

Н.В. Грунтович,
д.т.н, профессор, ООО «ЦНППЭ»
(Беларусь) – Брянский государственный
аграрный университет (Россия)



Д.Р. Мороз,
к.т.н., директор РУП
«Белгипрогаз»



А.А. Капанский,
м.т.н., УО «Гомельский
государственный технический
университет им. П.О. Сухого»



РАЗВИТИЕ МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

Аннотация

Предложена система управления энергоэффективностью для технологических систем со сложной взаимосвязью между энергетикой и технологией. Ключевой элемент системы управления энергоэффективностью – модель общего (удельного) расхода электрической энергии от воздействующих факторов. Модель позволяет сформировать методическое обеспечение диагностирования и прогнозирования энергоэффективности в технологических системах водоснабжения и водоотведения.

Abstract

The management system for energy efficiency control in technology systems characterized by a complex interaction of electric power consumption and technology has been developed.

The key element of management system for energy efficiency control is a total consumption model of electrical energy from the influencing factors. The model allows forming methodical maintenance of diagnostics and prediction of energy efficiency in technological systems of water supply and wastewater systems.

Современные технологические системы водоснабжения и водоотведения представляют собой сложнейшие инженерные комплексы, состоящие из отдельных технологических подсистем и функционирующие в условиях внешних и внутренних воздействий (табл. 1). Основным энергетическим ресурсом, обеспечивающим работу технологических систем водоснабжения и водоотведения, является электрическая энергия (ЭЭ). Как потребители ЭЭ технологические системы водоснабжения и водоотведения характеризуются сложной взаимосвязью между энергетикой и технологией. Это означает, что на конечное потребление ЭЭ, затрачиваемой либо на подъем воды (система водоснабжения) либо перекачку и очистку сточных вод (система водоотведения) влияет значительное количество технологических факторов. Поэтому для таких потребителей сложной и актуальной остается проблема методического обеспечения диагностирования и прогнозирования общих и удельных расходов ЭЭ при учете множества влияющих факторов.

Так, например, расход ЭЭ в системе водоснабжения может включать в себя затраты, связанные с работой насосных агрегатов станций первого и второго подъема, подкачивающих насосных станций третьего подъема, технологических установок водоподготовки, и общезаводские нужды предприятия. Реализация мероприятий Государственной программы «Чистая вода» на 2011–2015 годы способствует развитию системы питьевого водоснабжения, повышению качества подаваемой потребителям питьевой воды, улучшению защиты подземных и поверхностных источников питьевого водоснабжения от загрязнения. Увеличение расхода электроэнергии напрямую связано с развитием системы водоснабжения, которое предусматривает плановый рост водоснабжающих сетей. С другой стороны, водоканалы республики активно внедряют мероприятия по энергосбережению, что обеспечивает снижение удельных и общих расходов ЭЭ. На формирова-

ние удельных расходов ЭЭ оказывает влияние и изменяющаяся производственная программа.

На рисунке 1 представлена структура системы управления энергоэффективностью для технологических систем со сложной связью между энергетикой и технологией. Впервые такая система была апробирована для предприятий трубопроводного транспорта нефти и предприятий по производству химических волокон. Время показало ее состоятельность и жизнеспособность. Комплексный подход к управлению энергетической эффективностью основан на модели электропотребления, а точнее на аддитивной, многофакторной регрессионной модели общего (удельного) расхода ЭЭ.

Данная система может использоваться и для управления ЭЭФ других трубопроводных технологических систем (системы газоснабжения, системы водоснабжения). При этом комплексная система управления

ЭЭФ может дополняться новыми элементами и методами, учитывающими особенности строения и функционирования объектов управления.

Ключевой элемент системы управления – модель общего (удельного) расхода ЭЭ от воздействующих факторов – позволяет:

- диагностировать энергоэффективность существующих режимов производства;
- прогнозировать удельные и общие расходы ЭЭ в условиях изменяющейся производственной программы и прочих влияющих факторов;
- производить оценку горизонтального (за счет роста загрузки технологического оборудования) потенциала повышения ЭЭФ;
- оценивать эффективность внедрения энергосберегающих мероприятий.

Для сложных, современных технологических систем водоснабжения и водоотведения использование известной простейшей аналитической зависимости не позволяет обеспечить требуемую точность расчета норм расхода ЭЭ и методически обеспечить комплекс задач диагностирования и прогнозирования энергоэффективности.

Так, классический подход к оценке общих и удельных расходов ЭЭ насосного оборудования в системе водоснабжения базируется на фактических данных часового расхода воды, расчетном напоре и коэффициенте полезного действия:

$$W_{\text{сети}} = 2,72 \cdot 10^{-3} \cdot \sum_{i=1}^m \left(\frac{Q_{ij} \cdot H_{ij}}{\eta_{ij}} \cdot t_{ij} \right), \text{кВт} \cdot \text{ч},$$

где Q_{ij} – производительность насоса i -м насосом в j -м режиме работы, $m^3/ч$; H_{ij} – потери напора по длине трубопровода с учетом местных потерь, m ; η_{ij} – коэффициент полезного действия агрегата i -го насоса в j -м режиме работы; t_{ij} – время работы i -го насосом в j -м режиме работы, $ч$; n – количество насосных агрегатов, шт.; m – количество режимов работы агрегата; j – индекс, обозначающий режим работы агрегата; i – индекс, обозначающий порядковый номер насосного агрегата.

Учесть указанные факторы не представляется возможным как по причине их низкой достоверности, так и из-за сложности технологической структуры и взаимного влияния технологических подсистем. Аналогичная ситуация и для системы водоотведения.

Альтернативой аналитического подхода является модель расхода ЭЭ от влияющих факторов для системы водоснабжения города, которая для решения задач нормирования представлена в следующем виде:

$$W = f(Q_1, t_{окр}) = w_{уд.тех} \cdot Q_1 + a \cdot t_{окр} + W_{усл.-пост.}, \text{ кВт} \cdot \text{ч/сут},$$

или

$$W = f(Q_1, t_{окр}) = 167,9 \cdot Q_1 - 350,1 \cdot t_{окр} + 69228,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч/сут},$$

где $w_{уд.тех}$ – удельный технологический расход (коэффициент регрессии), $кВт \cdot ч/1000 \text{ м}^3$; Q_1 – количество поднятой воды, м^3 ; a – коэффициент регрессии при температуре, $кВт \cdot ч/^\circ\text{C}$; $t_{окр}$ – температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$; $W_{усл.-пост.}$ – условно-постоянная составляющая расхода ЭЭ, $кВт \cdot ч$.

От модели общего расхода ЭЭ в системе водоснабжения легко перейти к модели удельного расхода ЭЭ:

$$W_{уд} = f(Q, t_{окр}) = w_{уд.тех} + \frac{a \cdot t_{окр} + W_{усл.-пост.}}{Q}, \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{тыс. м}^3,$$

Диагностирование и прогнозирование показателей ЭЭФ на основе аддитивной многофакторной модели зависимости удельных и общих расходов ЭЭ от воздействующих факторов имеет преимущества:

- статистические данные, используемые для разработки моделей, несут информацию о существующих режимах работы промышленных потребителей и соответствующих им потребностях ЭЭ;
- использование суточной (посменной) статистики позволяет учесть большее количество фактических режимов работы ПП по сравнению с использованием квартальной (годовой) статистики, что в конечном итоге повышает достоверность определения удельного расхода энергии;
- для построения моделей расхода ЭЭ используется интегральная характеристика режима электропотребления ▶

Таблица 1. Комплексное описание технологических систем водоснабжения и водоотведения

Технологические подсистемы	Показатели	Водо-забор 1	Водо-забор 2	Водо-забор 3	Водо-забор 4	Водо-забор 5
СИСТЕМА ВОДОСНАБЖЕНИЯ						
Подсистема скважин	Количество скважин, шт	22	10	42	12	10
	Установленная мощность скважинных насосов, кВт	374,5	260	более 580	248,5	230
Подсистема насосного оборудования второго подъема	Количество насосов станции 2-го подъема для подачи в сеть, шт.	2+2	4	6	3	3
	Установленная мощность насосов станции 2-го подъема, кВт	820	800	3700	630	575
Подсистема резервуаров	Количество и объем регулирующих емкостей	2 шт. – 2500 м ³	2 шт. – 7000 м ³	2 шт. – 15000 м ³	3 шт. – 1000 м ³	2 шт. – 3000 м ³
Вода	Проектная производительность, тыс. м ³ /сут	21	24,8	88	более 2	более 2
Подсистема водопроводных сетей	Диаметр и количество подающего трубопровода	Ø 630 мм - 2	Ø 800 мм - 2	Ø 1000 мм - 2	Ø 400 мм - 1 Ø 250 мм - 1	Ø 400 мм - 2
	Общая протяженность сетей водоснабжения, км	более 900				
СИСТЕМА ВОДООТВЕДЕНИЯ						
Подсистема канализационно-насосных станций	Количество канализационно-насосных станций, шт.	65				
	Суммарная мощность (фактическая) КНС, кВт	более 485				
Подсистема канализационных сетей	Общая протяженность сетей водоотведения, км	554,4				
Подсистема стоков	Среднесуточный прием стоков станции очистки, тыс. м ³ /сут	124				
Подсистема очистных сооружений	Суммарная мощность (фактическая) станции очистных сооружений, кВт	2436				

Риснок 1. Структура системы управления энергоэффективностью для технологических систем со сложной связью между энергетикой и технологией

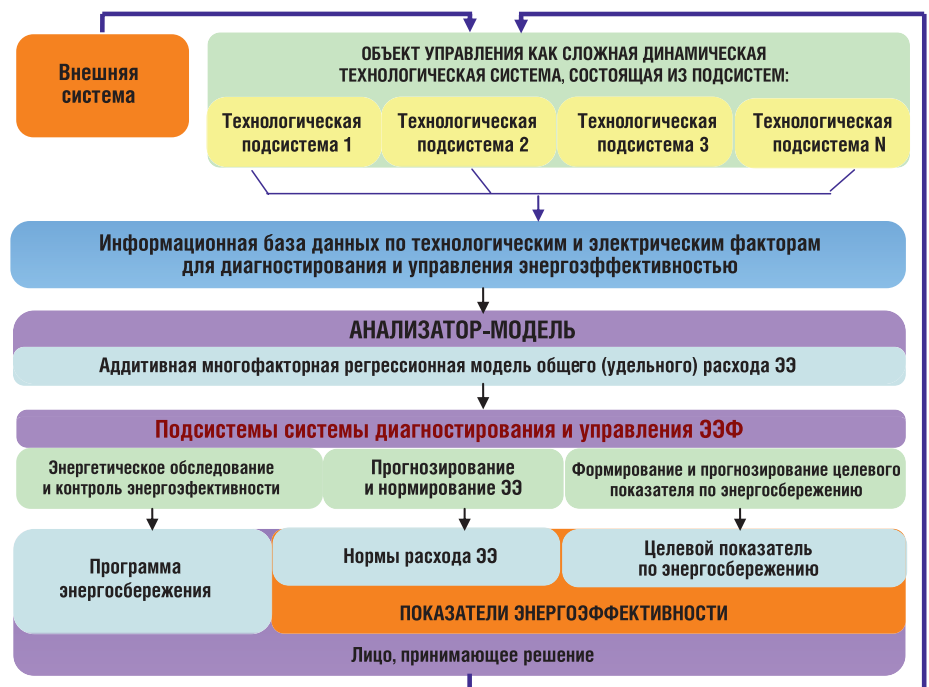
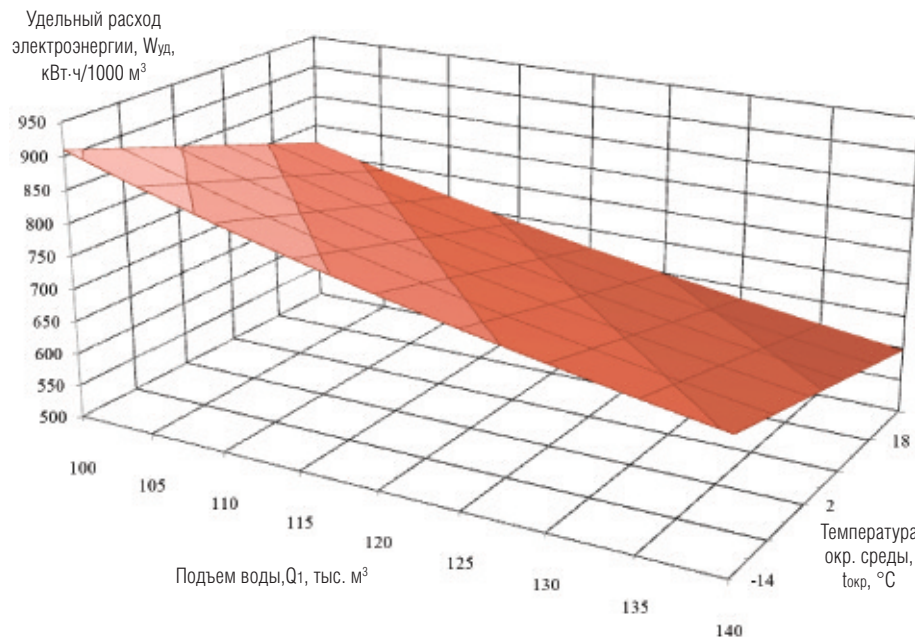


Рисунок 2. Графическая интерпретация изменения удельного расхода электроэнергии при изменении подачи воды и температуры окружающей среды городской системы водоснабжения



(суммарный расход ЭЭ промышленных потребителей), что позволяет не учитывать режим работы каждого электроприемника в отдельности.

На рисунке 2 зависимость общего расхода ЭЭ от двух переменных представлена в виде плоскости в трехмерном пространстве.

Установлено, что при самой высокой среднесуточной температуре 2013 года (25,8°C) окружающей среды расход ЭЭ городской системы водоснабжения уменьшается 10,9%, а при самой низкой (-14,6°C) – увеличивается на 5,4%. Рост температуры на 1°C приводит к снижению электропотребления на 350,1 кВт·ч и уменьшению удельного расхода на 0,4%.

Более 79% общего электропотребления не зависят от объемов производства и являются условно-постоянной составляющей модели, что большей частью обусловлено строгим временным регламентом работ технологических установок, обеспечивающих необходимое качество воды.

Увеличение объема потребляемой воды на 1 тыс. м³ приводит к увеличению электропотребления на 167,9 кВт·ч и снижению удельного расхода (при среднегодовых показателях) на 0,6%.

На основе разработанной модели возможно прогнозировать изменение удельного расхода ЭЭ при учете таких факторов как годовой объем производства; внедрение мероприятий по энергосбережению; ввод в эксплуатацию дополнительных сетей.

На рисунке 3 представлены результаты моделирования в системе водоснабжения при учете указанных факторов.

Как видно из рисунка 3, в базисном 2013 году при годовом объеме производства $Q_1=45500$ тыс. м³ значение удельного расхода ЭЭ составило $W_{уд.}=723,2$ кВт·ч/тыс. м³. Корректируя условно-постоянную составляющую расхода ЭЭ на величину экономии ЭЭ за счет мероприятий по энергосбережению и рост ЭЭ за счет ввода в эксплуатацию новых сетей, рассчитывается соответствующее значение удельного расхода ЭЭ 2015 года, которое составляет 689,8 кВт·ч/тыс. м³. То есть общее повышение энергоэффективности системы водоснабжения составляет 4,6%. Однако в условиях снижения объемов производства в 2015 году (ввиду активной экономии населением водных ресурсов) с 45500 тыс. м³ до 41500 тыс. м³ энергоэффективность системы снизится на

7,5% (в условиях роста удельного расхода ЭЭ до 741,3 кВт·ч/тыс. м³).

Аналогичные подходы используются и в системе водоотведения. Базисный вид модели для системы водоотведения может быть представлен трехфакторной моделью, где в качестве факторов приняты объемы стоков – $Q_{сток}$, температура окружающей среды – $t_{окр}$, количество выпавших осадков $N_{осад}$. Для исследуемой городской системы водоотведения получена многофакторная модель суточного электропотребления:

$$W(Q_{сток}, t_{окр}, N_{осад}) = 303,7 \cdot Q_{сток} - 175,5 \cdot t_{окр} - 221,7 \cdot N_{осад} + 24544,1,$$

где $Q_{сток}$ – суточный объем стоков, тыс. м³; $t_{окр}$ – температура окружающей среды, °C; $N_{осад}$ – количество выпавших осадков, мм.

От текущей модели общего расхода ЭЭ осуществляется переход к модели удельного расхода ЭЭ:

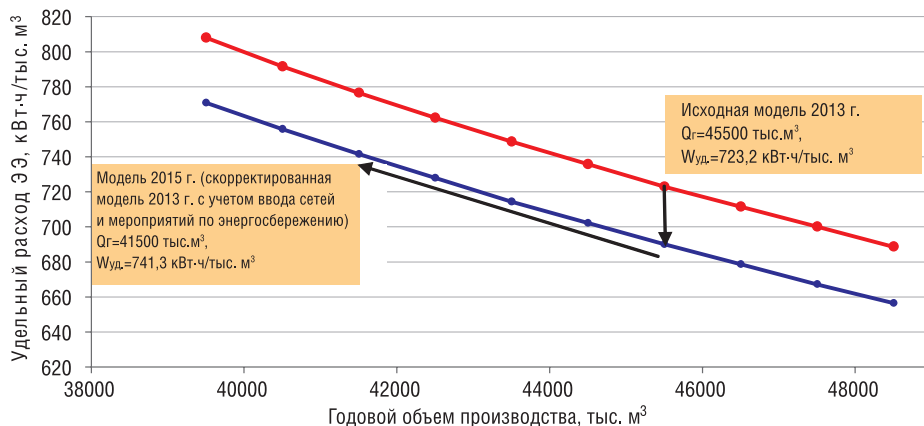
$$W_{уд} = f(Q, t_{окр}, N_{осад}) = w_{уд.тех} + \frac{a \cdot N_{осад} + b \cdot t_{окр} + W_{оз}}{Q_{сток}}, \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{тыс. м}^3},$$

где a – коэффициент регрессии перед фактором количества выпавших осадков, кВт·ч/мм; b – коэффициент регрессии перед фактором температуры окружающей среды, кВт·ч/°C.

Следует отметить, что число факторов, включаемых в модель для каждой технологической системы, определяется во многом как наличием, так и уровнем развития автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП), позволяющей накапливать часовые, суточные массивы статистической информации, которые могут в дальнейшем и составить информационную основу для построения моделей.

Графические интерпретации полученных моделей позволяют наглядно представить изменение энергоэффективности технологических систем водоснабжения и водо-

Рисунок 3. Результаты прогнозирования удельных расходов ЭЭ в системе водоснабжения



отведения от влияющих факторов, и, прежде всего, от изменения производственной программы.

Оценим по результатам расчета удельных норм расхода ЭЭ от годового объема производства горизонтальную регулировочную способность по энергоэффективности (ЭЭФ). Регулировочная способность по ЭЭФ – способность как отдельных структурных элементов, так и всей технической системы в целом изменять удельные и общие расходы энергоресурса (энергоресурсов) в зависимости от воздействующих факторов. Различают горизонтальную регулировочную способность по ЭЭФ (за счет изменения объема выпуска продукции П) и вертикальную регулировочную способность по ЭЭФ (за счет управления технологическими параметрами и характеристиками сырья). Суть горизонтального регулирования $W_{удТЭР}$ состоит в том, что при изменении объемов выпуска продукции (при увеличении или уменьшении загрузки технологического оборудования) рабочая точка гиперболической кривой зависимости $W_{удТЭР} = F(P)$ смещается соответственно в сторону уменьшения или увеличения $W_{удТЭР}$.

Потенциал горизонтального повышения ЭЭФ рассчитывается относительно минимального объема выпуска продукции по выражению:

$$\Delta ЭЭФ = (W_{уд, P_{max}} - W_{уд, P_{min}}) / W_{уд, P_{min}} \cdot 100\%$$

где $W_{уд, P_{max}}$ – значение удельного расхода энергоресурса, соответствующего максимальному объему выпуска продукции;

$W_{уд, P_{min}}$ – значение удельного расхода

энергоресурса, соответствующего минимальному объему выпуска продукции.

Как показали расчеты, горизонтальная регулировочная способность по энергоэффективности для исследуемой технологической системы городского водоснабжения составляет 14,8% относительно минимальной производительности в 39500 тыс. м³:

$$\Delta ЭЭФ = (W_{уд, P_{max}} - W_{уд, P_{min}}) / W_{уд, P_{min}} \cdot 100\% = (656,7 - 771,1) / 771,1 \cdot 100\% = -14,8\%$$

Выводы

1. Развитие методического обеспечения диагностирования и прогнозирования энергоэффективности технологических систем водоснабжения и водоотведения со сложной взаимосвязью между энергетикой и технологией должно быть основано на аддитивных многофакторных регрессионных моделях общих и удельных расходов ЭЭ от влияющих факторов.

2. Число факторов, включаемых в модель для каждой технологической системы, определяется во многом как наличием, так уровнем развития автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) технологических систем водоснабжения и водоотведения, позволяющим накапливать часовые, суточные массивы статистической информации, которые могут в дальнейшем и составить информационную основу для построения моделей.

3. Модель общего (удельного) расхода ЭЭ от воздействующих факторов позволяет:

- диагностировать энергоэффективность существующих режимов производства;
- прогнозировать удельные и общие расходы ЭЭ в условиях изменяющейся производственной программы и прочих влияющих факторов;
- производить оценку горизонтального (за счет роста загрузки технологического оборудования) потенциала повышения ЭЭФ;
- оценивать эффективность внедрения энергосберегающих мероприятий.

Литература

1. Токоцакова Н.В. Управление энергоэффективностью промышленных потребителей на основе моделирования режимов электропотребления. // Энергетика (Изв. высш. учеб. заведений и энергет. объедин. СНГ). – 2006. – №2. – С. 39.
2. Токоцакова Н.В., Мороз Д.Р. Расчетно-статистические модели режимов потребления электроэнергии как основа нормирования и оценки энергетической эффективности. // Энергоэффективность. – 2006. – №1. – С. 14–15, 2006. – №2. – С. 14–15. ■

Статья поступила в редакцию 10.03.2015

На основе разработанной модели возможно прогнозировать изменение удельного расхода ЭЭ при учете таких факторов как годовой объем производства; внедрение мероприятий по энергосбережению; ввод в эксплуатацию дополнительных сетей.

- ✓ **Нормирование расходов ТЭР (расчет, корректировка, сопровождение)**
- ✓ **Тепловизионное обследование (сооружений, оборудования)**
- ✓ **Составление энергетического (теплоэнергетического) паспорта зданий**
- ✓ **ТЭО вариантов теплоснабжения (расчет, сопровождение)**
- ✓ **Составление экологического паспорта организации**

Работаем по всей стране

Частное предприятие
«Альтернативный вариант»

212013, г. Могилев,
Славгородское шоссе,
30/в

☎ 8 (029) 305-00-59,
факс 8 (0222) 78-02-72
e-mail: alvariant@mail.ru

ИП «Иста Митеринг Сервис» • 220034, г. Минск, ул. 3. Бядали, 12
тел.: (017)294-3311, 293-6849, 283-6858; факс: (017)293-0569
e-mail: minsk@ista.by • http://www.ista.by
отдел расчетов: (017)290-5667 (-68) • e-mail: billing@ista.by



- Система индивидуального (поквартирного) учета тепловой энергии на базе распределителей тепла «Экземпер», «Допримо III», «Допримо III радио»: от монтажа приборов до абонентских расчетов для десятков тысяч потребителей.
- Энергосберегающее оборудование «Данфосс», «Заутер», «Петтинароли»: радиаторные термостаты, системы автоматического регулирования отопления зданий, арматура.
- Приборы учета тепловой энергии «Сенсоник II» и «Комби-метр» с расходом теплоносителя от 0,6 до 180 м³/ч с возможностью удаленного сбора информации.
- Запорно-регулирующая арматура: шаровые краны, радиаторные вентили, задвижки, фильтры, компенсаторы, обратные клапаны и т.д.
- Насосное оборудование «Грундфос».