

Таким образом, спектр мгновенной мощности является надежным диагностическим критерием состояния электромеханических систем. Для анализа следует получить массив суммы мгновенных мощностей по трем фазам. Гармоники обратной частоты и кратные их отражают состояние механической системы привода, гармоники, кратные частоте питающего напряжения, – состояние электродвигателя.

### Список литературы

1. Бешта О.С. Идентифікація параметрів електропривода в задачах енерго- і ресурсозбереження (розвиток теорії, розробка і впровадження). Дис...д-ра техн. наук: 05.09.03 / НГА Укр. – Дніпропетровськ, 2001. – 38 с.
2. Родькин Д.И., Калинов А.П., Ромашихин Ю.В. Эффективность метода энергодиагностики параметров двигателей переменного тока // Электроприводы переменного тока: Труды международной 14 научно-технической конференции. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2007.- С. 273-278.
3. Бешта О.С., Балахонцев О.В., Худолій С.С., Федоренко В.В., Худий Є.Г. Експериментальна перевірка методів ідентифікації параметрів електропривода, що оснований на його дискретних моделях / Науковий вісник НГУ №3. – 2004. – С. 42-46.
4. Методические указания по проведению экспертных обследований вентиляторных установок главного проветривания. Москва: Изд-во НТЦ «Промышленная безопасность», № 2002.

УДК 621:6

**Бойко В.С., д-р техн. наук**

(Украина, Киев, Национальный технический университет Украины "КПИ"),

**Сотник Н.И., канд. техн. наук,**

(Украина, Сумы, Сумской государственной университет)

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛА ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ГОРНООБОГАТИТЕЛЬНОГО КОМБИНАТА

**Введение.** Одним из стратегических направлений реформирования современных систем водоснабжения является эффективное энергосбережение, уменьшение затрат и потерь энергоносителей, сокращение энергоемкости продукции и услуг. Особенно актуальны эти проблемы для предприятий сферы водоснабжения и водоотведения украинских городов, предприятий горнорудной и металлургической промышленности, а также химических производств.

Технологический процесс водоснабжения на предприятиях указанных отраслей характеризуется нерациональным использованием электрической энергии в производстве вследствие значительного износа труб и действующего оборудования, наличия потерь воды при транспортировке и необоснованно большими объемами ее потребления, а также изначально высокой энергоемкостью продукции и услуг, заложенной при проектировании этих предприятий [1].

Последний фактор в значительной мере предопределен исторически стартовыми условиями развития систем водоснабжения. Становление этой сферы народного хозяйства происходило в период господства плановой экономики: 1960-1980-е годы характеризовались наибольшими объемами капитальных вложений в промышленное производство. Финансирование этих вложений производилось из бюджетных источников. В то время развитие экономики происходило преимущественно экстенсивным путем в условиях низких цен на энергетические ресурсы, что наложило отпечаток на проектные особенности в различных сферах, в том числе и в системах водоснабжения. К таким особенностям следует отнести:

1) различные системы водоснабжения проектировались на одних и тех же принципах с запасом по характеристикам оборудования в расчете на расширение производства и увеличения потребления воды в будущем;

2) большинство предприятий были построены (или реконструированы) примерно в один период, что определило использование при их строительстве типового оборудования, материалов, технологий, типовых проектов без учета индивидуальных особенностей систем водоснабжения.

**Цель работы.** На примере модернизации насосного оборудования насосной станции оборотного водоснабжения (ОНС) горно-обогатительного комбината (ГОК) показать возможности повышения энергоэффективности технического водоснабжения при минимальных капиталовложениях.

**Основное содержание исследований.** Насосная станция оборотного водоснабжения осуществляет подачу технической воды для технологического процесса и гидротранспорта хвостов на обогатительную фабрику (ОФ), а также на нужды других потребителей. Она состоит из одного здания, в котором расположен машинный зал и две камеры переключения задвижек (камера всасывания и камера нагнетания).

Источник водоснабжения – осветленная в хвостохранилище вода.

На ОНС установлены две группы насосов:

I-я группа – насосы №№ 1-7 марки 24НДС (Д6300-80-2) производительностью 6300 м<sup>3</sup>/ч и напором 79 м.

II-я группа – насосы №№ 9-11 марки 24НДН (Д5000-32) с производительностью 5000 м<sup>3</sup>/ч и напором 32 м.

В качестве привода всех насосных агрегатов используются синхронные электродвигатели мощностью 1600 кВт, с числом оборотов 750 об/мин.

В течение проанализированного периода работы ОНС основной технологический процесс имел место при подачах воды от 24000 м<sup>3</sup>/ч до 16000 м<sup>3</sup>/ч. Причем, изменение объемов подаваемой воды достигалось за счет количества работающих насосных агрегатов и сочетания параллельно работающих насосных агрегатов с различной производительностью.

В качестве насосов с большой производительностью используются агрегаты №№ 1, 2, 5, 6, имеющие рабочие колеса диаметром 990 мм. Насосный агрегат № 4 имеет среднюю производительность. Его рабочее колесо подрезано до диаметра 840 мм. Насосные агрегаты II группы – агрегаты малой производительности.

Подача воды в максимальных объемах (24000-23000) м<sup>3</sup>/ч обеспечивается 3-мя насосами большой производительности, либо двумя насосами большой производительности и одним – средней, либо двумя насосами большой производительности и двумя – малой. При минимальной подаче в объемах (15000-16000) м<sup>3</sup>/ч используются 3 насоса: большой, средней и малой производительности.

Анализ данных "Журналов машинистов насосных установок" показывает, что перерасход электроэнергии при осуществлении технологического процесса водоснабжения обусловлен двумя основными причинами – технической и организационной:

- характеристики насосов не соответствуют характеристике гидравлической сети, связывающей насосную станцию оборотного водоснабжения с основным потребителем технической воды - обогатительной фабрикой;

- дежурный оперативный персонал не придерживается рекомендаций по использованию определенного сочетания работающих насосов для обеспечения технологического процесса с минимальным потреблением электрической энергии.

Насосная станция подает воду на обогатительную фабрику, технологический процесс которой обеспечивается при оптимальном давлении на входном коллекторе 3 кгс/см<sup>2</sup>. Учитывая также разность уровней геодезических отметок ОФ и оси насосов ОНС, характеристика сети водоснабжения должна иметь статический напор около 33 м.

В напорной сети имеются две физические величины, характеризующие технологический процесс водоснабжения: расход (производительность) и давление (напор), обычно именуемые основными гидравлическими параметрами. Остальные величины, поддающиеся измерению и контролю, являются косвенными и, по отношению к технологии водоснабжения потребителей – второстепенными. Если говорить об основных гидравлических параметрах, то любой технологический процесс водоснабжения укладывается в один из четырех приведенных ниже вариантов сочетания напора в гидравлической сети  $H_c$  и расхода  $Q_c$ : 1)  $H_c = const$ ;  $Q_c = var$ . 2)  $H_c = var$ ;  $Q_c = const$ . 3)  $H_c = const$ ;  $Q_c = const$ . 2)  $H_c = var$ ;  $Q_c = var$ .

Основной потребитель воды от ОНС – обогатительная фабрика, предъявляет жесткие требования к параметрам водоподачи. Особенно это касается давления во входном коллекторе, отклонение которого от оптимального допускается в пределах, не превышающих 0,1 кгс/см<sup>2</sup>.

В силу существующей между давлением и расходом функциональной зависимости, определяемой величиной гидравлического сопротивления потребителей, номинальное давление на их входах является гарантией номинального расхода. Иными словами: стабилизация давления является необходимым и достаточным условием нормальной и эффективной работы потребителей. Представим давление на входе сети следующим выражением:

$$H_{нс} = H_{п} + H^r + (R_{тр} Q^2_{п}), \quad (1)$$

где:  $H_{нс}$  – давление на входе напорной сети (на выходе ОНС),  $H_{п}$  - давление, необходимое для нормальной работы потребителей ОФ,  $H^r$  – максимальная разность геодезических отметок ОНС и ОФ,  $R_{тр}$ - сопротивление напорного трубопровода, определяемое его диаметром, длиной и шероховатостью стенок,  $Q_{п}$  – расход воды потребителями ОФ и иными потребителями.

Основные параметры водоподачи посредством  $Q(H)$  – характеристики насосов жестко связаны между собой, и изменить любой из них, не затрагивая второй, произвольно нельзя. Управлять основными параметрами, т.е. осуществлять их целенаправленное изменение с целью оптимизации процесса водоснабжения по одному или нескольким критериям возможно, но это связано с решением сложной научной оптимизационной задачи.

Собственно именно такая задача – оптимизация технологического процесса подачи воды от ОНС на ОФ по критерию энергоэффективность (снижение расхода электроэнергии на перекачивание единицы объема жидкости), решается в настоящей научно-технической работе.

При этом следует учесть, что снабжение технической водой потребителей обогатительной фабрики и других потребителей исследуемой гидравлической системы осуществляется по принципу «по потребности», т.е. каждый потребитель, подключенный к напорной сети, в любое время должен обеспечиваться водой под необходимым давлением и в требуемом количестве. Вопрос выбора основного регулируемого параметра в настоящем исследовании не стоит. Он вытекает из требований технологии водоснабжения потребителей, согласно которому основным регулируемым параметром является давление.

Если в напорной системе обеспечивается стабилизация давления, тогда необходимость в регулировании производительности отпадает. Действительно, при водопользовании, организованном «по потребности», расход задается извне, а в силу непрерывности потока жидкости производительность всегда должна равняться расходу. Исключение может составить только разрыв непрерывности потока в момент интенсивных переходных процессов. Если на входе потребителя установить номинальное давление, то благодаря соответственно подобранному его гидравлическому сопротивлению, номинальный расход устанавливается автоматически. Общий расход ОНС зависит от количества подключаемых секций.

Изменения расхода вызывают отклонение давления, которое необходимо компенсировать, то есть расход является той величиной, ради которой необходима система регулирования. Изменение расхода оказывает возмущающее воздействие на систему водообеспечения. Что касается тока и мощности приводных двигателей насосных агрегатов, то, как активные составляющие, так и полные их значения являются функцией расхода, т.е. возмущающего воздействия.

Из изложенного следует, что сформулированная выше задача оптимизации технологического процесса подачи воды от ОНС на ОФ и другим потребителям может быть решена при управлении гидравлическими параметрами напорной сети за счет целенаправленного изменения  $Q(H)$  – характеристики как отдельных насосных агрегатов, так и насосной станции в целом. Причем характеристики параллельно работающих на насосной станции насосных агрегатов

не обязательно должны быть одинаковыми. Но если решается задача снижения удельного расхода электроэнергии, различные характеристики насосных агрегатов должны быть между собой согласованы, исходя из основного регулирующего критерия.

Принципиально возможны два способа изменения характеристик: ступенчатый и бесступенчатый. При ступенчатом способе, изменение характеристики насосной станции достигается изменением числа действующих насосов. Величины «ступенек» (шага переключения) зависят от производительности и вида характеристики единичного насоса. Ступенчатое регулирование является наиболее простым и дешевым, поэтому изменение характеристик насосных станций путем переключения числа нерегулируемых насосов получило весьма широкое распространение как в Украине, так и за ее пределами. На некоторых насосных станциях для уменьшения шага дискретности кроме главных и вспомогательных, используется третий вид насоса, подача которого меньше, чем у главного. Он играет роль «разменного» и включается, когда расход велик для вспомогательного, но мал - для включения главного насоса.

При бесступенчатом регулировании гидравлических параметров насосных агрегатов, работающих на общую сеть, наибольшее распространение получили следующие способы:

- изменение частоты вращения рабочего колеса насоса посредством воздействия на его привод;
- регулирование гидравлического сопротивления на выходе насоса, осуществляемое путем изменения проходного сечения регулирующего органа (дросселирование).

В зависимости от свойств системы управления и исполнительных механизмов возможно сколь угодно малое смещение характеристик и, соответственно, более тонкое регулирование параметров.

При изменении частоты вращения рабочего колеса насоса его характеристики в первом приближении перемещаются параллельно самим себе. Следовательно, если с помощью двигателя плавно изменять частоту, можно достичь плавного изменения как подачи насоса, так и создаваемого им напора в широких пределах. К числу преимуществ этого способа относятся: плавность, безударность и технологичность.

Недостатком системы с регулируемой частотой вращения рабочего колеса следует считать увеличение капитальных затрат за счет стоимости электропривода и повышенные требования к квалификации обслуживающего персонала.

Обратим также внимание на один из выводов, полученных в работе [2], посвященной выбору рационального способа регулирования подачи воды насосным агрегатом. Авторы пришли к заключению, что не следует увлекаться установкой регулируемых электроприводов на магистральных трубопроводах и гидросетях, где поддерживается постоянство напора или невысокий диапазон регулирования подачи. Экономия электроэнергии при скоростном регулировании подачи в лучшем случае составляет несколько процентов по сравнению с регулированием с помощью задвижки. Этот вывод полностью совпадает с ре-

зультатами наших теоретических исследований и подтверждается опытом реализации энергосберегающих проектов на предприятиях Украины.

Способ регулирования дросселированием связан с дополнительными потерями энергии и снижением КПД системы. Однако при этом следует учесть следующие обстоятельства [3]:

- реализация указанного способа не требует сложных технических решений;
- непроизводительные дополнительные потери энергии можно минимизировать, сочетая дросселирование со ступенчатым регулированием.

Поэтому безоговорочное отбрасывание регулирования системы дросселированием в пользу частотного - является преждевременным.

Следует также учесть, что на многоагрегатных насосных станциях, где все насосы работают параллельно на общую сеть, нет необходимости регулировать все насосы. Более рационально применять комбинированный способ, когда водоснабжение потребителей в системе осуществляется с помощью одного регулируемого насосного агрегата и нескольких нерегулируемых. В этом случае давление в напорной сети регулируется с большей точностью, режим работы нерегулируемых насосов близок к оптимальному, а вся система водоснабжения имеет максимально возможный высокий показатель энергоэффективности.

Использование насосных агрегатов в качестве устройств водоподачи и устройств регулирования процесса водоснабжения насосной станцией требует проведения серьезных научных исследований.

Известно, что внутренний рабочий процесс в центробежном насосе описывается уравнениями турбулентного течения и непрерывности потока. В то же время установить точные зависимости параметров внешних характеристик насоса от параметров потока достаточно сложно. На практике достаточно часто наблюдается некоторое несоответствие между режимом работы насоса и теоретическим представлением об этом процессе. Особенно это проявляется при пуске насосного агрегата и его работе на систему с противодавлением. При этом классические зависимости, описывающие его работу, требуют корректировки. К примеру, известно, что давление на выходе насоса пропорционально квадрату скорости вращения рабочего колеса ( $H \propto \Omega^2$ ), однако при работе на систему с противодавлением, показатель степени может изменяться в очень широких пределах (2...10). Или при пуске, давление на выходе насоса появляется только после того, как скорость колеса достигнет определенных значений, то есть от момента начала вращения проходит некоторое время. И оно тем больше, чем медленнее начинает вращаться рабочее колесо.

Из-за значительных затруднений решения таких задач аналитическим путем и важности этих решений для нужд разработки новых технических средств и модернизации проточной части существующих насосных агрегатов, нами используются методы математического моделирования.

Объектно-ориентированная модель системы водоснабжения обогатительной фабрики и других потребителей (рис. 1), включает конфигурацию системы водоводов, диаметры отдельных участков и их протяженность, геодезические

отметки, местные сопротивления, шероховатости внутренних поверхностей трубопроводов.

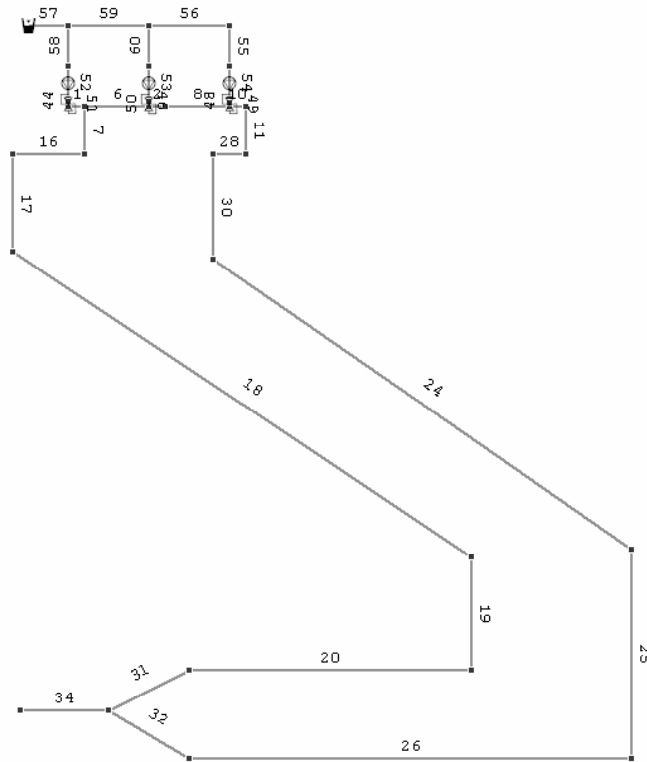


Рис.1. Объектно-ориентированная модель исследуемой системы водоснабжения

При исследовании режимов работы сети водоснабжения, имеющих место до выполнения работ по модернизации насосных агрегатов, использовались стандартные напорные характеристики насоса 24 НДс (Д6300-80а), энергетические характеристики которых приведены на рис.2.

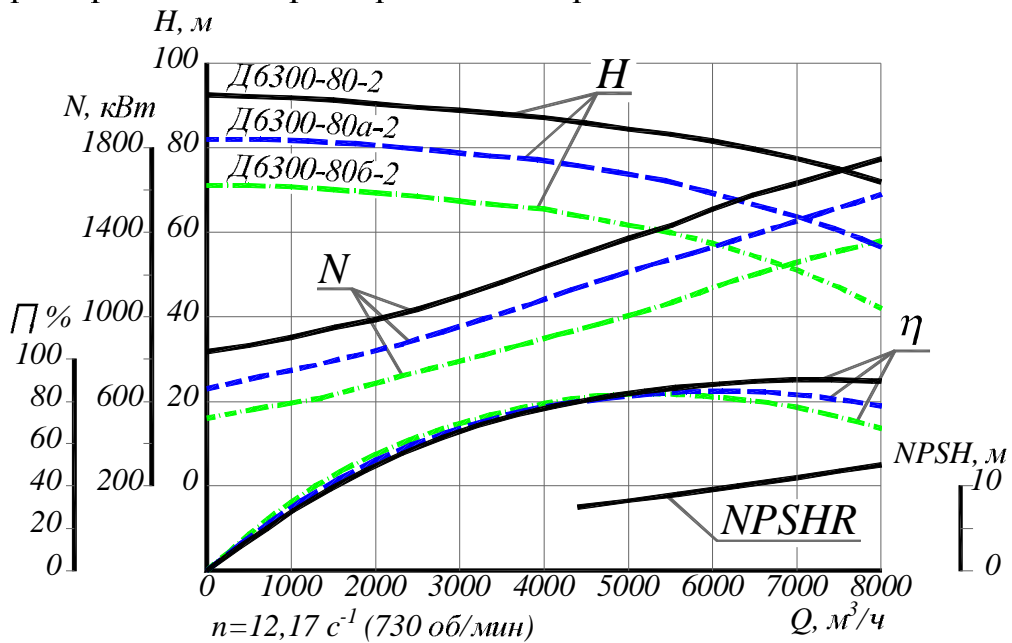


Рис. 2. Энергетические характеристики насоса 24 НДс

Моделирование режима работы системы водоснабжения до реализации проекта модернизации осуществлялось в соответствии с данными технического задания: в подаче технической воды задействованы 3 насосных агрегата, общий объем подачи –  $Q = 18\,400 \text{ м}^3/\text{ч}$ , давление на входе в обогатительную фабрику –  $P = 3 \text{ кгс/см}^2$  подпор по всасу не менее 10 м.

Значение электрической мощности приводных электродвигателей отдельных насосных агрегатов и удельный расход электроэнергии на подачу  $1 \text{ м}^3$  воды, полученные в результате моделирования, представлены в табл. 1

Таблица 1

Результаты моделирования режима водоснабжения не модернизированными насосными агрегатами

№ НА	Мощность P, кВт	Подача, Q, м <sup>3</sup> /год	Удельный расход р, кВт·год/м <sup>3</sup>
НА№3	1392	6170	0,2257
НА№5	1381	6120	0,2257
НА№6	1379	6110	0,2257

Полученные в результате моделирования значения основных показателей технологического процесса водоснабжения и удельное потребление электроэнергии достаточно близки к реальным, что свидетельствует об адекватности разработанной модели.

Проведенные в настоящей работе научные исследования показали, что при заданных в техническом задании характеристиках сети водоснабжения и технологических потребителей, максимальный показатель энергоэффективности может быть достигнут при использовании основных насосных агрегатов с такими гидравлическими характеристиками:  $Q = 8000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $H = 39 \text{ м}$ . Характеристика указанного насосного агрегата приведена на рис. 3 а.

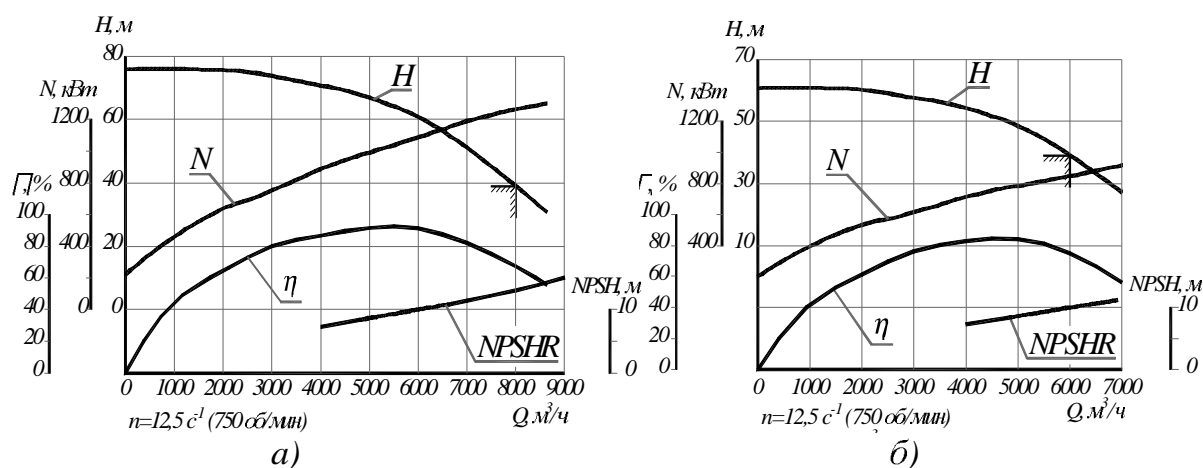


Рис. 3. Энергетические характеристики модернизированных насосных агрегатов: а)  $Q = 8000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $H = 39$ ; б)  $Q = 6000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $H = 39 \text{ м}$ .



Потери энергии за счет избыточного давления, создаваемого насосной станцией, можно уменьшить, включив на параллельную работу насосные агрегаты с различными характеристиками, подобранными соответствующим образом.

В соответствии с требованиями Технического задания максимальный объем подаваемой на ОФ воды составляет 24000 м<sup>3</sup>/ч, а минимальный - 16000 м<sup>3</sup>/ч при стабильном давлении на входе фабрики 3 кг/см<sup>2</sup>. Указанный, достаточно широкий диапазон подачи воды на фабрику при жестком нормировании входного давления требует разработки требований к режиму работы насосной станции с целью обеспечения технологического процесса при минимуме потребления электроэнергии.

Как показали исследования, обеспечить указанные выше требования возможно, при использовании насосных агрегатов с различными Q-H характеристиками. В частности, для насосной станции ОНС необходимо модернизировать два насосных агрегата 24 НДС под характеристику, представленную на рис.3, а, а третий – под характеристику, представленную на рис.3, б. По этой причине насосный агрегат НА-3 модернизирован под гидравлические параметры Q = 6000 м<sup>3</sup>/ч, H = 39 м, а насосные агрегаты №№ 5, 6, – под гидравлические параметры Q = 8000 м<sup>3</sup>/ч, H = 39 м.

При оптимизации режима работы разнотипных насосных агрегатов, питающих общую нагрузку, необходим критерий выбора момента перехода от одного насосного агрегата (или их группы) к другому. Однако правильный подбор состава работающих насосных агрегатов еще не обеспечивает минимальных расходов электроэнергии на перекачивание жидкости. При использовании разнотипных насосных агрегатов следует, кроме того, правильно распределить нагрузку между ними и выявить границы их рационального использования во всем диапазоне изменения подач насосной установки.

Такое регулирование подачи насосной станции не исключает применение дросселирования для согласования режима работы параллельно включенных насосных агрегатов и регулирования количества перекачиваемой ими жидкости.

Изложенное подтверждается результатами моделирования режима работы системы водоснабжения обогатительной фабрики группой из 3 модернизированных насосных агрегатов, представленными в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты моделирования режима водоснабжения модернизированными насосными агрегатами**

№ НА	Мощность P, кВт	Подача, Q, м <sup>3</sup> /год	Удельный расход p, кВт·год/м <sup>3</sup>
НА№3м	534	2687	0,19874
НА№5м	1191	7864	0,15145
НА№6м	1191	7849	0,14174

Исходя из данных табл. 2 удельный расход электроэнергии на подачу 1 м<sup>3</sup> технической воды составляет:

$$\rho_1 = \frac{2916}{18400} = 0,1585 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3.$$

Следует обратить внимание на необходимость разработки организационных мероприятий, направленных на снижение потребления электроэнергии через оптимальное сочетание параллельно работающих насосных агрегатов в границах заданных давлений и подач.

**Вывод.** До проведения работ по модернизации насосных агрегатов режим работы насосной станции ОНС характеризовался:

- среднесуточным потреблением электроэнергии группой насосных агрегатов по измерениям счетчиков – 99 466 кВт·ч;
- среднесуточной подачей технической воды группой насосных агрегатов по измерениям расходомеров – 440 642 м<sup>3</sup>;
- удельным потреблением электрической энергии на перекачивание 1 м<sup>3</sup> воды –  $\rho = 99\,466 / 440\,642 = 0,2257 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ .

За счет модернизации трех насосных агрегатов ОНС и разработки рекомендаций по энергоэффективному режиму водоснабжения насосной станцией, процент достигнутой экономии составляет

$$N = 100 \cdot (0,2257 - 0,1585) / 0,2257 = 29,77\%.$$

При этом, исходя из среднесуточного потребления электроэнергии насосными агрегатами ОНС на уровне 99 466 кВт·ч, годовая экономия электроэнергии насосными агрегатами этой станции после модернизации составляет:

$$W = 99\,466 \times 0,2977 \times 365 = 10\,808\,025 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

### Список литературы

1. Ковалко М.П., Денисюк С.П. Энергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України/За ред. А.К. Шидловського. – К.: УЕЗ, 1998. – 506 с.
2. Бешта А.С., Азюковский А.А. Выбор рационального способа регулирования подачи воды насосным агрегатом //Технічна електродинаміка. – 2009. – С. 65-71
3. Бойко В.С., Сотник М.І., Хованський С.О. Підвищення енергетичної ефективності водопостачання локального об'єкту //Промислова гідравліка і пневматика. – 2008. – Вип. 1(19). – С. 100-103.