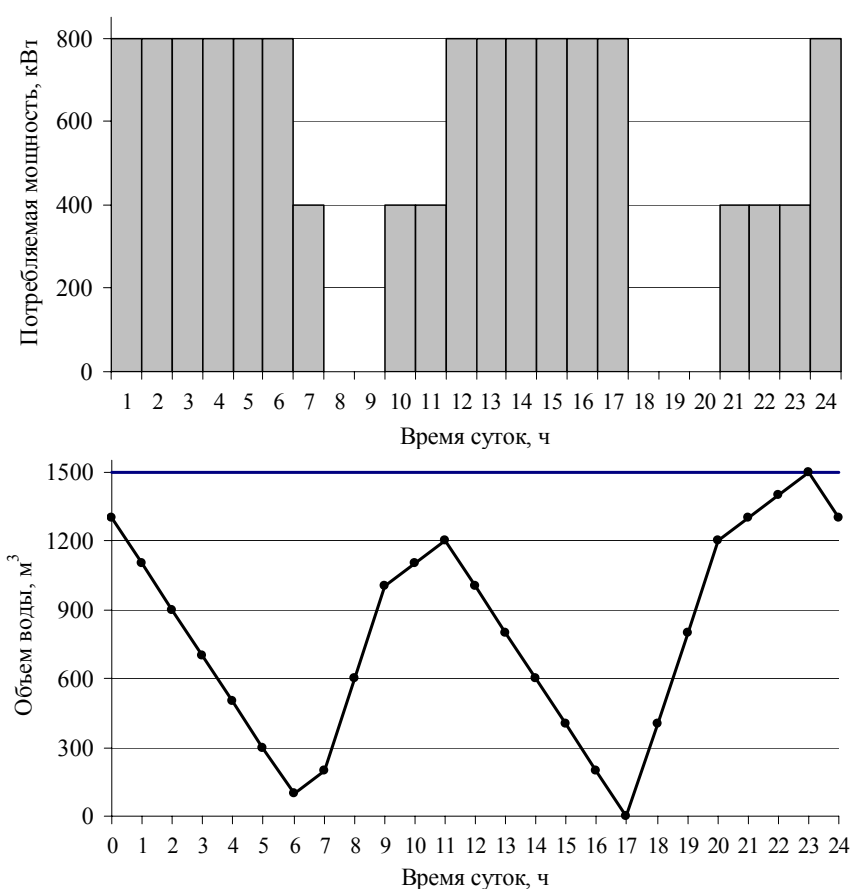


Рис. 2.1. Графики электрических нагрузок и заполнения водосборника ГВУ при применении РРЭ

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 данных мероприятий достигается при достаточной вместимости водосборника, что характерно не для всех шахт (см. п. 1.1).

Сооружение дополнительного объема водосборника требует вложения немалых денежных средств, что может оказаться мало рентабельным для шахт с малым притоком и малоагрегатным водоотливом. Для таких шахт эффективность РРЭ по сравнению с затратами на сооружение дополнительной ветви водосборника может быть незначительной. Поэтому для этих условий возможен режим работы ГВУ без РРЭ, т.е. наполнение – опорожнение водосборников выполняется "по уровню" воды (рис. 2.2).

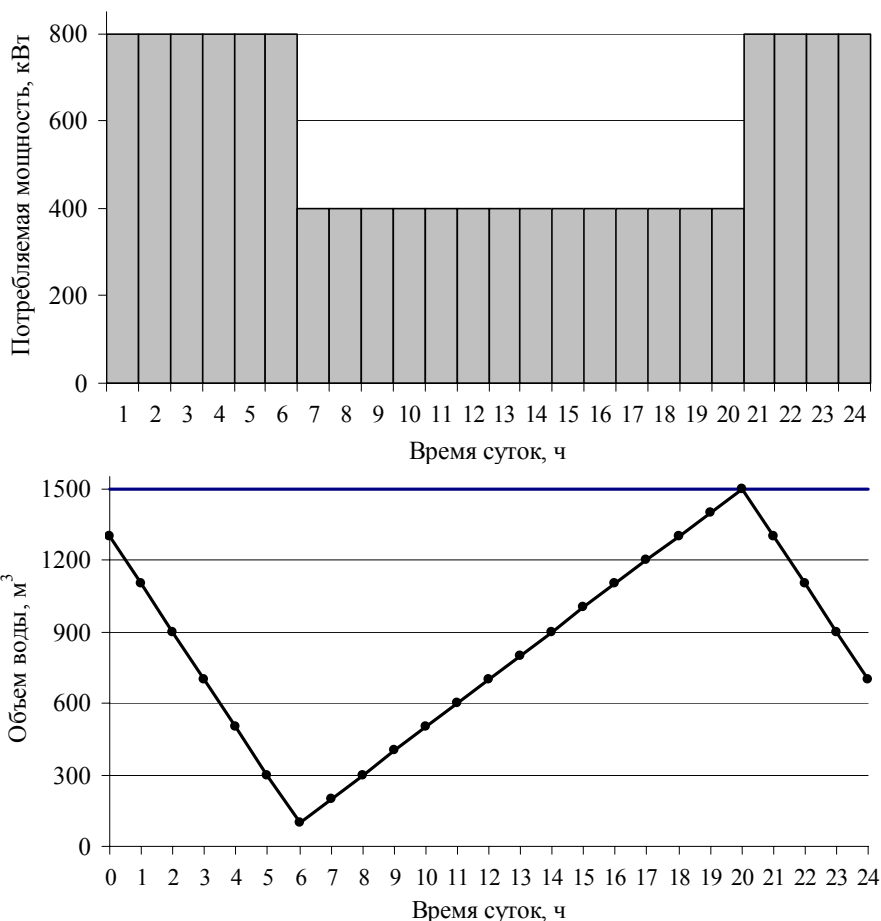


Рис. 2.2. Графики электрических нагрузок и заполнения водосборника ГВУ без применения РРЭ

Применение РРЭ само по себе, безусловно, направлено на выравнивание графика электрических нагрузок энергосистемы и полу-

чение экономии денежных средств на оплату потребленной электроэнергии для предприятий. Однако эффективность данных мероприятий напрямую зависит от ряда технологических условий функционирования ГВУ (см. раздел 1), корректирование и учет которых позволит повысить энергетическую и экономическую эффективность использования водоотлива в режиме П–Р.

2.2. Алгоритм функционирования главной водоотливной установки в режиме потребителя – регулятора

Главный водоотлив угольной шахты относится к сложной кибернетической системе, т.е. к системе, не имеющей простых описаний, поскольку наряду с большим количеством 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, ставшее в результате появления быстродействующих универсальных ЭВМ новым универсальным орудием научного познания [30]. Имитационное моделирование основано на применении так называемых 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 выдают в соответствии с введенным 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 и 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, 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 [30].

Полученный функционал представляет собой 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;

$V_{вод} = f(Q_{np}, K_з, t_m)$ – объем водосборника (м³), величина которого зависит от водопритока Q_{np} , степени его заиления $K_з$ и продолжительности наибольшего максимума нагрузок в энергосистеме t_m , и определяется выражением (2.1) или (2.2);

$Q_p = f(H_w, R_{эк}, N_n, N_m, Z_k)$ – рабочая производительность насоса (м³/ч), которая зависит от горизонта водоотлива H_w , эквивалентного сопротивления внешней трубопроводной сети $R_{эк}$, числа параллельно работающих насосов N_n на определенное количество трубопроводов N_m , а также от количества ступеней (колес) насоса Z_k , и определяется выражением (2.8);

$R_{эк} = f(\xi, D_{тр})$ – эквивалентное сопротивление внешней трубопроводной сети (ч²/м⁵), которое зависит от коэффициента гидравлического сопротивления внешней сети установки ξ и диаметра напорного трубопровода $D_{тр}$, и определяется выражением (2.3);

$H_p = f(Q_p, Z_k)$ – рабочий напор (м), создаваемый насосом, который зависит от рабочей производительности насоса Q_p и эквивалентного

сопротивления внешней трубопроводной сети $R_{эк}$, и определяется выражением (2.9);

$\eta_n = f(Q_p)$ – коэффициент полезного действия насосов, который зависит от рабочей производительности насоса Q_p и определяется выражением (2.10);

$w_0 = f(Q_p, P_n, N_n)$ – удельный расход электроэнергии (кВт·ч/м³), который зависит от рабочей производительности насосов Q_p , потребляемой электрической мощности P_n и соответствующего количества параллельно работающих насосов N_n , и определяется выражениями (2.12) и (2.15);

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

Формирование режимов работы шахтного водоотлива осуществляется с помощью имитационного моделирования [31, 32]. Для этого разработан алгоритм функционирования ГВУ в режиме П–Р, который позволяет получить множество возможных режимов функционирования водоотлива при заданных условиях и ограничениях, и потом 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 для расчета объема 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 (одни 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 рис. 2.3 представлена блок-схема алгоритма моделирования режимов функционирования ГВУ в режиме П–Р, в соответствии с которой последовательность выполнения 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, 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;

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

H_w – горизонт водоотлива (полная высота подъема воды), м;

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

$D_{\text{тр.в}}$ – 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;

η_c – КПД электрической сети, принимается равным 0,97 [4];

$m_{\text{д}}$ – число включений насосов за время T_p . Величина $m_{\text{д}}$ определяется для исключения вариантов с большим числом включений насосных агрегатов, так как 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 $U_n = 6$ кВ могут достигать значений тока $I_n = 500$ А при номинальной мощности до $P_n = 1250$ кВт. Поэтому принимаем, например, число включений насосных агрегатов в сутки не более $m_{\text{д}} = (N_{\text{н.раб}} + N_{\text{н.рез}})2$;

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

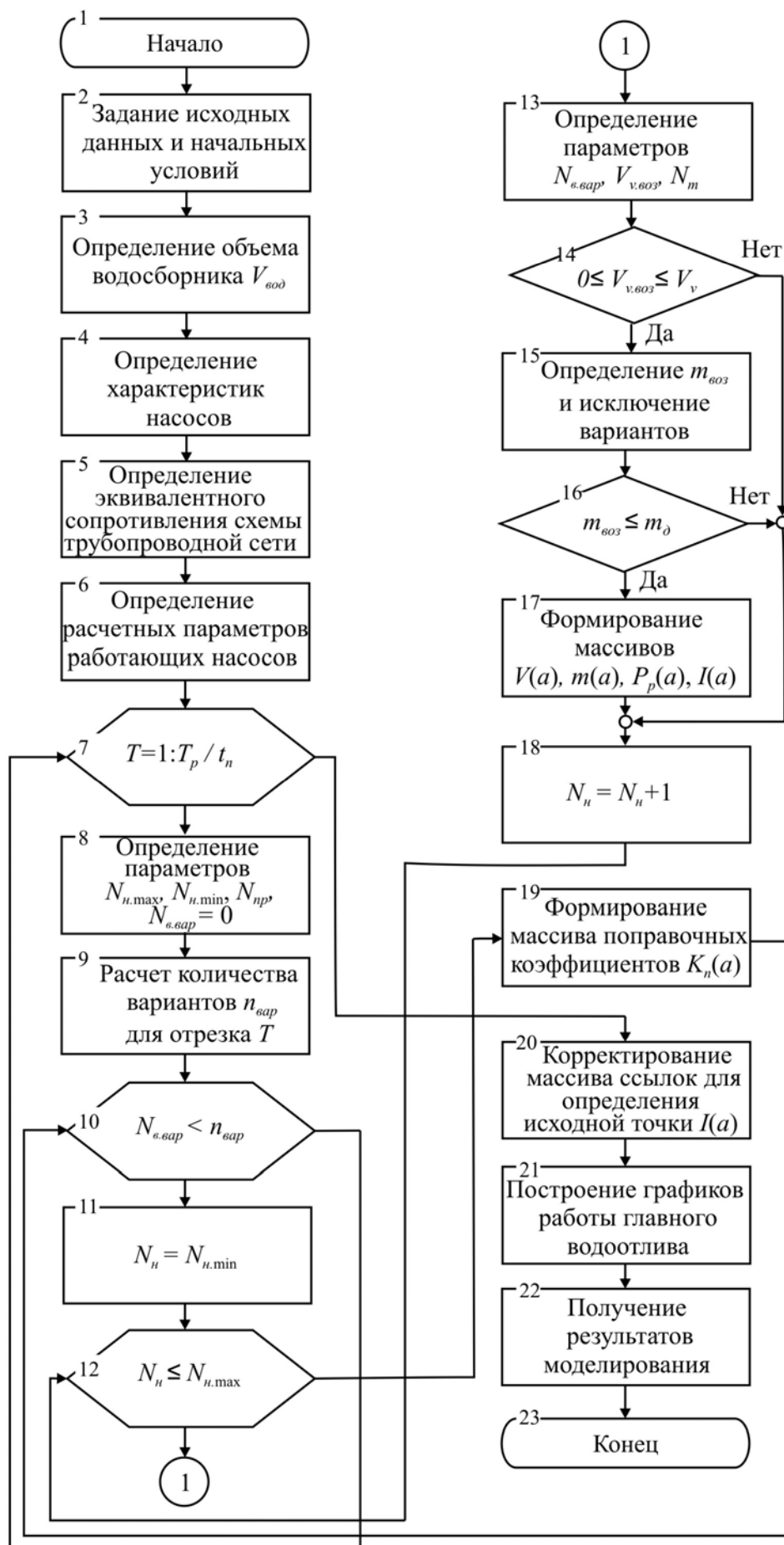


Рис. 2.3. Блок-схема алгоритма моделирования режимов работы ГВУ

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

$H_{nn.y}, K_{nn.y}$ – начало и конец утреннего периода полупиковых нагрузок относительно суточного интервала;

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

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

k_n, k_{nn}, k_n и $T_{эн}$ – 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 с учетом допустимого заиления и процесса чистки водосборника:

- для действующих ГВУ

$$V_v = \sum_1^{n_в} V_{в.i} - V_{в.маx}, \text{ м}^3, \quad (2.1)$$

где $V_{в.маx}$ – максимальная по объему ветвь водосборника, м^3 .

- для реконструируемых и проектируемых ГВУ (см. п. 2.2) [18]

$$V_v = K_3 t_m Q_{маx}, \text{ м}^3, \quad (2.2)$$

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;

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

4. По работам [33, 34] в зависимости от типа применяемых насосов (ЦНС, ЦНСШ или НСШ) и сечения трубопроводов определяются следующие параметры:

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

$H_{0к}$ – 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. Рассчитывается эквивалентное сопротивление внешней трубопроводной сети для стандартной кольцевой схемы трубопроводного коллектора с учетом зарастания трубопровода [33, 35]:

$$R_{\text{эк}} = \frac{8\xi}{3600^2 \pi^2 g (K_d D_{\text{мп}})^4}, \text{ ч}^2/\text{М}^5, \quad (2.3)$$

где g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$;

ξ – коэффициент гидравлического сопротивления внешней трубопроводной сети ГВУ, определяется как

$$\xi = \xi_{\text{вс}} \left(\frac{K_d D_{\text{мп}}}{D_{\text{мп.в}}} \right)^4 + \xi_{\text{н}} + 1. \quad (2.4)$$

Здесь $\xi_{\text{вс}} \left(\frac{K_d D_{\text{мп}}}{D_{\text{мп.в}}} \right)^4$ – коэффициент гидравлического сопротивления

всасывающего трубопровода, приведенный к диаметру напорного трубопровода ($D_{\text{мп.в}}$), определяется как

$$\xi_{\text{вс}} = \xi_{\text{нк}} + 3\xi_{\text{к}90} + \lambda_{\text{вс}} \frac{L_{\text{вс}}}{D_{\text{мп.в}}}, \quad (2.5)$$

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;

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

$\xi_{\text{н}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления напорного трубопровода, который определяется так:

$$\xi_{\text{н}} = \xi_{\text{о.к}} + 2\xi_{\text{з}} + 3\xi_{\text{к}90} + \xi_{\text{к}\alpha 1} + \xi_{\text{к}\alpha 2} + \xi_{\text{T}1} + 2\xi_{\text{T}2} + \lambda_{\text{н}} \frac{L_{\text{н}}}{K_d D_{\text{мп}}}. \quad (2.6)$$

Здесь $\xi_{o.k}$ и ξ_3 – коэффициенты сопротивления обратного клапана и полностью открытой задвижки;

ξ_{k90} , $\xi_{k\alpha_1}$, $\xi_{k\alpha_2}$ – 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, смещению рабочей точки и изменению 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 можно уточнять действительный диаметр трубопровода посредством коэффициента уменьшения диаметра трубопровода K_d . Поскольку протяженность всасывающего трубопровода, по сравнению с напорным, мала, то достаточно для сравнительного анализа уточнить диаметр только напорного трубопровода.

– При $K_d = 1$ – степень зарастания принимается равной нулю, т.е. соответствует 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) или рассчитываться по формуле

$$D_{ф.мп} = K_d D_{мп}. \quad (2.7)$$

6. Определяются величина подачи, напора, КПД, коэффициента использования насоса и удельный расход электроэнергии в зависимости от количества параллельно работающих насосов и трубопроводов [33, 34]:

$$Q_{p(N_H, N_m)} = \frac{Z_K A + \sqrt{Z_K A^2 + 4 \left(R_{\text{ЭК}} \frac{N_H^2}{N_m^2} + Z_K B \right) (Z_K H_{0K} - H_w)}}{2 \left(R_{\text{ЭК}} \frac{N_H^2}{N_m^2} + Z_K B \right)}; \quad (2.8)$$

$$H_{p(N_H, N_m)} = Z_K \left(H_{0K} + A Q_{p(N_H, N_m)} - B Q_{p(N_H, N_m)}^2 \right); \quad (2.9)$$

$$\eta_{n(N_H, N_m)} = a Q_{p(N_H, N_m)} - b Q_{p(N_H, N_m)}^2 + c Q_{p(N_H, N_m)}^3; \quad (2.10)$$

$$K_{u.n(N_H, N_m)} = \frac{Q_{p(N_H, N_m)}}{Q_{\text{НОМ}}}; \quad (2.11)$$

$$w_{(N_H, N_m)} = 0,0027778 \frac{Z_K}{\eta_d \eta_c} \left(\frac{H_{0K} + A Q_{p(N_H, N_m)} - B Q_{p(N_H, N_m)}^2}{a Q_{p(N_H, N_m)} - b Q_{p(N_H, N_m)}^2 + c Q_{p(N_H, N_m)}^3} \right). \quad (2.12)$$

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

$$\eta_{n.f} = K_{\eta} \eta_{n(N_H, N_m)}. \quad (2.13)$$

Введенный коэффициент K_{η} , который определяет степень снижения КПД насоса относительно рабочего значения, позволяет установить, как влияет ухудшение технического состояния насосов на величину удельного расхода электроэнергии.

– При $K_{\eta} = 1$ – степень ухудшения технического состояния насосов принимается равной нулю, т.е. 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 ре-

шить обратную задачу, т.е. пересчитать рабочие параметры насосов, которые имеют сниженный (скорректированный) КПД.

Представим выражение (2.13) в виде кубического уравнения

$$\begin{aligned} d &= ax - bx^2 + cx^3; \\ cx^3 - bx^2 + ax - d &= 0, \end{aligned} \quad (2.14)$$

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. Определение 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 времени ($T = 1 : T_p / t_n$) для расчета количества возможных переключений насосов через интервал времени изменения их режима работы t_n .

Для формирования режимов работы водоотлива рассчитывается потребляемая электрическая активная мощность одного насоса по формуле

$$P_{одн} = \frac{\gamma g Q_{p(N_n, N_m)} H_{p(N_n, N_m)}}{1000 \cdot 3600 \eta_{н(N_n, N_m)} \eta_{д} \eta_{с}}, \quad (2.15)$$

где (N_n, N_m) – режим работы 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 $N_{в.вар}$. В этом случае при моделировании на текущем отрезке времени 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 времени 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 вместимости водосборника, недостаточной для накопления воды за период максимума (где $N_{нр}$ – минимальное количество насосов, сум-

марная производительность которых компенсирует часовой приток воды). В период полупиковых нагрузок допускается, что $N_{н.мин} = N_{np}$, а $N_{н.маx} = N_{н.раб}$. Соответственно, в ночной период $N_{н.мин} = N_{np}$, а $N_{н.маx} = N_{н.раб} + N_{н.рез}$, т.е. в период минимальных нагрузок в энергосистеме откачивание воды осуществляется всегда (при условии ее наличия в водосборнике).

9. Рассчитывается количество возможных вариантов $n_{вар}$ на текущем отрезке времени T для ограничения перебора точек. В общем случае

$$n_{вар} = \left(n_{(T-1)} - n_{(T-2)} \right) \left(N_{н.маx} - N_{н.мин} + 1 \right), \quad (2.16)$$

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 (2.16).

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

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

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

13. Рассчитывается 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 $V_{v.603}$ рассчитывается в зависимости от интервала изменения режима работы водоотлива t_n , т.е. при отключении всех насосов ($N_H = 0$):

$$V_{v.603} = V_0 + Q_0 t_n, \quad (2.17)$$

а при $N_H > 0$

$$V_{v.603} = V_0 + \left(Q_0 - Q_{p(N_H, N_m)} N_H \right) t_n. \quad (2.18)$$

В общем виде выражение будет иметь следующий вид:

$$V_{v.603} = V_{(T-1)} + \left(Q_0 - Q_{p(N_H, N_m)} N_H \right) t_n, \quad (2.19)$$

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

14. Выполняется проверка рассчитанного в п. 13 значения $V_{v.603}$ на попадание в область возможных режимов работы водоотливной установки, т.е. объем воды в водосборнике должен находиться на отметке от нуля до верхней границы водосборника V_v , по условию

$$0 \leq V_{v.603} \leq V_v. \quad (2.20)$$

Далее выполняется расчет текущего режима (п. 15). В случае невыполнения условия (2.20) – точка отбрасывается и выбирается следующее количество насосов (п. 18).

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

$$m_{603} = m_{(T-1)} + \left(N_H - \frac{P_{p(T-1)}}{P_{одн}} \right), \quad (2.21)$$

где $m_{(T-1)}$ – количество включений насосов до рассматриваемого отрезка времени T при данном режиме работы. При $T = 0$ количество

включений насосных агрегатов $m_{(T-1)} = N_n$. Расчет по выражению (2.21) выполняется в случае, когда 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 времени T , кВт.

Исключение из моделирования точек с $m_{603} > m_\partial$ 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) нельзя избавиться от переполнения водосборников без включения дополнительных насосов (2.23), а также избежать режима работы насосов при уровне воды в водосборнике $V_{v.603} < 0$ (2.24):

$$m_{603} = m_\partial; \quad (2.22)$$

$$V_{v.603} + (Q_0 - Q_{p(N_n, N_m)} N_{np}) \cdot (T_p - Tt_n) > V_v; \quad (2.23)$$

$$V_{v.603} + (Q_0 - Q_{p(N_n, N_m)} (N_{np} + 1)) \cdot (T_p - Tt_n) < 0; \quad (2.24)$$

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

$$(m_\partial - m_{603}) + N_n; \quad (2.25)$$

$$V_{v.603} + (Q_0 - Q_{p(N_n, N_m)} (N_n + m_\partial - m_{603})) \cdot (T_p - Tt_n) > V_v. \quad (2.26)$$

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 ($a = a+1$; $V(a) = V_{v.603}$) определяются расчетные параметры потребляемой насосами электрической мощности. Так, при:

$$-N_n = 0 \quad P_p(a) = 0; \quad (2.27)$$

$$-N_n > 0 \quad P_p(a) = \frac{\gamma g Q_{p(N_n, N_m)} H_{p(N_n, N_m)}}{1000 \cdot 3600 \eta_{n(N_n, N_m)} \eta_{\partial} \eta_c} N_n. \quad (2.28)$$

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

16. Выполняется проверка рассчитываемого режима работы по допустимому количеству включений насосов согласно условию

$$m_{603} \leq m_{\partial}. \quad (2.29)$$

При выполнении этого условия проводится дальнейший расчет и формирование массивов данных (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 данных очевидна, а вектор $I(a)$ необходим для обеспечения правильного определения исходной точки на предыдущем отрезке времени T , из которой и выходит прямая рассчитываемого варианта. В этом пункте также присваивается новое значение коэффициенту корректирования K_k :

$$a = a + 1; \quad (2.30)$$

$$V(a) = V_{v.603}; \quad (2.31)$$

$$m(a) = m_{603}; \quad (2.32)$$

$$P_p(a) = \frac{\gamma g Q_{p(N_n, N_m)} H_{p(N_n, N_m)}}{1000 \cdot 3600 \eta_{n(N_n, N_m)} \eta_d \eta_c} N_n; \quad (2.33)$$

$$I(a) = I(a-1) + 1; \quad (2.33)$$

$$K_k = I(a). \quad (2.34)$$

18. Выполняется переход на следующее количество насосов:

$$N_n = N_n + 1. \quad (2.35)$$

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

$$K_n(a) = K_k - I(a). \quad (2.36)$$

Элементы массива K_n рассчитываются только при условии, что $K_k - I(a) > 1$. 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 попадет 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, следовательно, к моделированию принципиально невозможных ГЭН. Поэтому появляется необходимость в формировании еще одного массива данных K_n .

20. После выполнения расчета для всех точек и завершения формирования массивов данных проводится корректирование массива ссылок для определения исходной точки $I(a)$ (при соблюдении условия (2.37)):

$$K_n(a) \neq 0; \quad (2.37)$$

$$I(a) = I(a) + K_n(a). \quad (2.38)$$

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, которые могут быть использованы для:

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

- построения любого из возможных графиков наполнения водосборников и соответствующего ему графика электрических нагрузок ГВУ;

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

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

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

- определения для выбранного (текущего) режима работы платы за потребленную электроэнергию в течение суток, общего расхода электроэнергии за сутки, удельного расхода электроэнергии по графику и средневзвешенного расхода электроэнергии по характеристикам насосов;

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

23. Окончание.

Для примера на рис. 2.4 приведены удовлетворяющие условиям моделирования графики 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 V_0 в начале суток ($t_0 = 0$ ч), который составляет 1200 м^3 (задаем), предлагается три варианта работы на-

сосов: 0 – не работает ни один из насосов, 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 при определенных границах параметров водосборника и с заданными требованиями относительно отключения насосов в периоды максимальной нагрузки энергосистемы (в пиковую зону П).

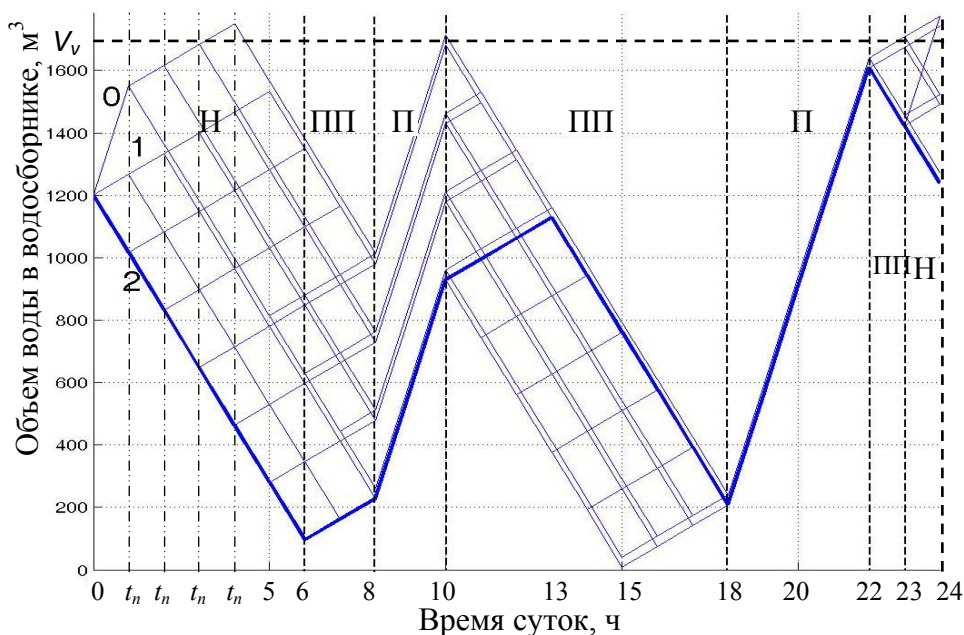


Рис. 2.4. Графики возможных режимов функционирования ГВУ с двумя насосами

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 уже наблюдается его переполнение.

Жирной ломаной линией (рис. 2.4) 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.

2.3. Результаты моделирования режимов работы главного водоотлива

Приведенный в п. 2.2 алгоритм моделирования режимов функционирования ГВУ в качестве П–Р позволяет с помощью полученных результатов определить наиболее энергоэкономичный режим работы водоотлива для любых условий.

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

- Построение графиков всех возможных вариантов работы водоотливной установки для заданных условий (рис. 2.5), число которых составляет 653319 (при условии включения только трех насосов): из полученного количества вариантов – 71996 циклических режимов.

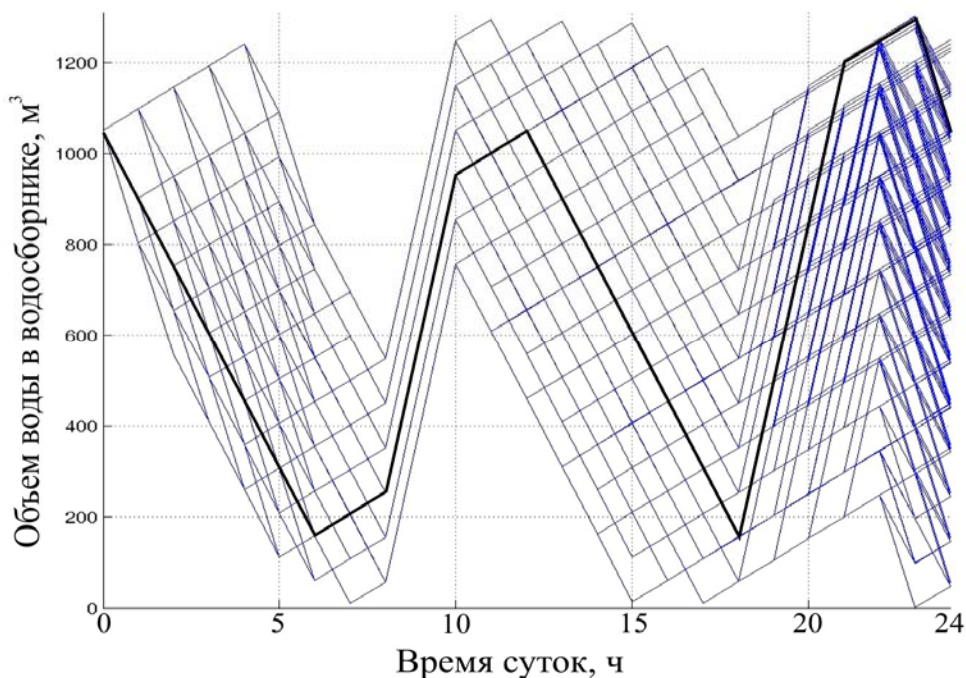


Рис. 2.5. Графики возможных режимов функционирования ГВУ (при работе трех насосов)

- Определение величины объема воды в водосборнике, мощности, потребляемой водоотливом, и количество включений насосов

для любой точки отрезка времени T для построения любого из возможных циклических графиков наполнения водосборников и соответствующего ему графика электрических нагрузок ГВУ (рис. 2.6).

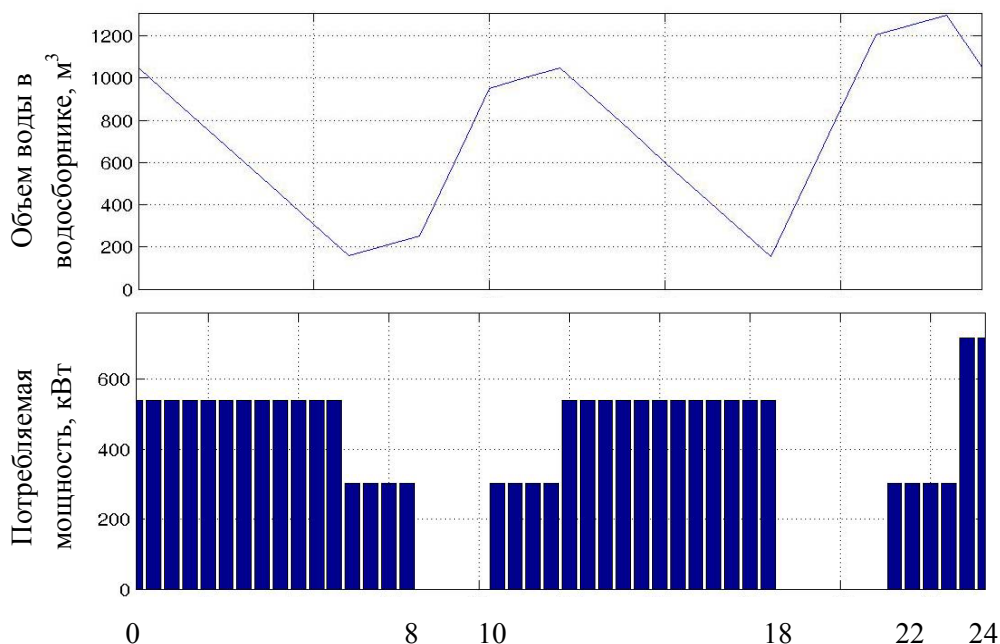


Рис. 2.6. График наполнения водосборника и соответствующий ему ГЭН главного водоотлива (при работе трех насосов)

- 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 электроэнергии для заданных условий составляет $1,0721 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ при условии минимальной оплаты 8349 грн. При этом, для возможного режима работы 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 нее) определяется число 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, удовлетворяющим двум условиям, – 544. Например, удель-

ный расход электроэнергии по графику (одному из 544, рис. 2.6) 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 работы 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 в этот период будет минимальным. Основная работа насосов будет приходиться на полупиковый период для необходимого 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 опорожнения водосборников к утреннему максимуму, что приведет к снижению объема работы, выполняемой насосами, приходящегося на полупиковый период.

3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ГЛАВНОГО ВОДООТЛИВА

3.1. Зависимость эффективности работы водоотлива от технического состояния основного оборудования

К основному оборудованию ГВУ можно отнести водосборники, насосы и трубопроводную сеть. Ухудшение технического состояния водосборников снизит энергоэффективность использования водоотлива в режиме П–Р (см. п. 1.2). В свою очередь, ухудшение технического состояния насосов и трубопроводов напрямую отразится на процессе откачивания воды (см. п. 1.5 и 1.6) и, как следствие, на увеличении удельного расхода электроэнергии. Приведенный в п. 2.2 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. 3.1).

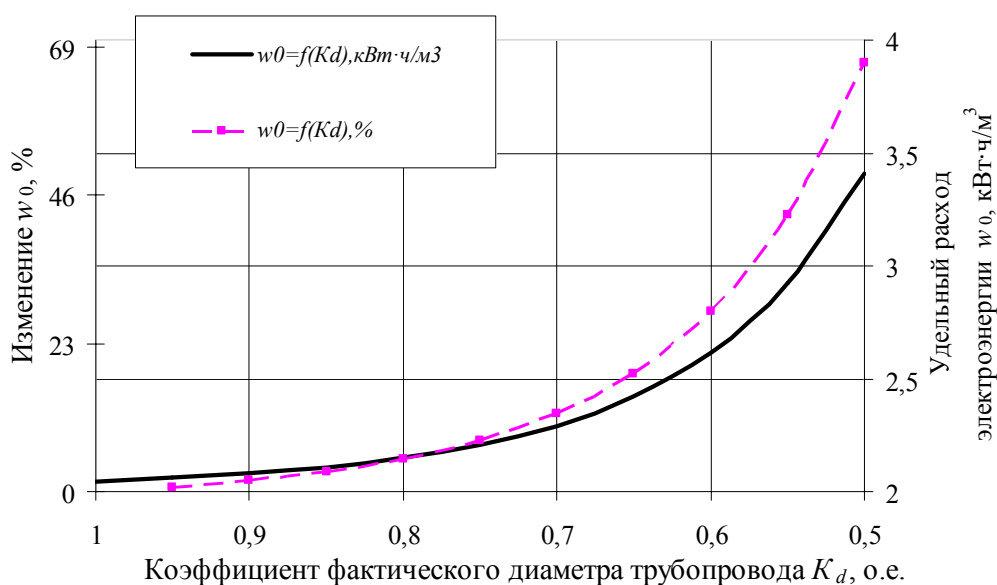


Рис. 3.1. График зависимости удельного расхода электроэнергии от изменения внутреннего диаметра трубопровода

Представленный на рис. 3.1 график (на примере ГВУ шахты им. Героев Космоса) подтверждает необходимость своевременного

контроля за техническим состоянием трубопроводной сети, которая подвергнута разрушительному воздействию агрессивных шахтных вод. Цель такого мониторинга – повышение энергетической эффективности функционирования ГВУ в режиме П–Р. Причем мониторинг возможно осуществлять по увеличению удельного расхода электроэнергии и напору, который также изменяется при уменьшении внутреннего диаметра трубопровода вследствие его обрастания минеральными отложениями (п. 1.5).

Увеличение удельного расхода электроэнергии на 1,69, 4,99 или 12,01 % и т.д. (рис. 3.1, пунктирная линия) может свидетельствовать об обрастании трубопроводов минеральными отложениями на 10, 20 или 30 % соответственно, что отвечает фактическому внутреннему диаметру трубопровода, который составляет $0,9D_{тр}$, $0,8D_{тр}$ или $0,7D_{тр}$ соответственно.

Введение коэффициента фактического КПД насосов K_η (п. 3.2) [36, 37] позволило определить влияние степени ухудшения технического состояния насосов на изменение величины удельного расхода электроэнергии (рис. 3.2).

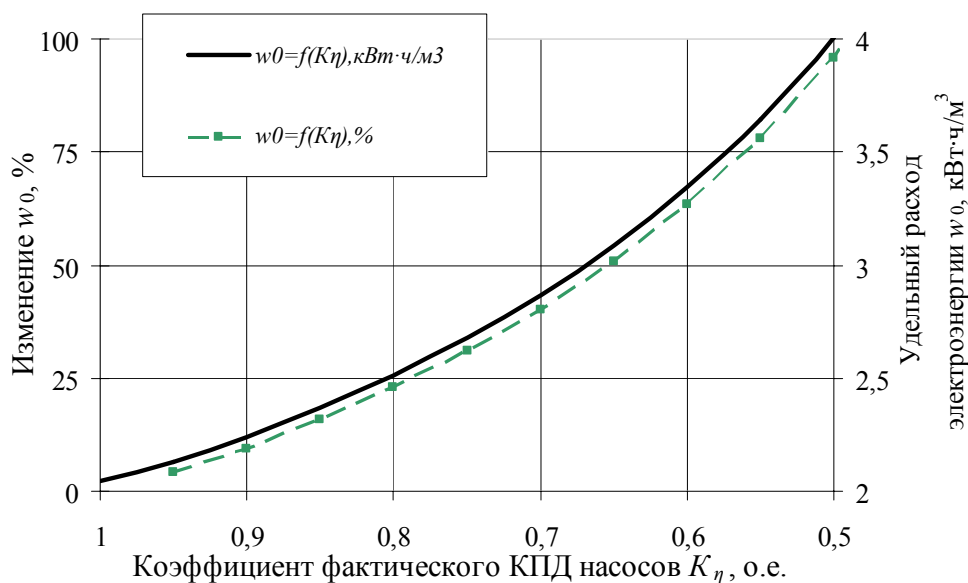


Рис. 3.2. График зависимости удельного расхода электроэнергии от ухудшения технического состояния насосов

Приведенный на рис. 3.2 график (на примере ГВУ шахты 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 величине интенсивности увеличения удельного расхода электроэнергии и напору, который незначительно уменьшается при снижении рабочих параметров насосов вследствие ухудшения их технического состояния (п. 1.4).

Увеличение удельного расхода электроэнергии на 9,44, 22,83 или 40,21 % и т.д. (рис. 3.2, 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. 3.1 и 3.2 графики для условий главных водоотливных установок 10-ти шахт Западного Донбасса (рис. 3.3, 3.6), которые получены посредством реализации приведенного в п. 2.2 алгоритма моделирования режимов работы насосов водоотлива. Эти графики отображают характер влияния технического состояния насосов и трубопроводной сети на энергетические показатели функционирования ГВУ в условиях конкретных шахт.

Обобщим графики, приведенные на рис. 3.3, описав их полиномиальной функцией четвертого порядка, приведенной на рис. 3.4.

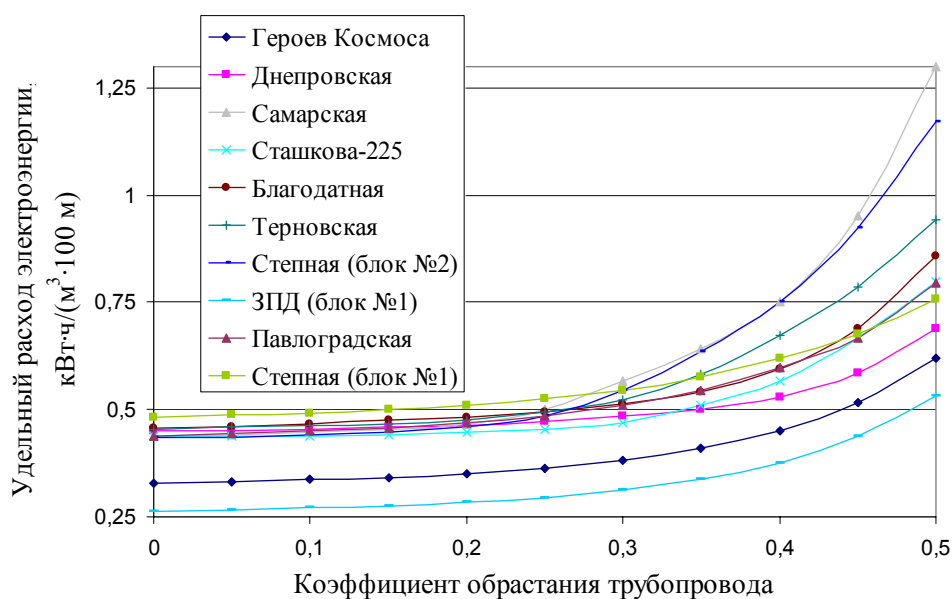


Рис. 3.3. Графики зависимости удельного расхода электроэнергии от степени обрастания трубопроводов минеральными отложениями для ГВУ шахт Западного Донбасса

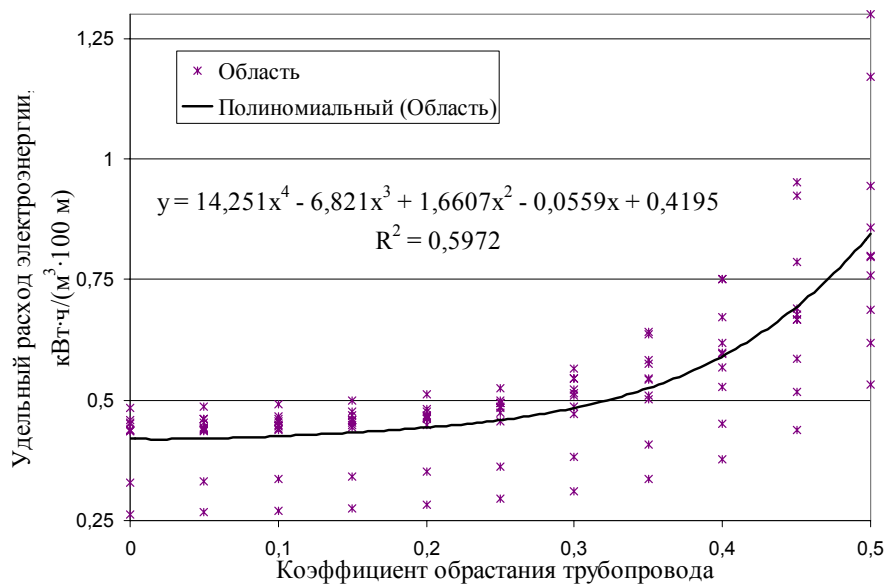


Рис. 3.4. Вид обобщенной зависимости удельного расхода электроэнергии от степени обрастания трубопроводов для ГВУ шахт Западного Донбасса

Полученная на рис. 3.4 функция имеет достаточно низкую достоверность аппроксимации ($R^2 = 0,5972$), что объясняется широким диапазоном изменения величин водопритоков по шахтам. Путем структурирования шахт по величине водопритока (до $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ и более $100 \text{ м}^3/\text{ч}$) можно увеличить достоверность до $0,8513$ и $0,7708$ соответственно (рис. 3.5).

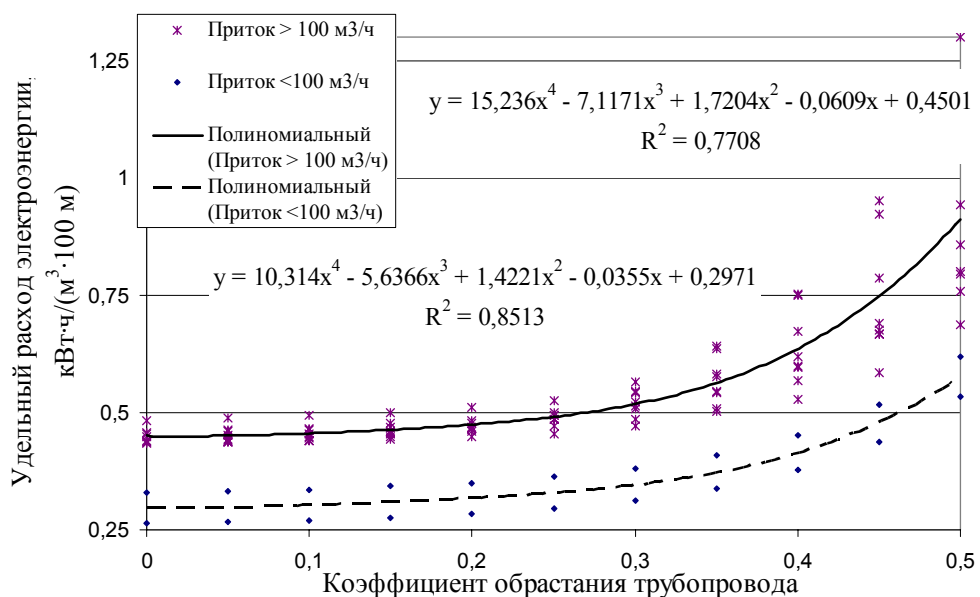


Рис. 3.5. Вид обобщенных зависимостей удельного расхода электроэнергии от степени обрастания трубопроводов для ГВУ шахт Западного Донбасса с водопритоками до $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ и более

Данные функциональные зависимости можно применять для контроля и прогнозирования состояния трубопроводной сети на любой шахте Западного Донбасса. Задавая в качестве неизвестной величины удельный расход электроэнергии в нормальных условиях на какой-либо конкретной шахте, получим зависимость изменения искомым параметров для заданных условий (рис. 3.3). 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 [37, 38].

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

На рис. 3.6 рассмотрены зависимости изменения величины удельного расхода электроэнергии от степени ухудшения технического состояния насосов в условиях ГВУ шахт Западного Донбасса.

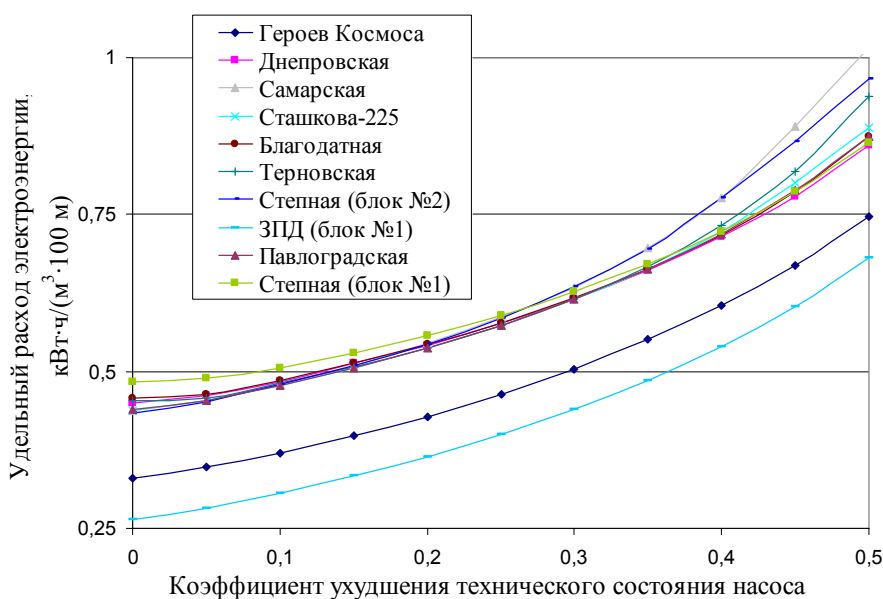


Рис. 3.6. Графики зависимости удельного расхода электроэнергии от степени ухудшения технического состояния насосов для ГВУ шахт Западного Донбасса

Обобщим полученные зависимости (рис. 3.6), описав их полиномиальной функцией третьего порядка, представленной на рис. 3.7.

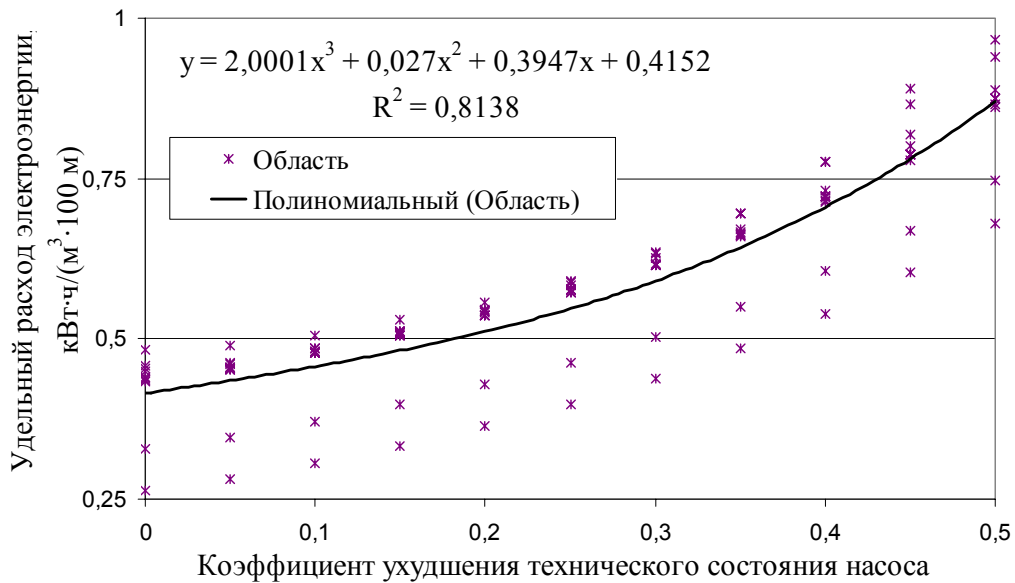


Рис. 3.7. Вид обобщенной зависимости удельного расхода электроэнергии от степени ухудшения технического состояния насосов для ГВУ шахт Западного Донбасса

Полученная функция имеет не достаточно высокую достоверность аппроксимации ($R^2 = 0,8138$), поскольку из группы рассмотренных шахт выделяются две, имеющие малый водоприток, равный $100 \text{ м}^3/\text{ч}$, и характеризующиеся, соответственно, низким удельным расходом электроэнергии.

Повысить достоверность аппроксимации полученных результатов можно также путем структурирования шахт по величине водопритока (до 100 и более $100 \text{ м}^3/\text{ч}$). Тогда достоверность аппроксимации повысится до $0,9417$ и $0,9752$ соответственно (рис. 3.8).

Полученные функциональные зависимости (рис. 3.8) можно применять для своевременного контроля и прогнозирования возможного ухудшения технического состояния насосов в условиях любой шахты Западного Донбасса [37, 38]. Задавая в качестве неизвестной величины удельный расход электроэнергии в нормальных условиях на любой конкретной шахте, получим зависимость изменения искомым параметров для заданных условий (рис. 3.6).

Влияние технического состояния насосов и трубопроводной сети на величину удельного расхода электроэнергии в процессе функционирования ГВУ очевидно. Использование полученных зависимостей (рис. 3.5 и 3.8) на практике позволит избежать перерасхода электроэнергии и своевременно контролировать состояние оборудования, что, в свою очередь, отразится на эффективности работы водоотлива.

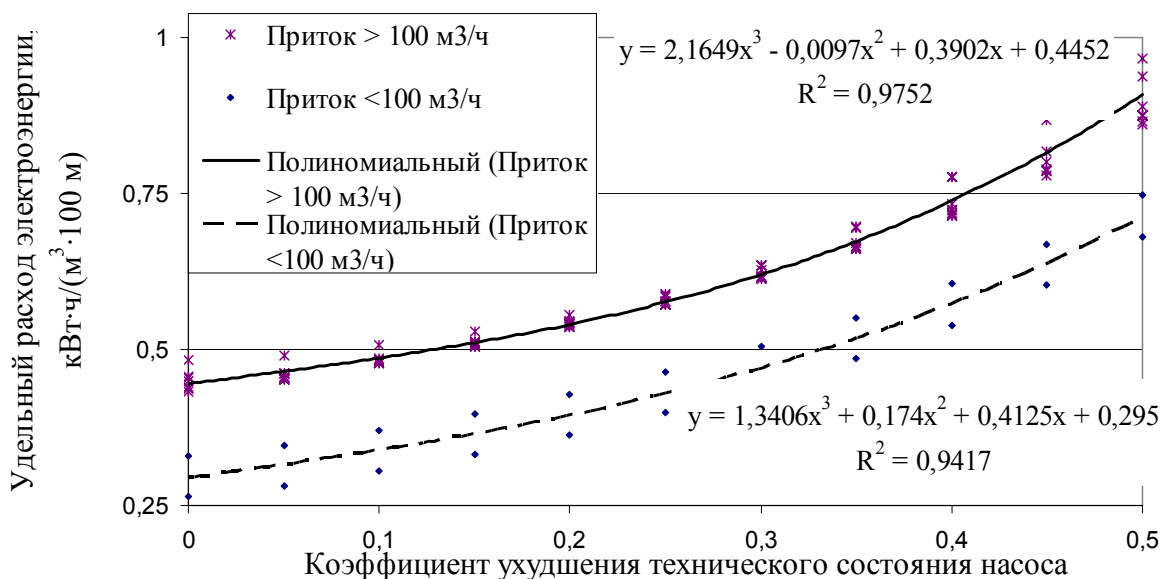


Рис. 3.8. Вид обобщенных зависимостей удельного расхода электроэнергии от степени ухудшения технического состояния насосов для ГВУ шахт Западного Донбасса с водопритоками до 100 м³/ч и более

3.2. Оценка влияния количества трубопроводов

Использование шахтного водоотлива в режиме П–Р подразумевает применение РРЭ, на эффективность которого могут оказывать влияние некоторые факторы. Так, например, работа ГВУ в таком режиме 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 накапливающуюся в течение текущего интервала времени, используя только рабочие насосы, не всегда возможно. В таких случаях возникает необходимость в дополнительном применении резервных агрегатов, что увеличивает количество параллельно работающих насосов на один трубопровод и приводит к снижению эффективности их работы (см. раздел 1). 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 коли-

чества трубопроводов. Так, например, включение восьми насосов на один трубопровод при различной высоте подъема воды (300, 600 и 900 м) приводит к резкому увеличению расхода электроэнергии, т.е. его величина изменяется согласно экспоненциального закона (рис. 3.9). При этом увеличение количества рабочих трубопроводов до двух – четырех приводит к резкому уменьшению кривизны кривой, которая изменяется практически линейно.

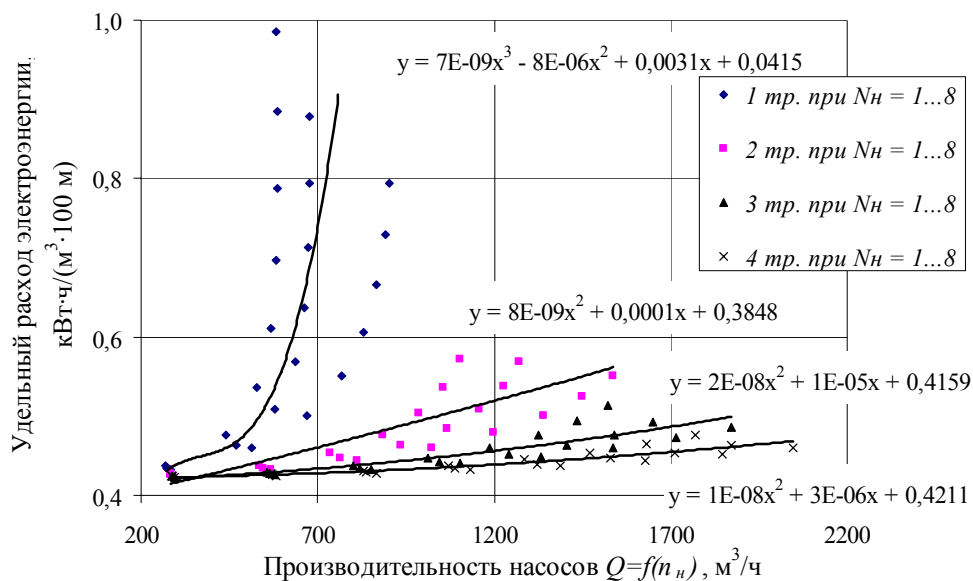


Рис. 3.9. Кривые зависимости удельного расхода электроэнергии для малых водопритоков от количества рабочих трубопроводов при $D_{тр} = 250/300$ мм

На рис. 3.9 приведены зависимости величины удельного расхода электроэнергии на 100 м высоты подъема воды от количества рабочих трубопроводов. Увеличение количества трубопроводов, находящихся в работе, до двух приведет к снижению удельного расхода электроэнергии приблизительно на 2,3 – 38,1 % в зависимости от количества работающих насосов (от 1 до 8).

Соответствующее увеличение количества трубопроводов до трех или четырех позволит снизить удельный расход электроэнергии по сравнению с вариантом использования одного рабочего трубопровода на 2,8 – 47,9 % или на 2,9 – 51,7 % соответственно. Причем, при количестве работающих трубопроводов более трех значительного эффекта не наблюдается, а разница в снижении удельного расхода электроэнергии при использовании четырех трубопроводов по сравнению с тремя составляет 0,2 – 7,3 %. Характеристика трубопровод-

ной сети при четырех рабочих трубопроводах представляет собой практически горизонтальную линию, что свидетельствует о нецелесообразности увеличения количества трубопроводов до пяти и более (рис. 3.9).

На рис. 3.10 приведены зависимости величины удельного расхода электроэнергии на 100 м высоты подъема воды от количества рабочих трубопроводов (при $D_{mp} = 300/350$ мм для больших водопритоков). Характер изменения величины удельного расхода электроэнергии в соответствии с количеством используемых в работе трубопроводов не зависит от водопритока, который отражается лишь на значении удельного расхода электроэнергии. При значительных водопритоках предполагается использовать трубопроводы большего диаметра, что увеличивает пропускную способность системы и улучшает рабочие параметры насосов. Таким образом, форма кривых на рис. 3.9 и 3.10 одинакова при различных параметрах ГВУ.

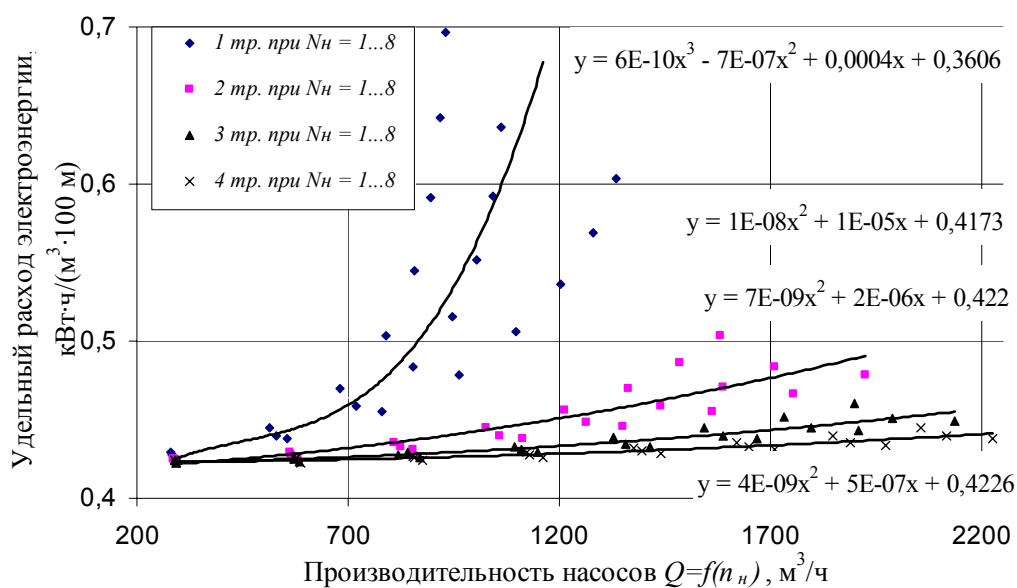


Рис. 3.10. Кривые зависимости удельного расхода электроэнергии для больших водопритоков от количества рабочих трубопроводов при $D_{mp} = 300/350$ мм

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 на 0,9 – 27,7 %, на 1,1 – 33,9 % или на 1,2 – 36,1 % соответственно в зависимости от количества работающих насосов (от 1 до 8).

Разница в снижении удельного расхода электроэнергии при использовании четырех трубопроводов по сравнению с тремя составляет от 0,1 – 3,4 %, поэтому увеличение количества трубопроводов до пяти и более может оказаться нецелесообразным (рис. 3.10).

3.3. Управление режимами работы водоотливной установки

Для управления режимами работы ГВУ угольной шахты разработан способ, схема которого приведена на рис. 3.11. Способ позволяет получить наиболее энергоэкономичный режим функционирования водоотлива с учетом фактических параметров его оборудования [37, 39].

В блоке 1 задания исходных данных и начальных условий осуществляется ввод необходимой информации для конкретных условий шахты. Это горизонт водоотлива, общий объем водосборника, количество и диаметр трубопроводных ставов, количество насосов, их номинальные параметры, а также ограничения относительно общего количества включений насосов.

В блоке 2 определения параметров ГВУ рассчитывается рабочий объем водосборника с учетом заиливания, а также определяются параметры напорной характеристики трубопроводной сети и характеристики насосов.

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

В блоке 4 уточнения рабочих параметров насосных установок определяются рабочие параметры насосов в зависимости от режима работы, 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.

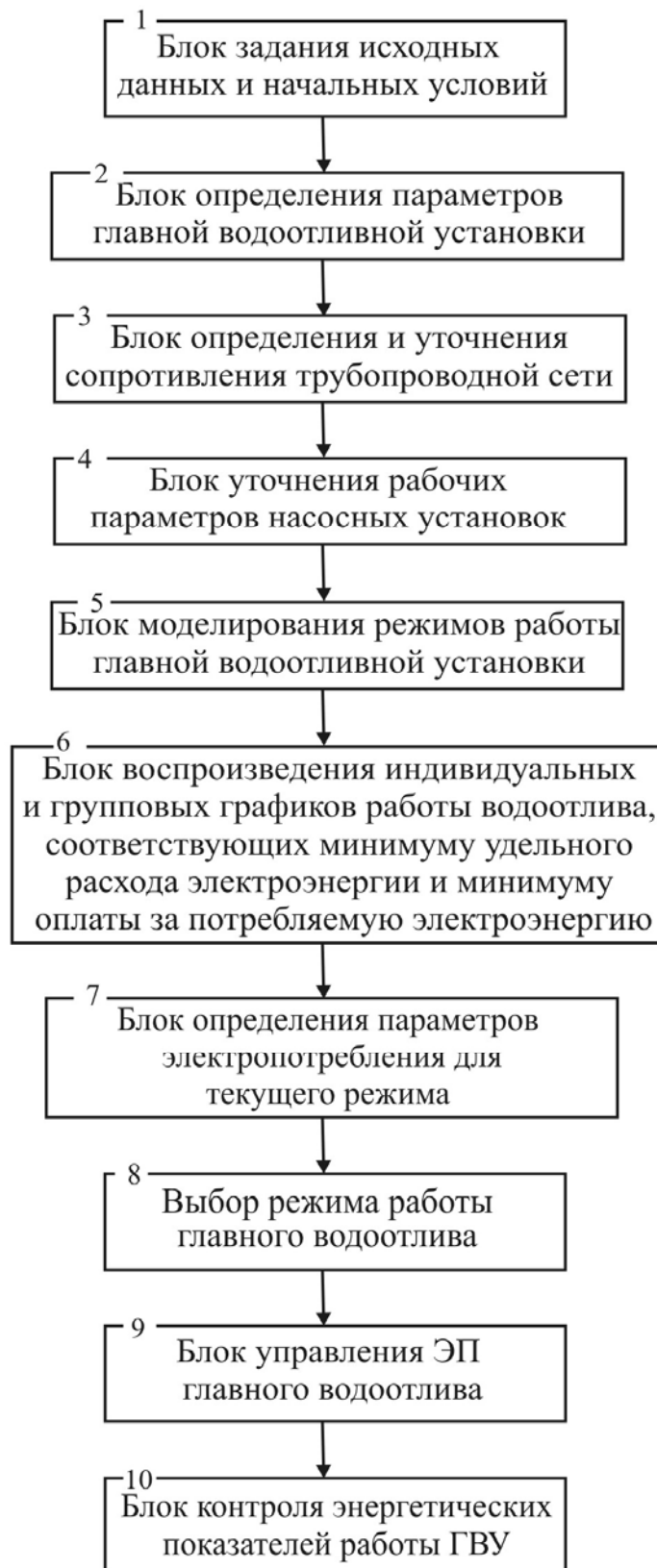


Рис. 3.11. Схема мониторинга параметров ГВУ угольной шахты

В блоке 6 воспроизведения индивидуальных и групповых графиков работы водоотлива, которые соответствуют минимальным значениям удельного расхода электроэнергии и оплаты за ее потре-

ние, выполняется перебор 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 определенный процент, величина которого может задаваться на усмотрение ответственного персонала (как правило это 1 %). 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 выбирается режим функционирования насосов из смоделированных графиков работы ГВУ в пределах заданного процентного ограничения от минимального значения величины удельного расхода электроэнергии (блок 6).

В блоке 9 управления электроприемниками главного водоотлива осуществляется реализация информации, полученной на выходе блока 8, которая направляется 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, сравнение его численного значения с предыдущим и анализ динамики изменений, что дает возможность сделать соответствующие выводы относительно причин, вызвавших эти изменения (см. п. 2.2). Выводы и решения относительно последующих действий принимает обслуживающий технический персонал.

Разработанный и приведенный в данном разделе алгоритм позволяет управлять работой главной водоотливной установкой посредством энергоэффективного регулирования режимов электропотребления насосных агрегатов. При этом энергоэффективность зависит от технических и технологических условий, выполнение которых может сопровождаться дополнительными затратами (см. раздел 1). Поэтому возникает необходимость в определении области эффективного РРЭ, а также условий, при которых такое регулирование реализуемо. Более детально этот вопрос рассмотрен в разделе 4.

4. ОБЛАСТИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЛАВНОГО ВОДООТЛИВА В РЕЖИМЕ ПОТРЕБИТЕЛЯ–РЕГУЛЯТОРА

4.1. Определение области повышения энергоэффективности

Техническое состояние трубопроводов, насосов и водосборников существенно влияет на их рабочие характеристики, что соответственно приводит к снижению эффективности или даже к невозможности выполнения РРЭ. Эффективность РРЭ можно оценить как техническими, так и экономическими показателями, а именно: удельным расходом и величиной оплаты за потребленную электроэнергию с учетом тарифных коэффициентов.

Уменьшение продолжительности процесса откачивания шахтной воды при РРЭ из-за отключения насосов в периоды максимальных нагрузок в энергосистеме способствует увеличению удельного расхода электроэнергии на суточном интервале.

Многочисленные изменения как технического, так и технологического состояния системы водоотлива и их взаимосвязь влечет к воздействию на энергоэффективность ее функционирования.

Анализ системы шахтного водоотлива как совокупности элементов и их взаимодействия дает возможность описания ее теорией множеств [30, 40]. При этом принято дискретное изменение параметров за счет применения соответствующих коэффициентов.

В процессе функционирования ГВУ множество ее элементов может находиться в различных состояниях. Например, множество состояний трубопровода A , элементами которого является различная степень зарастания внутреннего диаметра трубопроводной сети, можно записать так:

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

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

Подобное множество состояний B имеет и 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, 50, ..., j % соответственно, о.е.

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

$$K_{yв} \in C,$$

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

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 и максимальные величины которых соответствуют граничным параметрам объекта, позволяющим выполнять его функции при РРЭ.

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

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

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

$$A \cdot B = \{\langle K_{zm(i)}, K_{yn(j)} \rangle : K_{zm(i)} \in A, K_{yn(j)} \in B\}, \quad (4.4)$$

$$A \cdot C = \{\langle K_{zm(i)}, K_{yв(n)} \rangle : K_{zm(i)} \in A, K_{yв(n)} \in C\}, \quad (4.5)$$

$$B \cdot C = \{\langle K_{yn(j)}, K_{yв(n)} \rangle : K_{yn(j)} \in A, K_{yв(n)} \in C\}, \quad (4.6)$$

т.е. любой элемент $(K_{zm(i)}, K_{yn(j)}, K_{yv(n)})$ каждого из подмножеств $(A, B$ и $C)$ может взаимодействовать с элементами другого множества. Например, при зарастании трубопровода на 10 % показатель ухудшения технического состояния насосов может соответствовать как 0, так и 50 %. Также рассматривается и изменение объема водосборника, величина которого может взаимодействовать с параметрами других элементов. Таким образом, с учетом уравнений (4.1) – (4.3) выражения (4.4) – (4.6) примут следующий вид:

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

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

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

Полученные уравнения (4.7) – (4.9) можно реализовать с помощью разработанного и описанного в разделе 2 алгоритма, что позволит определить эффективность работы ГВУ при взаимодействии ее элементов с учетом их технического и технологического 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 рассмотрены зависимости изменения удельного расхода электроэнергии w_0 и стоимости (оплаты) электроэнергии C_w , потребляемой на суточном интервале времени, от степени уменьшения внутреннего диаметра трубопровода в результате его зарастания K_{zm} для различного технического состояния насосов K_{yn} на шахтах с притоком воды 100 м³/ч.

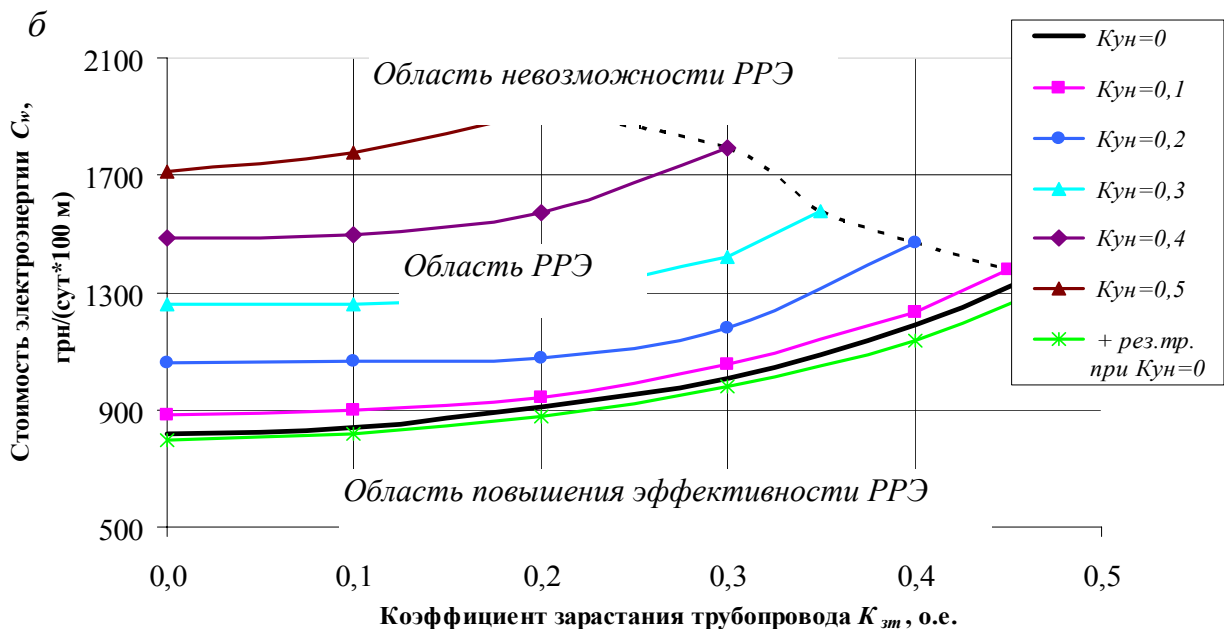
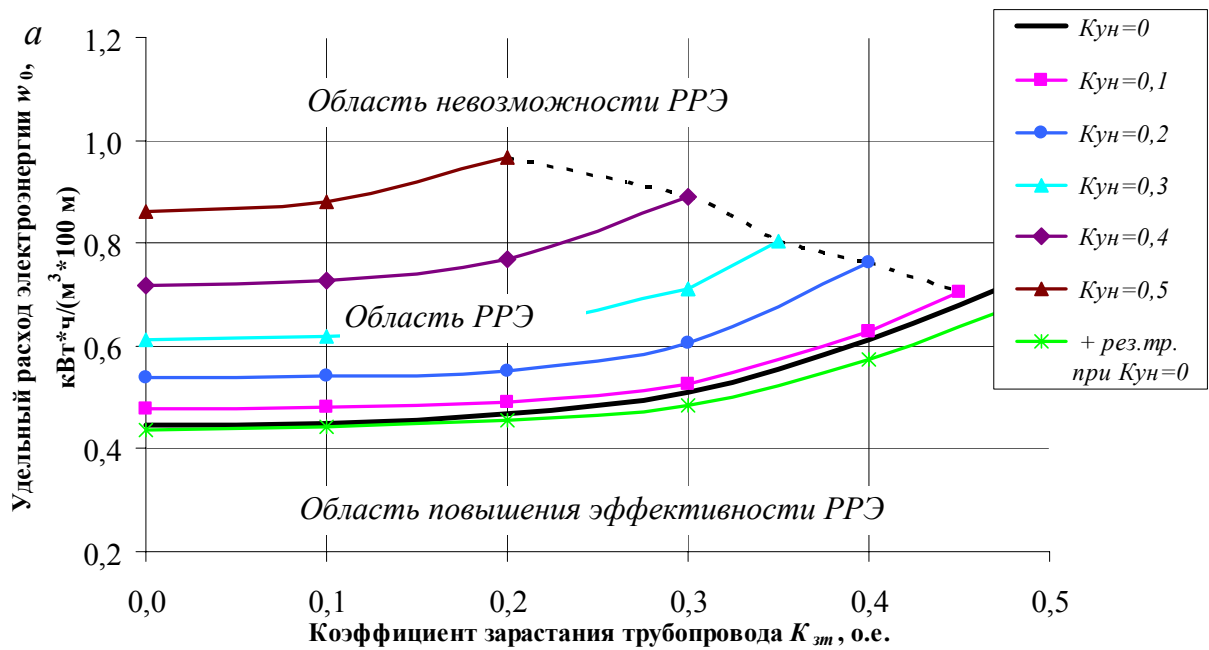


Рис. 4.1. Кривые, характеризующие области применения РРЭ на шахтах с притоком воды $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ при изменении параметров трубопроводов и насосов: *а* – технический и *б* – экономический показатели

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

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 степени зарастания трубопроводов от 0 до 50 % ($K_{зм} = 0 \dots 0,5$) для насосов, техническое состояние которых ухудшилось от 0 до 50 % ($K_{ун} = 0 \dots 0,5$).

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

Повысить эффективность работы ГВУ в результате применения РРЭ можно путем восстановления рабочих параметров оборудования и использования резервного трубопровода для откачивания воды (рис. 4.1, кривая "+ рез. тр. при $K_{ун} = 0$ "). 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) соответственно) до 7 % (на 0,05 кВт·ч/(м³·100 м) и 68 грн/(сут·100 м) соответственно) в зависимости от технического состояния трубопроводной сети.

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

Рассмотрим представленные на рис. 4.2 графики изменения удельного расхода электроэнергии w_0 и стоимости (оплаты) электроэнергии C_w , потребляемой на суточном интервале времени, от степени уменьшения внутреннего диаметра трубопровода в результате зарастания $K_{зм}$ для различного технического состояния насосов $K_{ун}$ на шахтах с водопритоком 600 м³/ч, если принять насосы типа ЦНС-300, трубопроводы диаметром 273 мм (два рабочих и один резервный).

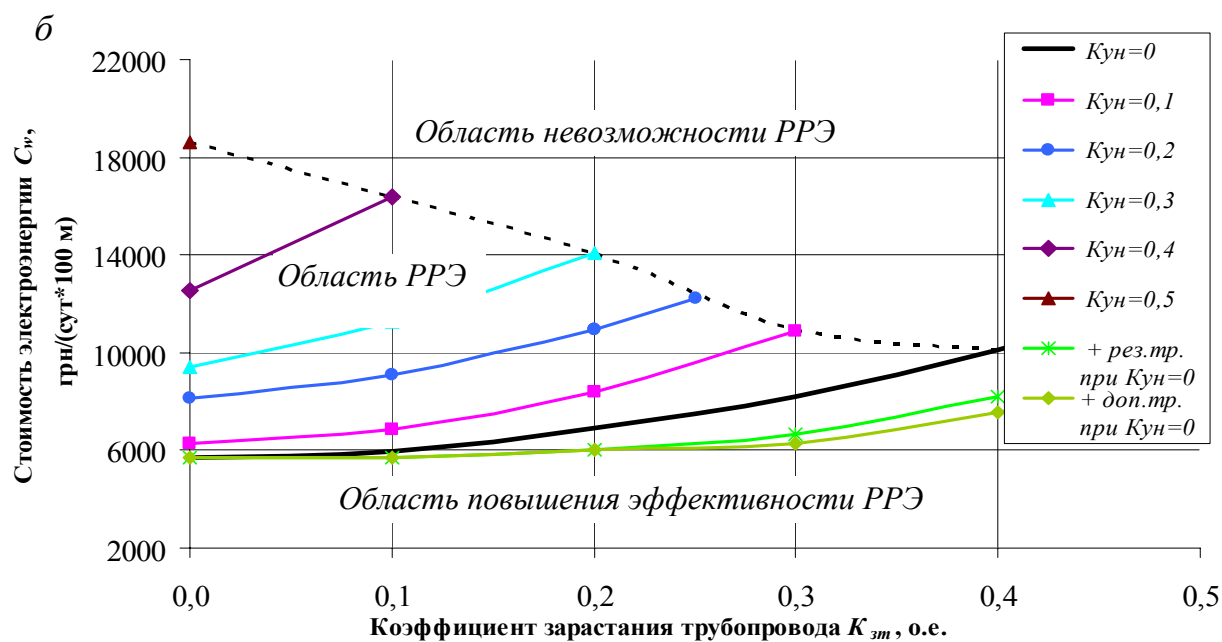
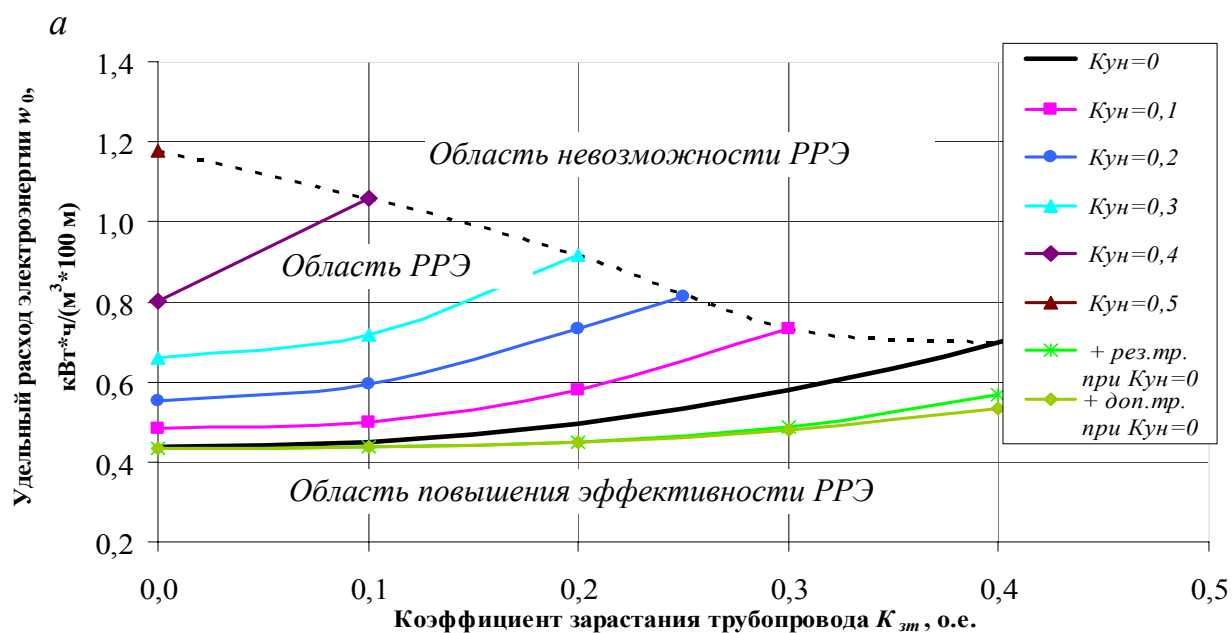


Рис. 4.2. Кривые, характеризующие области применения РРЭ на шахтах с притоком воды $600 \text{ м}^3/\text{ч}$ при изменении параметров трубопроводов и насосов: *а* – технический и *б* – экономический показатели

На рис. 4.2, *а* представлено восемь зависимостей, шесть из которых характеризуют область применения 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 " $K_{ун} = 0$ ") приводит к увеличению удельного расхо-

да электроэнергии (рис. 4.2, б) до 98 % (на 0,43 кВт·ч/(м³·100 м)) и суточной оплаты за нее на 120 % (на 6800 грн/(сут·100 м)). 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 технического состояния насосов и трубопроводной сети приводит к невозможности РРЭ.

Повысить эффективность применения РРЭ шахтного водоотлива возможно за счет восстановления рабочих параметров насосов и трубопроводов и использования в процессе откачивания воды резервного трубопровода. Это позволит снизить удельный расход электроэнергии на 1,5 – 23 % (до 0,16 кВт·ч/(м³·100 м)) и оплату за нее до 1930 грн/(сут·100 м) соответственно 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 РРЭ еще на 5 – 7 %, однако целесообразность данного мероприятия (для водопритоков 600 м³/ч) должна определяться дополнительным технико-экономическим обоснованием.

Зависимости, представленные на рис. 4.3, а, характеризуют области применения РРЭ главного водоотлива шахт с водопритоками 1200 м³/ч при использовании насосов типа ЦНС-300 и напорных трубопроводов диаметром 350 мм (два рабочих и один резервный). Пять кривых из семи определяют эффективность применения РРЭ в зависимости от технического состояния основного оборудования, задействованного в процессе откачивания воды.

Эффективность применения РРЭ при работе насосов с максимальным КПД (кривая, соответствующая " $K_{yn} = 0$ ") снижается с повышением 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 " $K_{yn} = 0,4$ "), возможно лишь при отсутствии обрастания внутренних стенок трубопроводов. При этом эффективность регулирования будет снижена вдвое, т.е. оплата за электроэнергию увеличится на 14100 грн/(сут·100 м). Дальнейшее ухудшение пара-

метров технического состояния насосов и трубопроводной сети приводит к невозможности РРЭ.

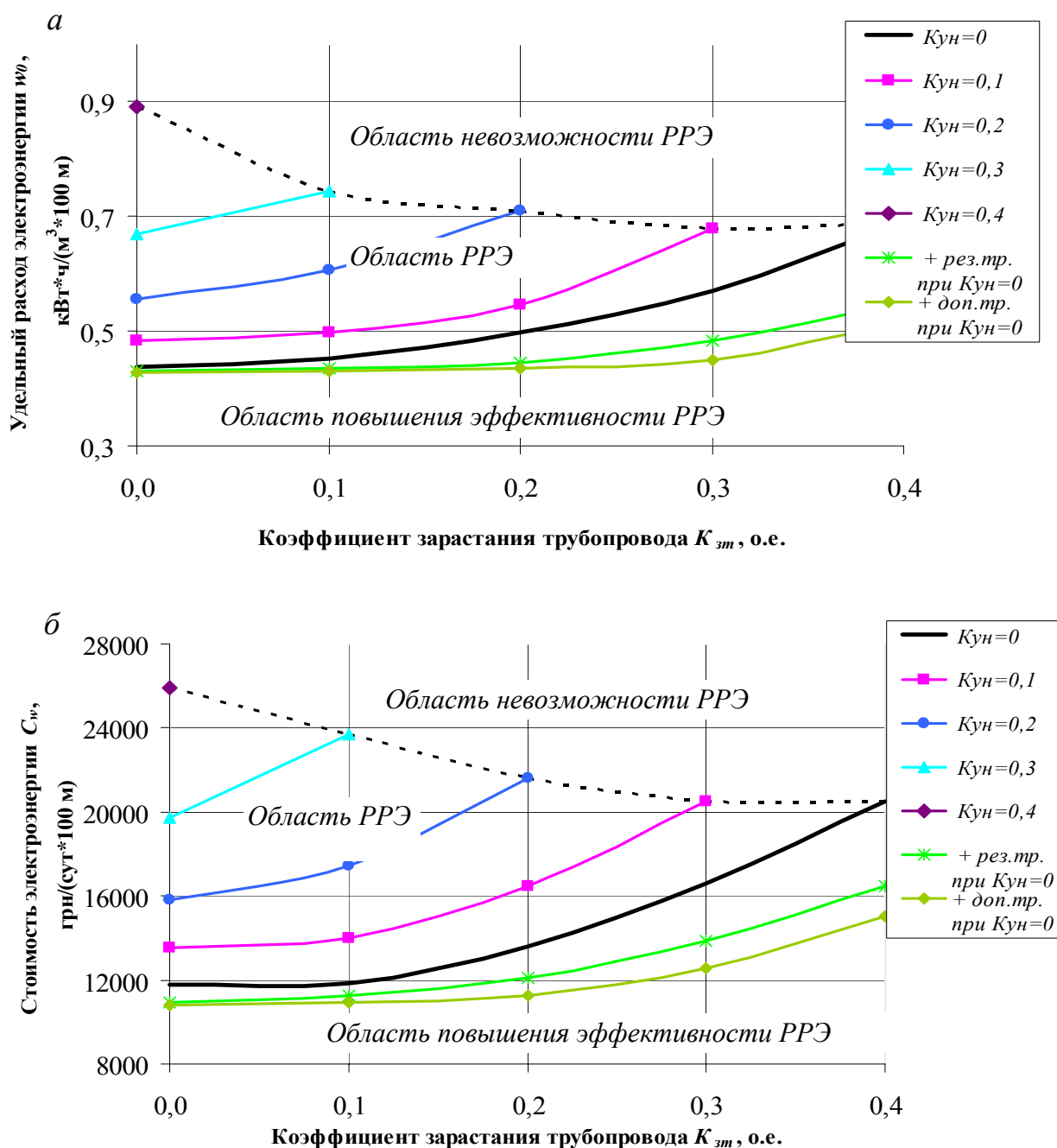


Рис. 4.3. Кривые, характеризующие области применения РРЭ на шахтах с притоком воды $1200 \text{ м}^3/\text{ч}$ при изменении параметров трубопроводов и насосов: *а* – технический и *б* – экономический показатели

Восстановление рабочих параметров насосов и трубопроводов и использование в процессе откачивания воды резервного трубопровода способствует повышению эффективности применения РРЭ главно-

го водоотлива. Данное решение позволит снизить удельный расход электроэнергии и ее оплату до 2 – 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 РРЭ еще до 10 %. При этом целесообразность данного мероприятия (для водопритоков 1200 м³/ч) должна подтверждаться дополнительным технико-экономическим обоснованием.

Анализируя вышеприведенный материал, можно сделать вывод, что ухудшение технического состояния насосов и трубопроводной сети на величину до 50 % приводит к снижению эффективности применения РРЭ в 2 – 3 раза как по экономическому, так и техническому критериям.

Эффективность использования резервного трубопровода в процессе регулирования очевидна и в зависимости от водопритока и технического состояния оборудования способствует снижению удельного расхода до электроэнергии 10 % и экономических показателей работы водоотлива до 25 %.

Установка еще одного трубопровода позволит дополнительно снизить технические и экономические показатели работы водоотлива до 10 %, однако целесообразность данного мероприятия должна подтверждаться расчетами.

Энергоэффективность функционирования ГВУ в режиме П–Р зависит от ряда технических и технологических условий и состояний ее работы, поэтому она является функцией нескольких переменных, взаимодействие которых влияет как на энергетические, так и на стоимостные показатели работы водоотлива в целом. Следовательно, энергоэффективность определяется двумя критериями – удельным расходом электроэнергии и оплатой 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 (см. рис. 4.4).

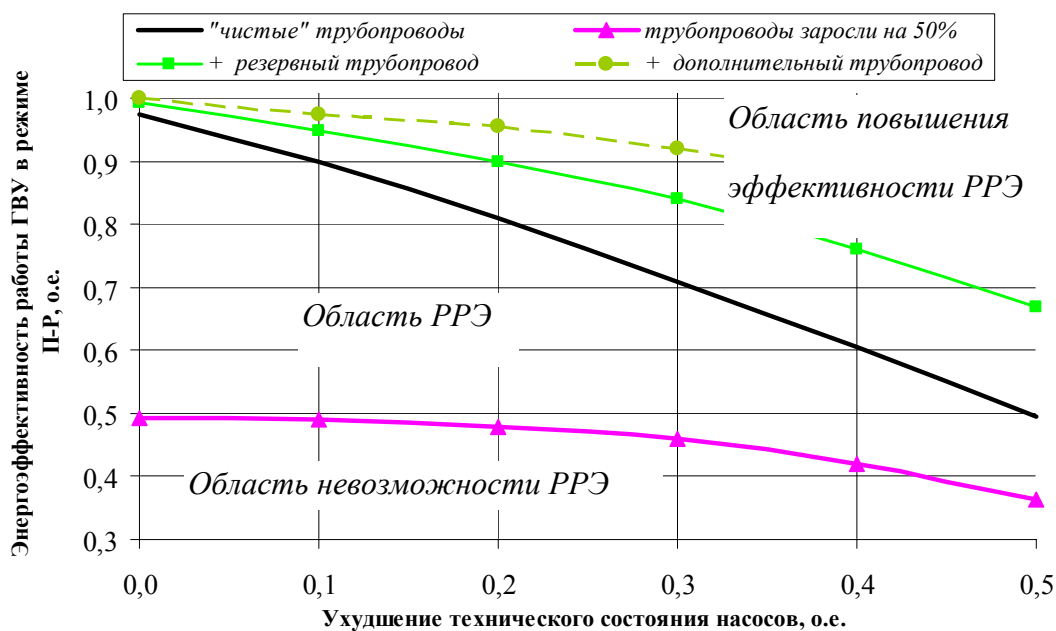


Рис. 4.4. Область энергоэффективной работы ГВУ в режиме П–Р при изменении технического состояния насосов и трубопроводов

Приведенные на рис. 4.4 зависимости определяют энергоэффективность функционирования главного водоотлива при разном применении 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 водопритоках) 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 соответствующему снижению ее величины (в два раза при использовании в работе чистых рабочих трубопроводов).

Обрастание 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 величину энергоэффективности до 15 %.

4.2. Влияние рабочего объема водосборника на технико-экономические показатели работы главного водоотлива

Возможность и эффективность применения РРЭ главного водоотлива зависит также и от объема водосборника, который должен быть достаточным для ограничения работы насосов в часы максимальных нагрузок в энергосистеме (раздел 1). Однако на практике данное условие не всегда является выполнимым.

Поскольку при эксплуатации шахтного водоотлива присутствует естественный процесс заиления и, соответственно, чистки водосборника, то 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 – очевидна. Однако водосборник состоит как минимум из двух ветвей, и при необходимости вывода одной из них в чистку в работе остается только одна ветвь, объема которой может быть недостаточно для полноценного использования РРЭ. При наличии разных по объему ветвей выведение в чистку большей ветви может привести к невозможности выполнения РРЭ.

Чистка одной из ветвей водосборника – это длительный процесс, который приводит к уменьшению рабочего объема водосборника на этот период, что естественно не может не отразиться на эффективности применения РРЭ.

Причины уменьшения рабочего объема водосборника могут быть различными, основными из которых являются выведение одной из ветвей 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, а другая (если водосборник состоит из двух ветвей) оставаться 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 одинаковость 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 ветви уменьшает ее рабочий объем на эту же величину.

При разных объемах ветвей водосборника возможно два варианта выведения заиленных ветвей в чистку, т.е. меньшей либо большей

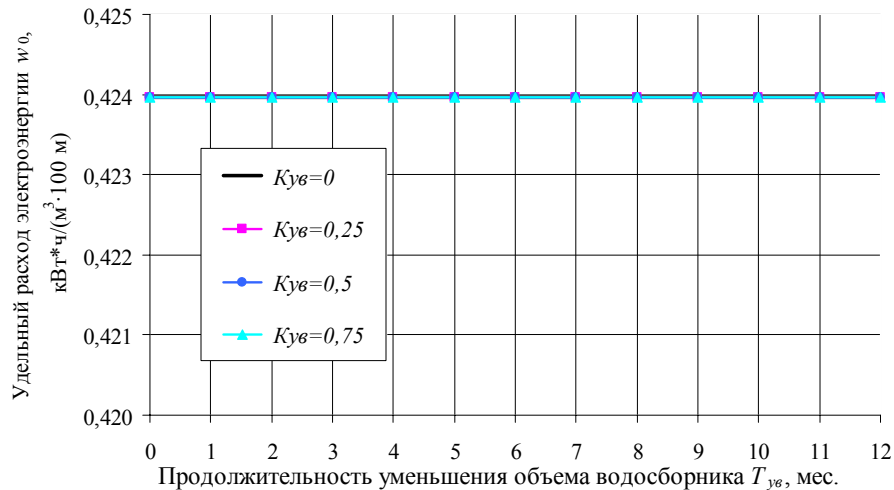
по вместимости ветви. Уменьшение объема водосборника с небольшой разницей объемов ветвей при выведении меньшей из них в чистку может отразиться лишь на эффективности применения РРЭ. При этом выведение большей по объему ветви в чистку может привести к невозможности выполнения РРЭ. Наличие трех и более ветвей водосборника снижает дефицит рабочего объема на период чистки одной из ветвей.

Эффективность применения РРЭ или даже возможность его применения в таких случаях напрямую зависит от продолжительности уменьшения рабочего объема водосборника. Процесс чистки одной из ветвей водосборника является трудоемким и продолжительным (до нескольких месяцев) в зависимости от объема работы. Это приводит к тому, что на момент окончания чистки одной из ветвей водосборника появляется необходимость в выведении в чистку другой, при этом большую часть времени в году рабочий объем водосборника соответствует объему одной ветви (при водосборнике, состоящем из двух ветвей) и т.п.

На рис. 4.5 – 4.7 изображены графики 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 продолжительности такого ограничения. Рассмотрено по четыре зависимости, соответствующих уровню рабочего объема водосборника, т.е. при отсутствии заиливания и эксплуатации всего водосборника (прямая " $K_{ув} = 0$ "), а также при уменьшении рабочего объема водосборника на 25, 50 и 75 %, что соответствует прямым " $K_{ув} = 0,25$ ", " $K_{ув} = 0,5$ " и " $K_{ув} = 0,75$ ".

Уменьшение рабочего объема водосборника на шахтах с притоком воды 100 м³/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 интенсивной работе насосов отсутствует. А поскольку приток воды малый, то в работе участвует минимальное количество имеющихся насосов и, соответственно, удельный расход электроэнергии не изменяется.

а



б

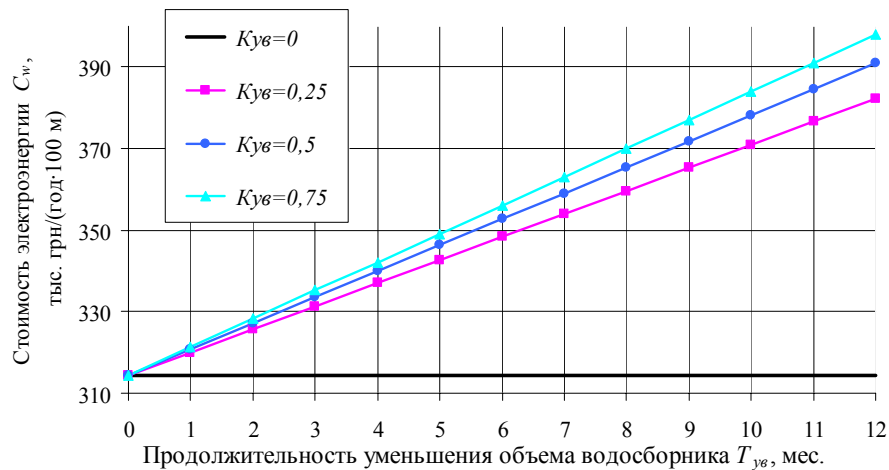


Рис. 4.5. Графики зависимости удельных технических (а) и экономических (б) показателей работы ГВУ от рабочего объема водосборника с притоком воды на шахтах 100 м³/ч

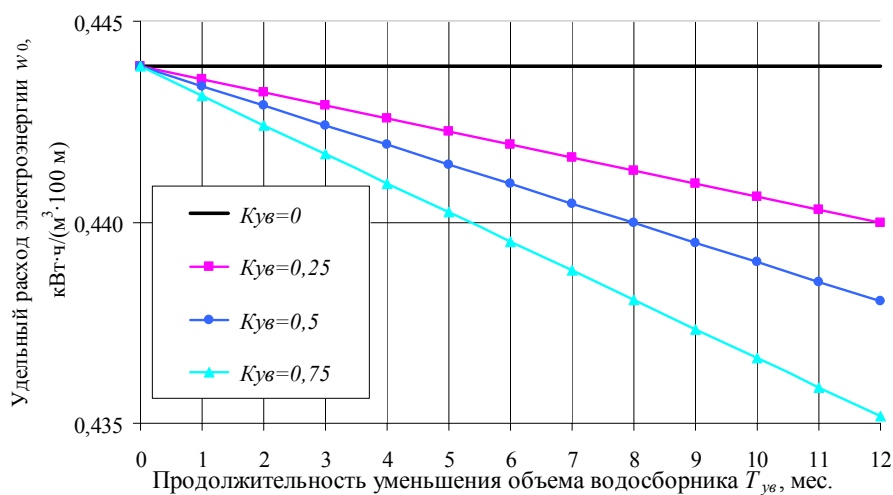
При уменьшении рабочего объема водосборника эффективность применения РРЭ снижается, что, естественно, отражается на экономических показателях работы ГВУ (рис. 4.5, б). С увеличением объема, не участвующего в процессе накопления воды, увеличивается и оплата (стоимость) за потребляемую электроэнергию, поскольку повышается уровень необходимости работы насосов независимо от характера нагрузок в энергосистеме. Так, например, уменьшение рабочего объема водосборника на 25, 50 и 75 % в течение месяца приводит к повышению стоимости электроэнергии на 1,8; 2,0 и 2,2 % соответственно, что эквивалентно 5665, 6390 и 6960 грн/(год*100 м). Продление ограничения рабочего объема водосборника до шести месяцев

приведет к повышению 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 величин, 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 и повышению оплаты за нее.

а



б

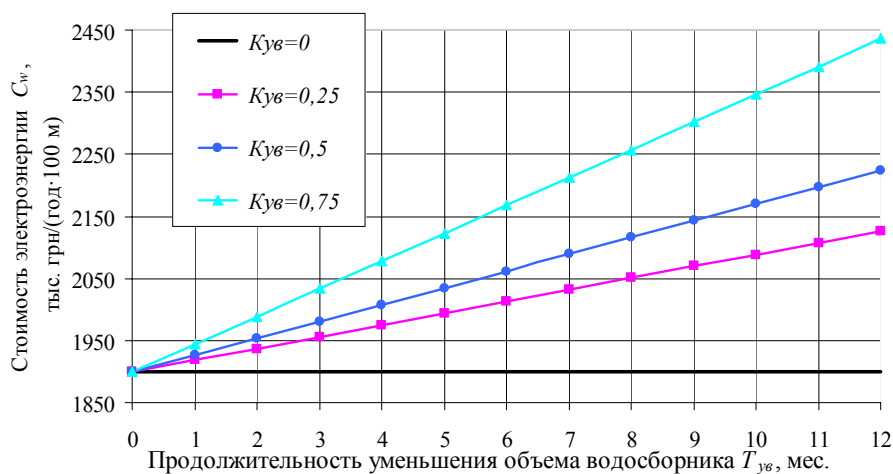


Рис. 4.6. Графики зависимости удельных технических (а) и экономических (б) показателей работы ГВУ от рабочего объема водосборника с притоком воды на шахтах 600 м³/ч

Ограничение рабочего объема водосборника сопровождается снижением эффективности применения РРЭ, что связано с необходимостью дополнительного использования резервных насосов, а это в свою очередь приводит к увеличению расхода электроэнергии и соответственно оплаты за ее использование (рис. 4.6, б).

Для шахт с притоком воды $600 \text{ м}^3/\text{ч}$ уменьшение рабочего объема водосборника на 25, 50 и 75 % в течение месяца приводит к снижению удельного расхода электроэнергии на 0,07; 0,11 и 0,16 % и возрастанию 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).

Продление ограничения рабочего объема водосборника до шести месяцев приведет к снижению удельного расхода электроэнергии на 0,44; 0,66 и 0,99 % и 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).

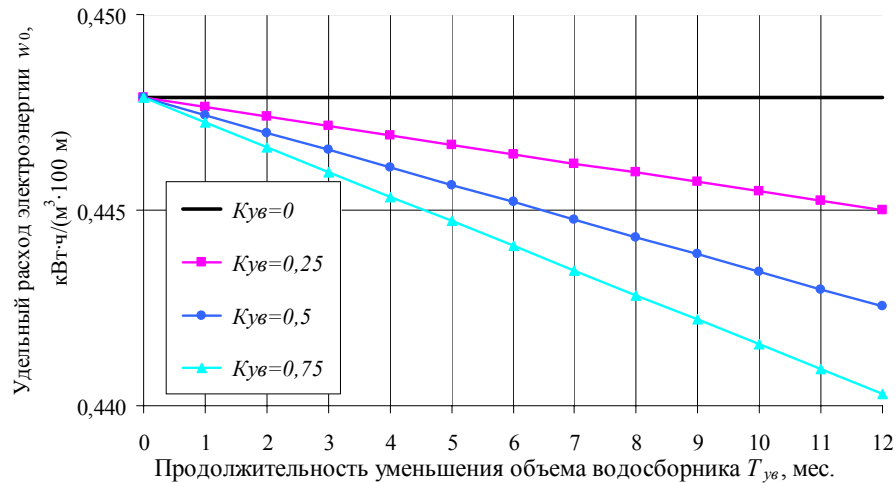
Следовательно, снижение эффективности применения РРЭ приводит к ожидаемому росту оплаты за электроэнергию, однако способствует уменьшению объема ее расхода.

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 ее стоимость на 0,5; 1,2 и 2,4 % соответственно, что эквивалентно росту на 19,747; 45,92 и 89,28 тыс. грн/(год·100 м). Несвоевременное восстановление рабочих параметров водосборника и продление ограничения его рабочего объема до шести месяцев приведет к снижению удельного расхода электроэнергии на 0,32; 0,6 и 0,85 % и повышению 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).

Из приведенных выше графиков (рис. 4.5 – 4.7) следует, что независимо от водопритока ограничение рабочего объема водосборника до 75 % в течение года приводит к увеличению оплаты за потребляемую электроэнергию до 28 %.

Изменение удельного расхода электроэнергии в результате применения РРЭ прямо пропорционально изменению объема водосборника, т.е. уменьшение объема водосборника приводит к снижению удельного расхода электроэнергии.

а



б

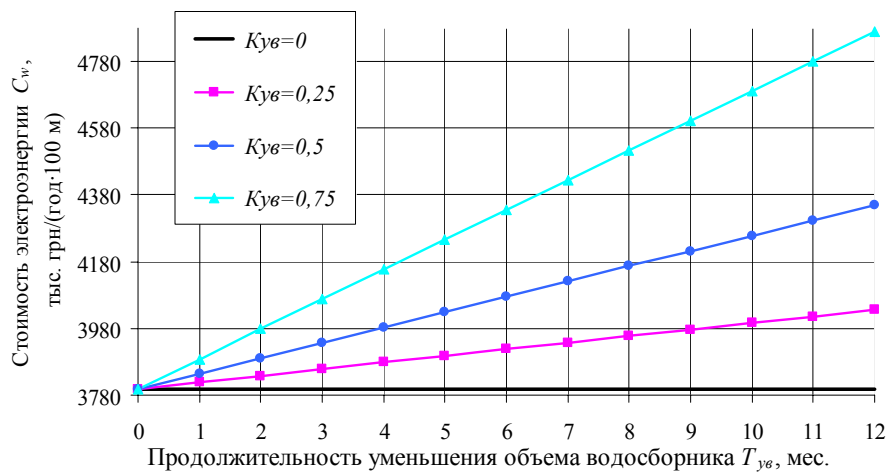


Рис. 4.7. Графики зависимости удельных технических (а) и экономических (б) показателей работы ГВУ от рабочего объема водосборника с притоком воды на шахтах $1200 \text{ м}^3/\text{ч}$

4.3. Определение границ энергоэффективного использования главного водоотлива

Работа насосов ГВУ в режиме П–Р приводит к снижению 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. Поскольку угольные шахты Украины имеют различную степень водообильности пластов, то величина водопритока изменяется и составляет, как правило,

50 – 1300 м³/ч. От величины водопритока зависит количество рабочих насосов ГВУ и, соответственно, эффективность применения РРЭ. 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 времени на шахтах с малым притоком воды от 50 до 300 м³/ч. На главном водоотливе с данными характеристиками предусматриваются один рабочий и один резервный напорный трубопроводы ($D_{mp} = 200-250$ мм²). Применение РРЭ приводит к увеличению количества работающих насосов на рабочий трубопровод и сопровождается, как правило, увеличением расхода электроэнергии (рис. 4.8). Применение дополнительно резервного трубопровода при РРЭ может привести к повышению энергоэффективности использования ГВУ в режиме П–Р (рис. 4.9).

При малом водопритоке (до 300 м³/ч) и использовании насосов с номинальной подачей не менее 180 м³/ч удельный расход электроэнергии на откачивание воды для суточного интервала времени не зависит от величины притока воды. Это характерно для случая, когда РРЭ не выполняется, а режим работы насосов зависит (отстраивается) от уровня воды в водосборнике.

Работа насосов ГВУ шахты с водопритоком до 100 м³/ч включительно при выполнении РРЭ не приводит к увеличению удельного расхода электроэнергии на откачивание воды для суточного интервала времени независимо от режима использования резервного трубопровода (рис. 4.8 а, 4.9 а). Однако такой режим работы снижает затраты на оплату потребленной водоотливом электроэнергии до 30 % (до 4000 грн/сутки при тарифе 1,24 грн/кВт·ч, см. рис. 4.8 б, 4.9 б). Использование резервного трубопровода при применении РРЭ позволит не увеличивать удельный расход электроэнергии при водопритоке до 200 м³/ч включительно и до 300 м³/ч включительно для шахт с горизонтом водоотлива до 100 м (рис. 4.9 а).

Применение РРЭ водоотлива на шахтах с водопритоком до 300 м³/ч приведет к ожидаемому снижению оплаты за потребляемую электроэнергию до 30 % (до 7000 грн/сут при действующем тарифе) и к увеличению расхода электроэнергии до 6 % (рис. 4.8). Общее электропотребление при этом возрастет на величину до 1800 кВт·ч/сут. Однако дополнительное использование резервного трубопровода позволит снизить удельный расход электроэнергии на 1 %, что принесет

прибыль до 9000 грн/сут, а также снизит общий расход электроэнергии до 150 кВт·ч в сутки (рис. 4.9).

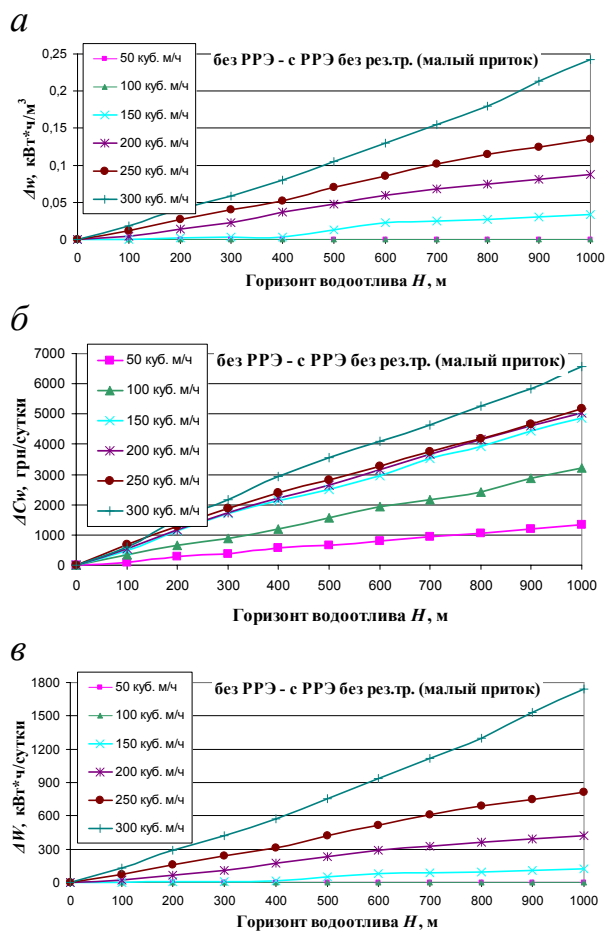


Рис. 4.8. Графики изменения удельного расхода (а), величины оплаты (б) и суточного расхода электроэнергии (в) при применении РРЭ без использования резервного трубопровода (при малых водопритоках)

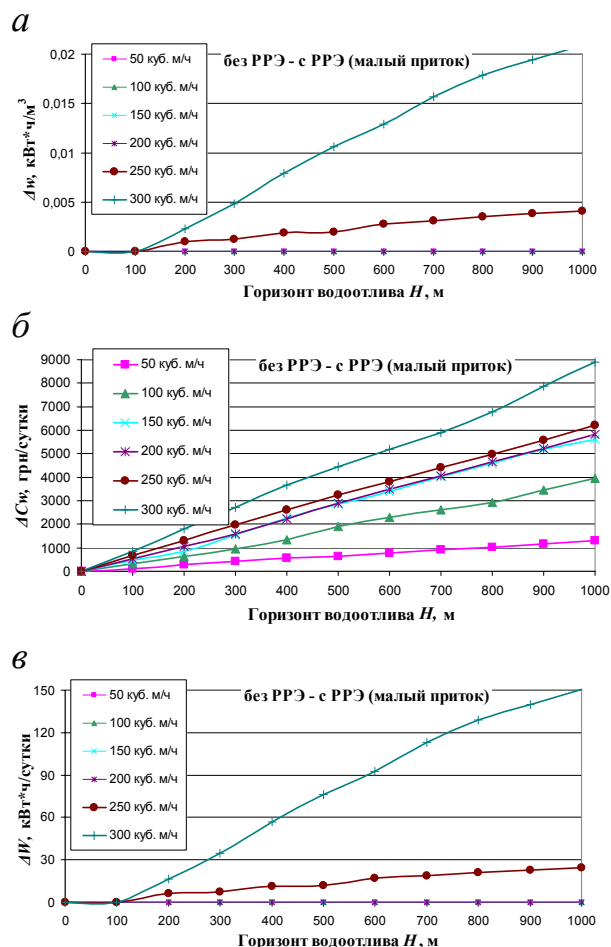


Рис. 4.9. Графики изменения удельного расхода (а), величины оплаты (б) и суточного расхода электроэнергии (в) при применении РРЭ с использованием резервного трубопровода (при малых водопритоках)

Следовательно, целесообразность применения РРЭ главного водоотлива на шахтах с притоком воды до 300 м³/ч очевидна, поскольку увеличение удельного расхода электроэнергии для суточного интервала времени в результате интенсивной работы насосов не превышает 1 %, если использовать в данном процессе резервный трубопровод, в то время как оплата за потребляемую водоотливом электроэнергию снижается до 30 %.

Рассмотрим энергоэкономические показатели работы водоотлива в режиме П–Р для суточного интервала времени на шахтах с притоком воды 300 – 1300 м³/ч. На главном водоотливе с данными характеристиками предусматривается, как правило, два рабочих трубопровода и один резервный ($D_{тр} = 300 – 350 \text{ мм}^2$), использование которого при РРЭ отражается на технических и экономических показателях работы установки (рис. 4.10 – 4.11).

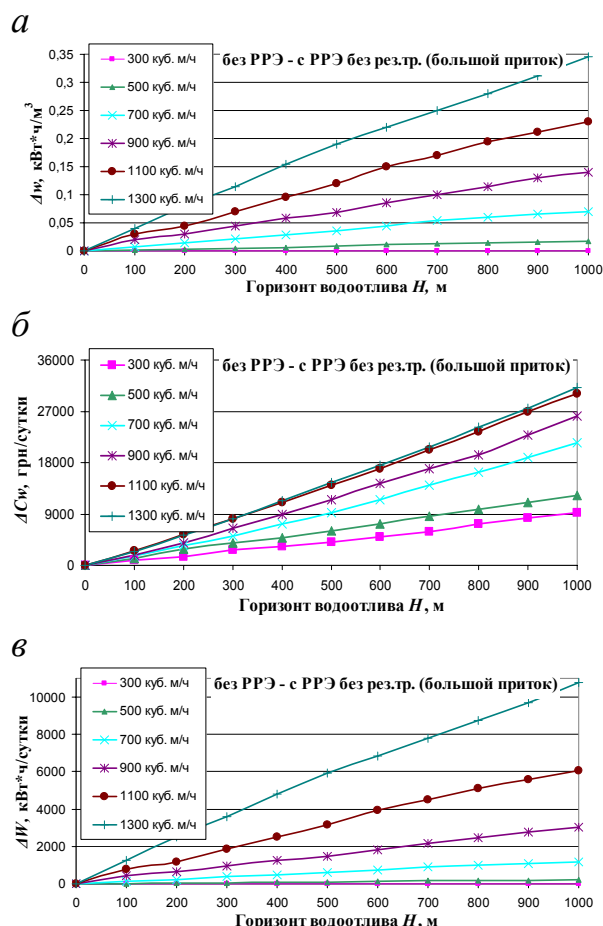


Рис. 4.10. Графики изменения удельного расхода (а), величины оплаты (б) и суточного расхода электроэнергии (в) при применении РРЭ без использования резервного трубопровода (при больших водопритоках)

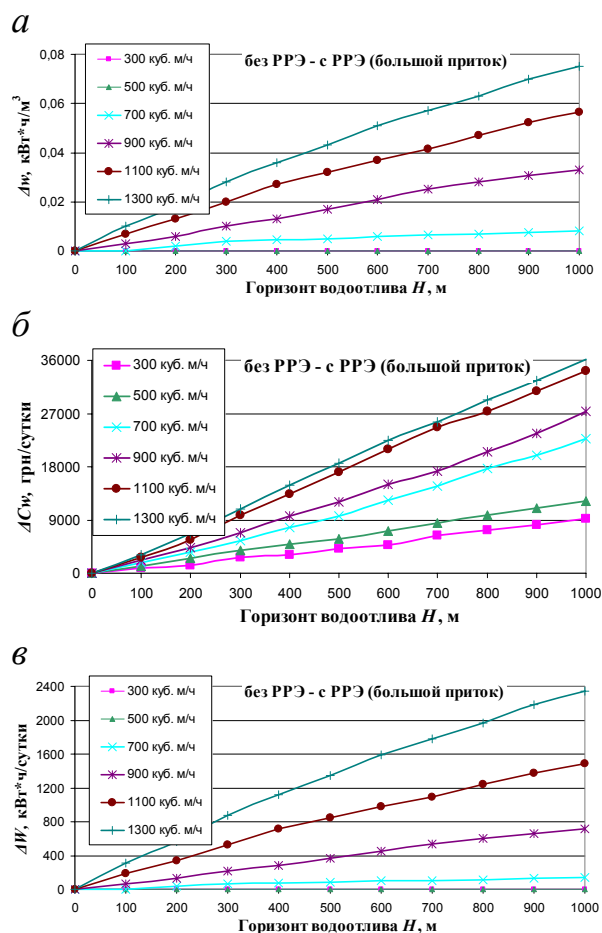


Рис. 4.11. Графики изменения удельного расхода (а), величины оплаты (б) и суточного расхода электроэнергии (в) при применении РРЭ с использованием резервного трубопровода (при больших водопритоках)

При водопитоке 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 откачивание воды для суточного интервала времени не зависит от величины притока воды, если регулирование режима электропотребления не выполняется, а режим работы насосов зависит (отстраивается) от уровня воды в водосборнике.

При водопитоках до 500 и $700 \text{ м}^3/\text{ч}$ включительно для шахт с горизонтом водоотлива до 100 м использование резервного трубопровода для целей РРЭ приведет к отсутствию увеличения расхода электроэнергии (рис. 4.11, а).

Применение РРЭ водоотлива шахт с водопитоком свыше $300 \text{ м}^3/\text{ч}$ приведет к 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 за сутки (рис. 4.10).

Использование дополнительно резервного трубопровода дает возможность снизить удельный расход электроэнергии до 2% , к тому же при этом показатель возрастания общего электропотребления снизится до 2300 кВт·ч/сут и ожидаемая прибыль достигнет величины 36000 грн/сут (рис. 4.11).

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

5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГЛАВНОГО ВОДООТЛИВА

5.1. Достоверность результатов моделирования режимов работы главного водоотлива

Для получения точных результатов исследования задействован метод машинного эксперимента с применением разработанной имитационной модели. Для этого были использованы некоторые фактические данные ГВУ шахты "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 м.

Таблица 5.1

Фактические данные ГВУ шахты "Благодатная"

Тип 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

Величины КПД насоса и удельного расхода электроэнергии на откачивание воды определяются расчетным путем с использованием фактических параметров его работы.

Зависимость для определения потребляемой мощности насосом с использованием его фактических параметров следующая:

$$P_n = \frac{\rho Q_{ф} H_{ф}}{102 \cdot 3600 \eta_n \eta_d \eta_c}, \text{ кВт},$$

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_∂ – 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, то получим

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

Такой формулой удобно пользоваться, зная сколько электроэнергии расходуется насосом за час работы 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:

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

Если фактический напор неизвестен (его сложно точно замерить), то можно определить его расчетным путем по формуле

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

где H_z – геодезическая высота подъема воды, м;

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

h_{mp} – потери напора в нагнетательном трубопроводе, определяются как

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

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

$L = 425$ м – длина трубопровода;

Q_ϕ – объем воды, протекающей по трубопроводу, м³/с;
 $d = 0,249$ м – диаметр нагнетательного трубопровода.

Рассчитаем параметры для насоса №1 главного водоотлива гор. 210 м:

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

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

Аналогично определяем те же параметры для других насосов, полученные результаты сводим в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Фактические значения энергетических параметров насосов

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
ЦНС-300/300	210	350	224,5	392,8	62,2	1,12
ЦНСШ-300/290	210	390	227,0	378,7	72,8	0,97
ЦНС-300/300	210	360	225,1	392,8	64,2	1,09
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 откачивание 1 м³ воды. Он определяется так (см. табл. 5.2):

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

В табл. 5.3 приведены результаты сравнения фактических значений (или расчетных) параметров насосов с аналогичными величинами, полученными с помощью разработанного алгоритма имитационного моделирования режимов работы ГВУ.

Анализ основных технологических параметров работы насосов позволяет утверждать о достоверности результатов, полученных

с помощью имитационной модели. Погрешность моделирования не превышает 8,2 % по сравнению со значением фактической подачи, замеренным с помощью расходомера, или 1,7 % по сравнению с напором, рассчитанным согласно аналитическим зависимостям.

Таблица 5.3

Сравнение фактических и номинальных (расчетных) значений параметров насосов

Тип насоса	Подача, м ³ /ч			Напор, м			Мощность насоса, кВт		
	Фактическая	Согласно модели	Погрешность, %	Расчетный	Согласно модели	Погрешность, %	Потребляемая	Согласно модели	Изменение, %
ЦНС-300/300	350	333,2	4,8	224,5	222,9	0,7	392,8	321,1	18,2
ЦНСШ-300/290	390	358,1	8,2	227,0	223,2	1,7	378,7	334,5	11,6
ЦНС-300/300	360	333,2	7,4	225,1	222,9	1,0	392,8	321,1	18,2
ЦНСШ-300/290	390	358,1	8,2	227,0	223,2	1,7	369,0	334,5	9,3

Продолжение табл. 5.3

Тип насоса	КПД насоса, %			Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/м ³		
	Фактический	Номинальный, не менее	Снижение, %	Расчетный	Согласно модели	Увеличение, %
ЦНС-300/300	62,2	70	7,8	1,12	0,96	16,3
ЦНСШ-300/290	72,8	75	2,2	0,97	0,93	4,3
ЦНС-300/300	64,2	70	5,8	1,09	0,96	13,2
ЦНСШ-300/290	74,7	75	0,3	0,95	0,93	2,1

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

5.2. Экономическая оценка результатов исследований энергоэффективности работы главной водоотливной установки

Экономическая оценка рассмотренных в работе мероприятий, направленных на повышение энергоэффективности работы главного

водоотлива, выполнена на конкретных примерах в условиях ПАО "ДТЭК Павлоградуголь":

- ГВУ № 1 (шахта "Благодатная"). Горизонт водоотлива 210 м, максимальный приток воды $350 \text{ м}^3/\text{ч}$, водосборник из двух ветвей объемом 900 и 640 м^3 , четыре насоса ЦНС 300-300 (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 $1200 \text{ м}^3/\text{ч}$, водосборник из двух ветвей объемом 2000 и 950 м^3 , 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).

Снижение оплаты за электроэнергию при функционировании ГВУ выполнено с учетом фактических технических и технологических условий работы водоотлива, когда используются минимальные принципы применения РРЭ, т.е. режим работы насосов в пиковый период зависит от текущего состояния водосборника.

С помощью разработанного и описанного в п. 2.2 алгоритма смоделируем режимы работы ГВУ № 1 с учетом действующих условий и исходных данных:

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

- 2) работа ГВУ с существующим объемом водосборника при условии выведения ветви с меньшей вместимостью (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 большей вместимостью (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 существующим объемом водосборника $900 + 640 = 1540 \text{ м}^3$ и заилением 10 %, т.е. рабочий объем составляет $1540 \text{ м}^3 - 10 \% = 1386 \text{ м}^3$;

- 5) работа ГВУ с объемом водосборника, рассчитанным в соответствии с описанным в п. 1.2 способом, т.е. водосборник состоит из двух равных по вместимости ветвей с удельным объемом каждой $4,6 \text{ м}^3/(\text{м}^3/\text{ч})$ и заилением 10 %, а его суммарная вместимость составляет $2 \times 4,6 \times Q_{\max} = 2 \times 1610 = 3220 \text{ м}^3 - 10 \% = 2898 \text{ м}^3$ с одним рабочим трубопроводом;

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

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

Вариант	Удельный расход электроэнергии w_0 , кВт·ч/м ³ (на Н=210 м)	Расход электроэнергии по зонам суток $W_{\text{зон}}$, кВт·ч			Оплата за потребляемую электроэнергию по зонам суток $C_{w.\text{зон}}$, 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 табл. 5.4

Вариант	Объем откачиваемой воды по зонам суток $V_{\text{зон}}$, м ³			Расход электроэнергии в сутки $W_{\text{сут}}$, кВт·ч	Оплата за потребляемую электроэнергию в сутки $C_{w.\text{сут}}$, грн	Объем откачиваемой воды в сутки $V_{\text{сут}}$, 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 изображены график наполнения водосборника и график электрических нагрузок ГВУ № 1 для условий существующего и увеличенного его объема соответственно. Существующий водосборник шахты имеет две разные 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.

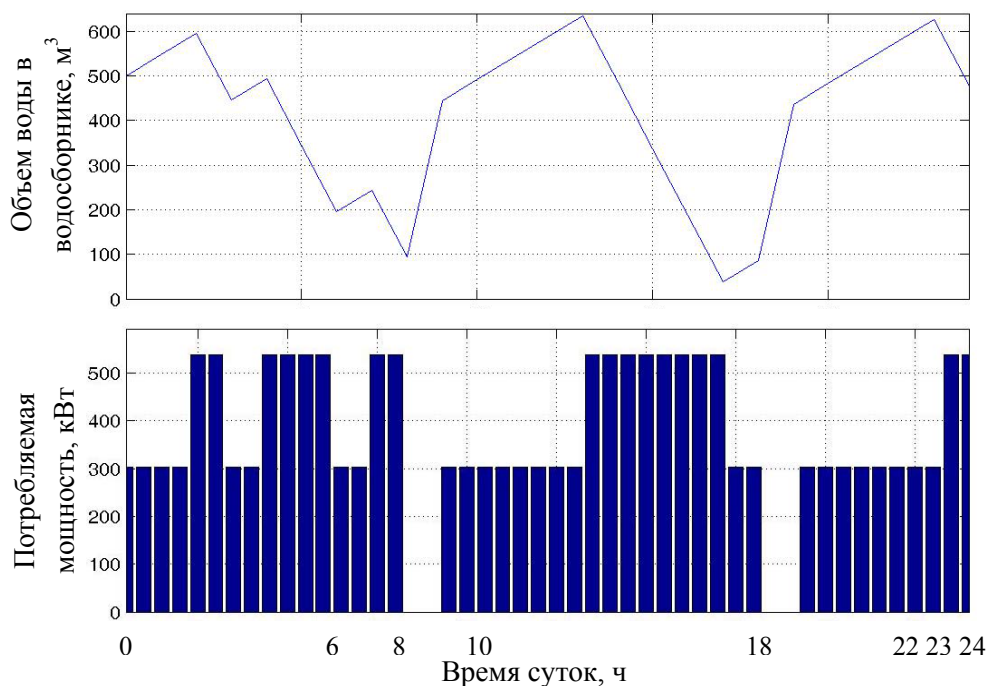


Рис. 5.1. График работы ГВУ № 1 с существующим объемом водосборника при выведении ветви с большей вместимостью в чистку

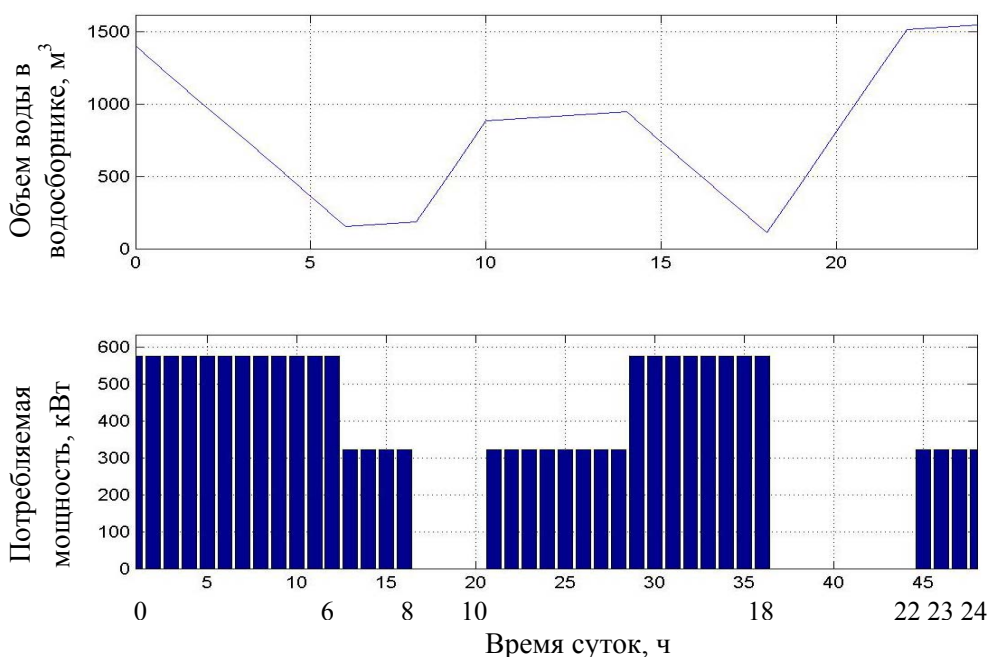


Рис. 5.2. График работы ГВУ № 1 с увеличенным объемом водосборника при выведении одной из ветвей в чистку

Следовательно, эффективность применения РРЭ в периоды чистки водосборника будет низкой. Решить данную проблему предлагается путем сооружения водосборника с равными по вместимости ветвями, объем которых рассчитан с учетом наибольшей длительности максимальных нагрузок в энергосистеме и заиления. При-

менение данного способа определения объема водосборника позволит полностью исключить работу насосов в периоды пиковых нагрузок в энергосистеме 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 изменение величины расхода электроэнергии и ее оплаты для годового интервала времени с учетом следующих мероприятий по повышению энергоэффективности ГВУ № 1:

- увеличение существующей вместимости 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 находятся в работе 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 вместимости водосборника способствует накоплению большего объема воды в период пиковых нагрузок, которую необходимо откачать во время внепиковых нагрузок путем увеличения количества насосов, что приведет к 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 продолжительности процесса очищения ветвей водосборника способствует снижению расхода электроэнергии, что сопровождается возрастанием оплаты за ее потребление (см. п. 4.2);

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

$$\begin{aligned} \Delta W_{2(1,4)}^{ГВУ1} &= (8399,3 - 8052,5)365 = 126,6 \text{ МВт} \cdot \text{ч в год}; \\ \Delta C_{w(1,4)}^{ГВУ1} &= (8172,1 - 7772,3)365 = 145,9 \text{ тыс. грн в год}; \end{aligned}$$

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

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

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

- применение всех предлагаемых мероприятий (с учетом круглогодичной работы обеих ветвей водосборника, заиленных на 10 %), т.е. увеличение вместимости водосборника и использование резервного трубопровода (варианты 1 и 7), дает:

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

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

Итак, увеличение вместимости водосборника одновременно с использованием резервного трубопровода позволит снизить годовой расход электроэнергии и оплату за ее потребление 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 начальных условиях и исходных данных:

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

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

Таблица 5.5

Технические и экономические показатели режимов работы ГВУ № 2

Вариант	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	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 табл. 5.5

Вариант	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

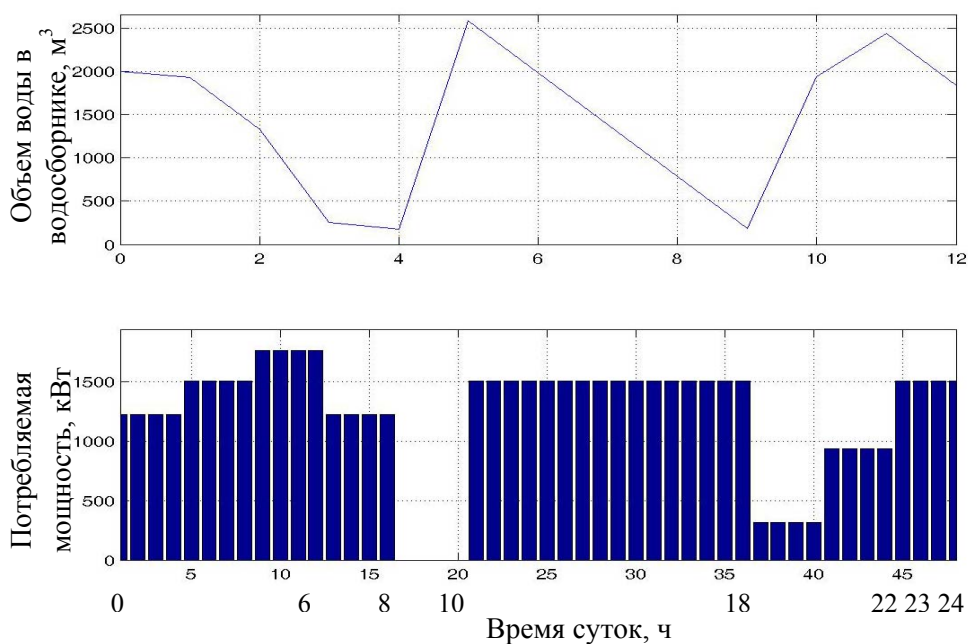


Рис. 5.3. График работы ГВУ № 2 с существующим объемом водосборника при заилении 10 %

4) работа ГВУ с тремя трубопроводами (рабочие и резервный) и существующим объемом водосборника $2000 + 950 = 2950 \text{ м}^3$ 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 вместимости 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 $4,6 \times Q_{\max} = 5520 \text{ м}^3$ и с двумя рабочими трубопроводами;

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

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

- увеличение имеющейся вместимости водосборника до значения $2 \times 4,6 \times Q_{\max} = 2 \times 5520 = 11040 \text{ м}^3$ 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 находятся в работе две ветви, заиленные на 10 % (варианты 1 и 5):

$$\begin{aligned} \Delta W_2^{ГВУ2} &= (28567,6 \cdot 90 + 28547,6 \cdot 90 + 28972 \cdot 185) - \\ &- (29030 \cdot 90 + 29030 \cdot 90 + 29372 \cdot 185) = 157,03 \text{ МВт} \cdot \text{ч в год}; \\ \Delta C_w^{ГВУ2} &= (31182,9 \cdot 90 + 34518,5 \cdot 90 + 29971,3 \cdot 185) - \\ &- (26381,7 \cdot 90 + 26381,7 \cdot 90 + 24318,3 \cdot 185) = 2181,96 \text{ тыс. грн в год}. \end{aligned}$$

Увеличение вместимости водосборника позволяет снизить оплату за электроэнергию на 19,3 % (2181,96 тыс. грн в год), но при этом ее расходуется на 1,52 % (157,03 МВт·ч в год) больше;

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

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

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

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

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

При работе ГВУ № 2 с имеющейся вместимостью 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 вместимости 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;

- применение всех предлагаемых мероприятий (с учетом круглогодичной работы обеих ветвей водосборника, заиленных на 10 %), т. е. увеличение вместимости водосборника и использование резервного трубопровода (варианты 1 и 7), дает:

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

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

Итак, увеличение вместимости водосборника совместно с использованием резервного трубопровода позволит снизить годовой расход электроэнергии и оплату 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 оплаты за ее потребление соответственно 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 тру-

бопровода, позволит снизить суммарный расход электроэнергии и величину оплаты за ее потребление соответственно на 5,8 и 6,7 %:

$$\Delta W_{z(1,4)}^{GBU1,2} = 126,6 + 182,9 = 309,5 \text{ МВт} \cdot \text{ч в год};$$

$$\Delta C_{w(1,4)}^{GBU1,2} = 145,9 + 202,5 = 348,4 \text{ тыс. грн в год.}$$

5.3. Снижение расхода топлива (угля) на тепловых электростанциях

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

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

$$\Delta G = \int_{t_1}^{t_2} \varphi \Delta P(t) dt, \quad (5.1)$$

где φ – относительный прирост расхода топлива – первая производная расхода топлива по нагрузке или увеличение расхода топлива при изменении нагрузки на единицу. Этот показатель зависит от величины нагрузки. При переходе ТЭС из базового режима работы в полупиковый и дальше в пиковый мощность станции возрастает и соответственно увеличивается расход топлива, которое необходимо для обеспечения нагрузки, превышающей базовую.

По весьма осторожным оценкам суммарный суточный прирост удельного расхода топлива составляет от 15 до 25 г у.т./кВт·ч и более в зависимости от времени года. С учетом участия до 50 % ТЭС в регулировании режимов электропотребления общий расход топлива увеличивается соответственно от 500 до 850 тыс. т у.т./год. В соответствии с "Энергостратегией Украины на период до 2030 г." удельный расход условного топлива на выработку 1 кВт·ч электроэнергии в 2009 г. составил 396 г у.т., а прогнозные значения на 2015 г. –

395 г у.т./кВт·ч. По состоянию на 2010 г. энергетические установки Германии расходовали 310 – 330 г у.т./кВт·ч.

С целью упрощения задачи, решения по приведенной зависимости (5.1) можно найти через удельный расход топлива.

Удельный расход топлива на производство электроэнергии ТЭС определяется двумя составляющими: величиной расхода при равномерном ГЭН g_{0w} и величиной расхода на покрытие неравномерной части ГЭН g_{0p} . При использовании П–Р можно скорректировать величину расхода топлива для покрытия неравномерной части ГЭН энергосистемы [1]:

$$g_{0p} = \frac{0,12287}{\eta_{nm}} \left(\frac{1+\alpha}{2\sqrt{\alpha}} - 0,416\alpha - 0,584 \right) =$$

$$= \frac{0,12287}{0,3} \left(\frac{1+0,75}{2\sqrt{0,75}} - 0,416 \cdot 0,75 - 0,584 \right) = 0,0468 \text{ кг у.т./кВт}\cdot\text{ч},$$

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

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

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

топлива в электрическую энергию.

С учетом принятой теплоты сгорания угля 25 МДж/кг величина 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. Рассчитаем объем электроэнергии, выводимой из зоны максимальных (пиковых) нагрузок в течении года:

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

Расход топлива на покрытие выведенной из пиковой зоны электроэнергии

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

При рыночной цене угля 1500 грн/т величина снижения расхода топлива в денежном эквиваленте

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

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. При условии реальной теплоты сгорания угля 20 МДж/кг величина снижения расхода топлива в денежном эквиваленте составит более 1 млн грн в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для энергосистемы Украины неравномерность графиков электропотребления, которая непосредственно влияет на устойчивость ее работы и величину топливно-энергетических показателей, является основной проблемой. Для частичного решения данной проблемы задействованы энергоемкие установки, работающие в режиме потребителей-регуляторов, для чего созданы "стимулирующие" тарифы на электроэнергию.

Снижение неравномерности ГЭН энергосистемы, а именно уменьшение уровня потребления электрической энергии в часы максимума нагрузок, частично достигается за счет работы в режиме П–Р водоотливных установок угольных шахт. Наблюдениями установлено, что уровень эффективности работы в таких режимах остается неудовлетворительным. Объясняется это тем, что объем водосборников недостаточный, общий расход электроэнергии на водоотлив повышается из-за увеличения его удельного значения и др. Именно поэтому усилия по повышению энергоэффективности работы главного водоотлива направлены на создание надежного потребителя–регулятора.

Применение экономически обоснованного РРЭ на примере главного водоотлива способствует максимальному снижению оплаты за потребляемую электроэнергию при минимальном увеличении ее расхода. Минимальный удельный расход электроэнергии как критерий энергоэффективной работы главного водоотлива в режиме П–Р достигается за счет создания соответствующих технических и технологических условий его функционирования.

В работе изложены результаты проведенных исследований в области повышения энергоэффективности работы главного водоотлива угольных шахт. Впервые выполнены комплексные исследования, охватывающие все составляющие от устройства водосборника с учетом неравномерности вместимости его ветвей, оценки различных режимов работы главного водоотлива и алгоритмов его управления. Разработанные алгоритмы управления ГВУ учитывают интересы обеих сторон – потребителя электроэнергии (шахты) и ее производителя (энергосистемы) за счет критериального учета и контроля в мониторинговом режиме минимального удельного расхода электроэнергии. Изложенное подтверждается полученными тремя патентами на полезную модель и одним патентом на изобретение Украины.

Разработанный новый способ определения объема водосборника ГВУ шахты и его ветвей 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 для повышения эффективности работы главного водоотлива в режиме П–Р.

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. При этом зависимости удельного объема водосборника от количества его ветвей имеют нелинейный функциональный характер. Практическая ценность этих зависимостей состоит в том, что при равных по объему ветвях водосборника необходимая его вместимость меньше на величину $1,15 - 0,93 \text{ м}^3$ на $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ притока воды по сравнению с неравными.

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.

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 откачивание воды при минимизации оплаты за ее потребление.

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. Мониторинг удельного расхода электроэнергии и характера изменения напора, создаваемого насосами, позволяет своевременно определять причины его изменения, которые, как правило, связаны с техническим состоянием оборудования.

Анализ полученных областей эффективности применения РРЭ главного водоотлива показал, что возможность регулирования ограничивается техническими параметрами рабочего состояния насосных агрегатов и трубопроводной сети, ухудшение которых снижает эффективность РРЭ. Как следствие, энергоэффективность работы ГВУ в режиме П–Р практически прямо пропорционально зависит от технического состояния насосов, ухудшение которого до 50 % приводит к снижению энергоэффективности в два раза.

Применение РРЭ главного водоотлива приводит к увеличению удельного расхода электроэнергии до 9 %, однако использование резервного трубопровода для откачивания воды позволяет снизить прирост удельного расхода электроэнергии на откачку воды по сравнению с режимом использования только рабочих трубопроводов на 7 %, и также дает возможность снизить величину оплаты за потребленную ГВУ электроэнергию дополнительно до 5 % в зависимости от водопритока и технического состояния оборудования.

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.

Повышение эффективности применения РРЭ дает возможность 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 показателем при его дефиците.

По-видимому, основным недостатком предложенных разработок является отсутствие аппаратного воплощения системы управления, однако это относится к другой специальности и специализации. Вместе с тем, авторы провели консультации по этому вопросу с профессором В.В. Ткачевым, который подтвердил возможность и полную готовность реализовать изложенные идеи и разработки для создания полноценной системы автоматизации главного водоотлива угольной шахты.

Для этого необходим заказ на указанную систему и соответствующее финансирование. К сожалению, это очень серьезная проблема, не имеющая однозначного решения на современном этапе. Пожалуй, единение интеллекта, нравственности и состоятельности позволило бы решать большинство современных проблем, включая вопросы повышения энергоэффективности технологических процессов и установок.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Разумний 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 // Гірн. 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. Алябьев Н.М. Экономия электроэнергии на угольной шахте / Н.М. Алябьев, В.К. Ефремов. – М.: Недра, 1969. – 170 с.
5. Энергоэффективность комплекса шахтного водоотлива / Г.Г. Пивняк, А.С. Бешта, А.В. Балахонцев, А.А. Худoley // Электротехнические комплексы и системы: науч.-техн. журн. – 2011. – №03 (79). – С. 394 – 396.
6. Правила безопасности в угольных шахтах: ДНАОП 1.1.30-1.01-00. – К.: Госнадзорохрантруда Украины, 2000. – 495 с.
7. Правила технической эксплуатации угольных и сланцевых шахт: НАОП 1.1.30-1.05.75. – К.: Минуглепром СССР, 1975. – 485 с.
8. Правила технічної експлуатації вугільних шахт: СОУ 10.1-00185790-002-2005. – К.: Мінвуглепром України, 2006. – 353 с.
9. Разумний Ю.Т. Визначення ємності водозбірника головного водовідливу / Ю.Т. Разумний, А.В. Рухлов, К.С. Родна // Уголь України. – 2010. – № 4. – С. 31 – 32.
10. 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.
11. Правила безпеки у вугільних шахтах: НПАОП 10.0-1.01-10. – К.: Державний комітет з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду, 2010. – 432 с.
12. Проведение горно-разведочных выработок и основы разработки месторождений полезных ископаемых / Л.Г. Грабчак, Ю.Н. Малышев, В.И. Комащенко, Б.И. Федунец. – М.: Академии горных наук, 1997. – 576 с.
13. Разумний Ю.Т. Режимы електроспоживання вугільних шахт: навч. посіб. / Ю.Т. Разумний. – Д.: НГА України, 2002. – 126 с.

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

15. Разумный Ю.Т. Математическое моделирование режимов работы многоагрегатных шахтных водоотливных установок / Ю.Т. Разумный, Е.С. Родная. // Наук. вісн. Нац. гірн. ун-ту, 2006. – № 1. – С. 80 – 84.

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

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

18. Пат. 82512 Україна, МПК Е 02 D 19/00. Спосіб визначення об'єму водозбірника головної водовідливної установки шахти / Ю.Т. Разумный, А.В. Рухлов, Н.Ю. Рухлова; Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет". – № и 201300039; заявл. 02.01.13; опубл. 12.08.13, Бюл. № 15.– 5 с.: кресл.

19. Разумный Ю.Т. Повышение энергоэффективности главной водоотливной установки угольной шахты / Ю.Т. Разумный, Н.Ю. Рухлова, А.В. Рухлов. // Наук. вісн. Нац. гірн. ун-ту, 2013. – № 5. – С. 67 – 72.

20. Рухлова Н.Ю. Влияние технологических условий работы главного водоотлива угольной шахты на повышение энергоэффективности его использования / Н.Ю. Рухлова // Форум гірників – 2013: матеріали міжнародної конф., м. Дніпропетровськ, 2-5 жовтня 2013 р. – Д., 2013. – Т. 4. – С. 168 – 172.

21. 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.

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

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

24. 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.

25. 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-magnitnoimpulsnaya_o4istka.

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

27. Бессараб В.И. Управление шахтной водоотливной установкой в аварийных и аномальных режимах работы / В.И. Бессараб, Р.В. Федюн, В.А. Попов // Наук. праці ДонНТУ; сер. "Обчислювальна техніка та автоматизація". – Донецьк, 2006. – №106. – С. 26 – 33.

28. Пат. 86645 Україна, МПК F 15 В 1/00, МПК F 04 D 27/00. Спосіб керування головною водовідливною установкою вугільної шахти / Ю.Т. Разумний, А.В. Рухлов, Н.Ю. Рухлова; Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет". – № u 2013 07312; заявл. 10.06.13; опубл. 10.01.14, Бюл. № 1. – 5 с.: кресл.

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

30. Математический энциклопедический словарь; под ред. А.П. Бицюкова. – М.: Московская энциклопедия, 1988. – 644 с.

31. Рухлов А.В. Метод определения мощности аварийной брони электроснабжения угольных шахт: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.09.03 Электротехнические комплексы и системы / Рухлов Артем Владимирович; Нац. гірн. ун-т. – Д., 2005. – 163 с.

32. Рухлов А.В. Моделирование графиков электрической нагрузки угольных шахт: монография / А.В. Рухлов. – Д.: Нац. гірн. ун-т, 2008. – 119 с.

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

34. 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.

35. Холоменюк М.В. Методика розрахунків водовідливних установок гірничих підприємств. Методичні вказівки для студентів на пряму підготовки 0902 Інженерна механіка / М.В. Холоменюк. – Д.: Нац. гірн. ун-т, 2007. – 67 с.

36. Пат. 108708 України на винахід, МПК F 15 D 1/00, МПК F 04 D 27/00. Спосіб керування головною водовідливною установкою вугільної шахти / Ю.Т. Разумний, А.В. Рухлов, Н.Ю. Рухлова; Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет". – № а 2014 02664; заявл. 17.03.14; опубл. 25.05.15, Бюл. № 10. – 6 с.: кресл.

37. Разумний Ю.Т. Энергоефективна робота водовідливної установи вугільної шахти / Ю.Т. Разумний, Н.Ю. Рухлова, А.В. Рухлов // Наук. вісн. Нац. гірн. ун-ту. – 2015. – № 2 (146). – С. 74 – 79.

38. 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.

39. Рухлова Н.Ю. Моделирование энергоэффективных режимов работы шахтного водоотлива / Н.Ю. Рухлова // Форум гірників – 2014: матеріали міжнародної конф., м. Дніпропетровськ, 1-4 жовтня 2014 р. – Д., 2014. – Т. 3. – С. 160 – 163.

40. Волкова В.И. Основы теории систем и системного анализа / В.И. Волкова, А.А. Денисов. – С.Пб.: СПбГТУ, 1997. – 510 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
1. ПАРАМЕТРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ГЛАВНОГО ВОДООТЛИВА.....	7
1.1. Параметры водосборника.....	7
1.2. Анализ объемов ветвей водосборника главного водоотлива.....	14
1.3. Анализ параметров трубопроводной сети главной водоотливной установки.....	21
1.4. Влияние технического состояния насосов на работу водоотлива.....	24
1.5. Влияние технического состояния трубопроводов на работу водоотлива.....	25
1.6. Совместное влияние технического состояния насосов и трубопроводов на работу водоотлива.....	27
2. КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЛАВНОГО ВОДООТЛИВА В РЕЖИМЕ ПОТРЕБИТЕЛЯ–РЕГУЛЯТОРА.....	29
2.1. Принципы регулирования режимов электропотребления главного водоотлива.....	29
2.2. Алгоритм функционирования главной водоотливной установки в режиме потребителя–регулятора.....	31
2.3. Результаты моделирования режимов работы главного водоотлива.....	48
3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ГЛАВНОГО ВОДООТЛИВА.....	51
3.1. Зависимость эффективности работы водоотлива от технического состояния основного оборудования.....	51
3.2. Оценка влияния количества трубопроводов.....	57
3.3. Управление режимами работы водоотливной установки....	60
4. ОБЛАСТИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЛАВНОГО ВОДООТЛИВА В РЕЖИМЕ ПОТРЕБИТЕЛЯ–РЕГУЛЯТОРА.....	64
4.1. Определение области повышения энергоэффективности....	64

4.2. Влияние рабочего объема водосборника на техничко-экономические показатели работы главного водоотлива.....	74
4.3. Определение границ энергоэффективного использования главного водоотлива.....	79
5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГЛАВНОГО ВОДООТЛИВА.....	84
5.1. Достоверность результатов моделирования режимов работы главного водоотлива.....	84
5.2. Экономическая оценка результатов исследований энергоэффективности работы главной водоотливной установки.....	87
5.3. Снижение расхода топлива (угля) на тепловых электростанциях.....	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	99
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	103

Наукове видання

Разумний Юрій Тимофійович
Рухлова Наталія Юріївна
Рухлов Артем Володимирович

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ГОЛОВНОГО
ВОДОВІДЛИВУ ВУГІЛЬНОЇ ШАХТИ**

Монографія

(Російською мовою)

Редактор Л.О. Чуїщева

Підписано до друку 26.04.2016. Формат 30 x 42/4.
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 6,0.
Обл.-вид. арк. 6,0. Тираж 300 прим. Зам. №

Підготовлено до друку та видруковано
у Державному ВНЗ "Національний гірничий університет".
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004.
49005, м. Дніпропетровськ, просп. Д. Яворницького, 19.