

УДК 621.311

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

**А. А. КАПАНСКИЙ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### **Введение**

Одной из важнейших задач в современных социальных условиях является обеспечение населения качественной питьевой водой и создание благоприятных условий проживания [1]. В настоящее время услуги водоснабжения и канализации оказывают 1460 организаций Республики Беларусь, из них 144 организации относятся к системе Министерства жилищно-коммунального хозяйства. При этом на долю организаций жилищно-коммунального хозяйства приходится более 85 % объема оказываемых услуг.

Современные системы водоснабжения представляют технологические комплексы со сложной взаимосвязью между энергетикой и технологией. Это означает, что на конечное потребление электроэнергии (ЭЭ) каждой технологической системы оказывает влияние большое количество внешних и внутренних факторов. С другой стороны, технологические системы водоснабжения являются сложными техническими системами, состоящими из нескольких подсистем с большим количеством элементов.

Так, например, расход ЭЭ в системе водоснабжения может включать в себя затраты, связанные с работой насосных агрегатов (НА) 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 гг. способствует развитию системы питьевого водоснабжения, повышению качества подаваемой потребителям питьевой воды, улучшению защиты подземных и поверхностных источников питьевого водоснабжения от загрязнения [2].

Увеличение расхода электроэнергии напрямую связано с развитием системы водоснабжения, которое предусматривает плановый рост трубопроводных сетей. В связи с чем ставится актуальная задача формирования общих принципов моделирования электропотребления в системе водоснабжения, позволяющих осуществлять анализ энергоэффективности (ЭЭФ) работы предприятия, производить оценку результативности внедряемых мероприятий по энергосбережению, прогнозировать плановую потребность электрической энергии в условиях изменяющейся производственной программы.

### **Энергетическая характеристика системы водоснабжения**

Основным энергетическим ресурсом, обеспечивающим работу технологических систем водоснабжения, является электрическая энергия. Как потребитель ЭЭ рассматриваемая система характеризуется сложной связью между внутренними подсистемами, технические показатели которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Комплексное описание технологической системы водоснабжения

Технологические подсистемы	Показатели	Водозабор	Водозабор	Водозабор	Водозабор	Водозабор
		1	2	3	4	5
Подсистема скважин	Количество скважин, шт.	22	10	42	12	10
	Установленная мощность НА, 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	4	6	3	3
	Установленная мощность насосов сеть станции 2-го подъема, кВт	820	800	3700	630	575
Подсистема резервуаров	Количество и объем регулирующих емкостей	2 шт. – 2500 м <sup>3</sup>	2 шт. – 7000 м <sup>3</sup>	2 шт. – 15000 м <sup>3</sup>	3 шт. – 1000 м <sup>3</sup>	2 шт. – 3000 м <sup>3</sup>
Подсистема воды	Проектная производительность, тыс. м <sup>3</sup> /сут	21	24,8	88	более 2	более 2
Подсистема водопроводных сетей	Диаметр и количество подающих трубопроводов	∅ 630 мм 2 шт.	∅ 800 мм 2 шт.	∅ 1000 мм 2 шт.	∅ 400 мм 1 шт. ∅ 250 мм 1 шт.	∅ 400 мм 2 шт.
	Общая протяженность сетей водоснабжения, км	более 900				
Подсистема подкачивающих насосных станций	Количество, шт.	39				

Система водоснабжения характеризуется наличием нижеприведенных подсистем.

*Подсистема скважин.* Основными потребителями электроэнергии являются насосы погружного типа, обеспечивающие подъем воды из природных источников к местам ее очистки, хранения или потребления.

*Подсистема очистки воды.* Подсистема включает в себя установки и фильтры обезжелезивания, которые предусматривают очистку воды до качества, соответствующего требованиям СанПиН 10-124 РБ–99. Здесь основные затраты ЭЭ приходятся на работу высоконапорных промывных насосов, время работы которых определяется установленным регламентом исходя из интенсивности очистки.

*Подсистема резервуаров чистой воды.* Накопительная емкость, располагающаяся между подсистемой очистки питьевой воды и подсистемой насосного оборудования второго подъема. Потребителем электроэнергии не является, однако выполняет функции регулирующей и запасной емкости, динамика изменения воды в которой отражается на общем электропотреблении из-за разности значений удельных расходов ЭЭ на подъем и подачу воды потребителю.

*Подсистема насосного оборудования второго подъема,* предназначена для подачи воды в городскую водопроводную сеть. Является наиболее энергоемким потребителем электрической энергии из рассматриваемых подсистем.

*Подсистема подкачивающих насосных станций*, предназначена для поддержания давления воды в наиболее удаленных точках системы на требуемом уровне. Потребителями электрической энергии являются насосы повышения давления. Как правило, установленная мощность насосных агрегатов данной подсистемы значительно меньше рассмотренных.

*Подсистема водопроводных сетей* – совокупность водопроводных линий для подачи воды к месту потребления. Обуславливает затраты электроэнергии на компенсацию потерь напора при транспортировке питьевой и технической воды.

*Подсистема воды*. Характеризует систему количественными (объем воды) и качественными признаками (температура, химические показатели).

Взаимосвязи между рассмотренными подсистемами представлены на рис. 1.

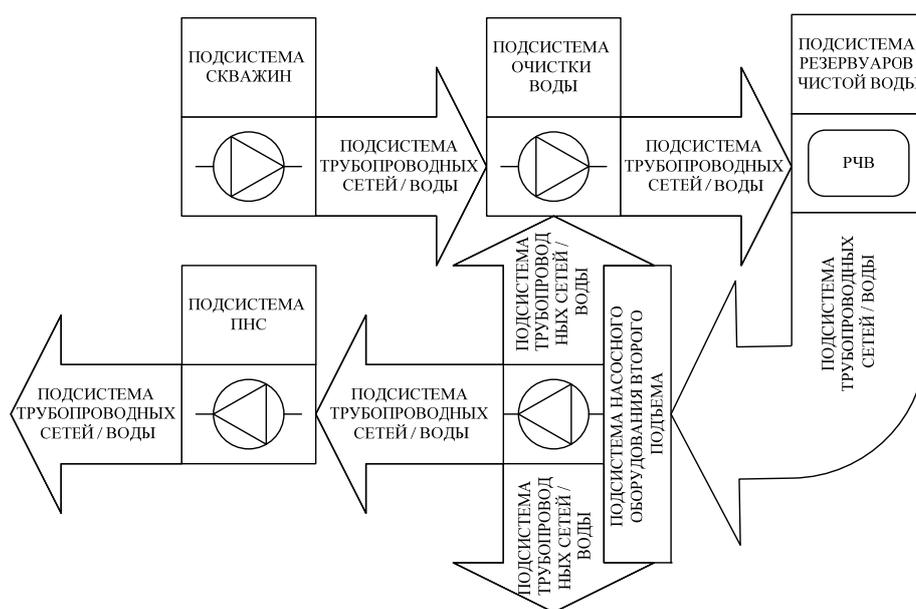


Рис. 1. Взаимодействие подсистем системы водоснабжения

Комплексный подход к управлению энергетической эффективностью в технологической системе водоснабжения основан на модели электропотребления, а точнее на аддитивной, многофакторной регрессионной модели общего (удельного) расхода ЭЭ [3], [4]. В роли факторов могут выступать различные показатели подсистем, такие как:

- объемы поднятой из скважин или поданной потребителю воды;
- температура окружающей среды и др.

Основой системы управления является информационная база данных (ИБД), состоящая из энергетических, гидравлических и производственных показателей системы. Статистическая выборка ИБД используется для разработки математической модели методами регрессионного анализа, которая в дальнейшем позволяет решать задачи эффективного энергоуправления [5], [6].

#### **Накопление статистических данных и выбор оптимального периода дискретизации**

На стадии моделирования электропотребления, при обработке перечня исходной информации должна быть сформирована ИБД, содержащая значения всех параметров, учет которых производится на предприятии, и ранжированная по степени важности отражения этих параметров в конечной математической модели.

Точность построения модели определяется накопленной статистической информацией, представляющей собой временные ряды, период накопления которых может быть классифицирован по степени дискретизации [7]:

а) часовая выборка – отражает изменение параметров в системе водоснабжения за каждый час. К достоинствам такой выборки можно отнести возможность включения в модель значений сетевого давления, которые ежечасно фиксируются в журналах работы насосных станций. Недостатком такой статистики является громоздкость исходной информации;

б) сменная выборка – включает в себя значения параметров, фиксируемых в начале и в конце смены. Сбор данной статистики не приемлем в виду непрерывного режима работы производства в системе водоснабжения;

в) суточная выборка – отражает изменения параметров в течение суток. Наиболее удобный при обработке вид статистической информации, позволяет учесть сезонность режимов электропотребления. Недостатком такой статистики является суточное усреднение графиков давления в системе водоснабжения. Однако зачастую среднесуточное давление насосных станций в системе водоснабжения не изменяется, либо изменяется незначительно, что позволяет исключить из модели этот фактор и соответственно упростить математическое описание электропотребления. Получение данных суточной статистики затруднительно для предприятий, не оснащенных системой автоматизированного учета электроэнергии;

г) месячная выборка – характеризуется значениями потребления электрической энергии и показателями производственной деятельности в течение месяца. Недостатком данного вида статистики является длительный период дискретизации. Использование рассмотренного уровня дискретизации данных возможно лишь при однофакторном моделировании режимов электропотребления при достаточном объеме исходной информации. Построение модели с большим количеством факторов на основании месячной статистики приводит к значительным погрешностям;

д) квартальная выборка – вид статистики, основанный на данных государственной статистической отчетности (4-нормы ТЭР), значения которых отражаются ежеквартально. На основании квартальной статистики предпочтительно производить проверку адекватности модели. Использование квартальной статистики для построения расчетно-статистических моделей не рекомендуется.

Формирование ИБД в системе водоснабжения включает в себя обработку данных ежесуточного потребления электрической энергии водозаборов по данным журналов смены (АСКУЭ или счетчиков учета ЭЭ), журналов работы насосных станций, определяемых регламентом водозабора:

- 1) журнал учета работы скважин;
- 2) журнал машиниста насосных установок 2-го подъема;
- 3) журнал промывки фильтров.

При отсутствии возможности сбора суточной информации о потреблении ЭЭ на каком-либо объекте рекомендуется усреднить имеющиеся значения (недельные, месячные, квартальные и др.) до требуемого уровня дискретизации и включить эти значения в общую базу статистических данных:

$$\bar{x}_{\text{cp}} = \frac{1}{T} x, \quad (1)$$

где  $x$  – значения фактора ИБД с периодом дискретизации  $T$ ;  $T$  – период дискретизации фактора  $x$ , сут;  $\bar{x}_{\text{cp}}$  – суточное усреднение фактора  $x$ .

Такой подход позволит учесть все затраты энергоресурсов на подъем и подачу воды, однако при этом приведет к снижению качества математической модели электропотребления в целом, пригодность использования которой будет определяться после верификации полученных результатов.

Минимальный объем ИБД определится по выражению [8]:

$$\bar{x}_{\text{ср}} = \frac{1}{T} x. \quad (2)$$

Максимальная погрешность технических расчетов для целей моделирования режимов электропотребления не должна превышать 5 %, тогда необходимый объем выборки будет описываться суточной статистикой, охватывающей один год (365 сут).

### Выбор оптимального периода сглаживания информационной выборки

Информационная статистическая выборка по своей сути является динамическим рядом, сформированным на основе фактических данных на протяжении исследуемого временного интервала. Одной из основных задач при исследовании динамических рядов является анализ основных влияющих составляющих. К таким составляющим относят тенденцию, выражаемую трендом, сезонные и случайные колебания [9].

Тенденция вызвана влиянием определенных факторов, вызывающих либо постоянный подъем, либо постоянное снижение исследуемого признака. Сезонные колебания формируются под воздействием периодических составляющих, к примеру, из-за влияния на исследуемый признак температуры наружного воздуха. Колеблющийся ряд представляет собой случайные колебания, способствующие увеличению разброса входных параметров статистической выборки. Для снижения влияния разброса на результат моделирования используют инструмент сглаживания входных параметров. Наиболее распространенной процедурой сглаживания является метод простой скользящей средней [10]. При использовании данного метода используется следующая последовательность действий [10]:

1. Определяется длина интервала сглаживания.
2. Исследуемая выборка разбивается на участки, при этом интервал сглаживания скользит по ряду шаг за шагом.
3. Рассчитывается среднее арифметическое каждого участка [11] по формуле

$$\bar{x}_{\text{сгл}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} x_i}{n}, \quad (3)$$

где  $\bar{x}_{\text{сгл}}$  – сглаженное значение параметра;  $x_i$  –  $i$ -е значение параметра ряда;  $n$  – период сглаживания, сут.

4. Заменяются фактические значения ряда на сглаженные.

Для исследуемой системы выбор оптимального периода сглаживания предлагается определять по критерию, основанному на минимизации среднеквадратического отклонения погрешности моделирования:

$$n = \arg \min \sigma_{\text{погр}}(n). \quad (4)$$

Сформированная суточная база статистических данных за один год (365 сут) позволила произвести оценку изменения среднеквадратического отклонения погрешности модели  $\sigma_{\text{погр}}$  при увеличении периода усреднения  $n$ , которая выражается полиномиальной зависимостью вида

$$\sigma_{\text{погр}} = f(n) = an^2 - bn + c, \quad (5)$$

где  $a, b, c$  – параметры полинома.

Минимальное значение  $\sigma_{\text{погр}}$  находится в точке перелома функции  $\sigma_{\text{погр}} = f(n)$ , период сглаживания которого определяется в результате решения уравнения

$$\sigma'_{\text{погр}} = f'(n) = 2an - b = 0. \quad (6)$$

На рис. 2 представлены результаты исследования периода сглаживания на среднеквадратическую погрешность модели.

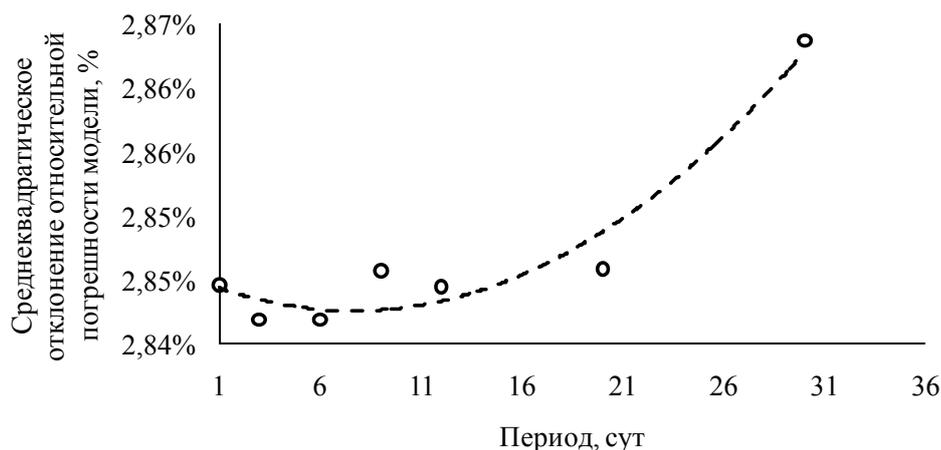


Рис. 2. Результаты аппроксимации функции  $\sigma_{\text{погр}} = f(n)$

Таким образом, оптимальный период сглаживания выражается зависимостью

$$n = \arg \min \sigma_{\text{погр}}(n) = \frac{b}{2a}. \quad (7)$$

В числовой форме параметры полинома составили  $a = 4 \cdot 10^{-7}$ ,  $b = 5,9 \cdot 10^{-6}$ ,  $c = 0,0284$ , при этом оптимальный период сглаживания равен  $n \approx 7$  сут, что соответствует календарной рабочей неделе предприятия. Выбранный период сглаживания позволяет снизить влияние разброса статистических данных путем усреднения производственных показателей в рабочие и выходные дни с минимальной погрешностью моделирования.

### Коллинеарность входных параметров модели

При построении модели в роли факторов могут выступать как качественные (плотность, вязкость и др.), так и количественные (объемы поднятой и поданной воды) показатели, режимы работы насосных агрегатов, изменение давления в диктующих точках системы или насосных станций, характеристики окружающей среды (температура, влажность и др.).

Классическая аддитивная многофакторная регрессионная модель должна удовлетворять различным условиям теоремы Гаусса–Маркова [12], [13], одно из которых основано на линейности модели, ее определенности и отсутствии коллинеарности входных параметров.

На практике возникают случаи, когда между объясняющими переменными присутствует наличие высокой взаимной коррелированности. Наличие линейной взаимосвязи между входными параметрами может привести к искажению оценок коэффициентов регрессии. К примеру, многофакторная модель суточного электропотребления в системе водоснабжения может быть представлена следующим образом:

$$W = f(Q_1, Q_2, t_{\text{окр}}) = w_{\text{уд.тех}}^1 Q_1 + w_{\text{уд.тех}}^2 Q_2 + W_{\text{усл.п}}, \quad (8)$$

где  $w_{\text{уд.тех}}^1$  – коэффициент регрессии при объемах поднятой воды, кВт · ч/1000 м<sup>3</sup>;  $w_{\text{уд.тех}}^2$  – коэффициент регрессии при объемах поданной воды, кВт · ч/1000 м<sup>3</sup>;  $Q_1, Q_2$  – соответственно количество поднятой и поданной воды, тыс. м<sup>3</sup>;  $W_{\text{усл.п}}$  – условно-постоянный расход ЭЭ, кВт · ч.

Факторными признаками рассматриваемой модели служат значения подъема и подачи воды потребителю, которые связаны между собой линейной зависимостью:

$$Q_1 = f(Q_2) = Q_2 + Q_{\text{тех}}, \quad (9)$$

где  $Q_{\text{тех}}$  – расход воды на технологические нужды предприятия, тыс. м<sup>3</sup>:

$$Q_{\text{тех}} = \sum_i^n \left( \frac{860 I n F_{\text{ф.об}i} t_{\text{пром}i}}{T_{\text{ц}}} \right) 10^{-3}, \quad (10)$$

где  $n$  – количество фильтров, шт.;  $I$  – интенсивность промывки, л/(с · м<sup>2</sup>);  $F_{\text{ф.об}i}$  – площадь  $i$ -го фильтра, м<sup>2</sup>;  $t_{\text{пром}i}$  – время промывки, с;  $T_{\text{ц}}$  – промывочный цикл, ч.

Приведенные зависимости (9), (10) свидетельствуют о том, что изменение подачи воды потребителю не оказывает влияния на изменение технологических расходов воды. В действительности, технологические нужды предприятия по большей части определяются объемом воды, необходимым для проведения технологических работ, перечень и время проведения которых определяется на основании регламентов водозаборов.

Во избежание ошибок при моделировании электропотребления из-за наличия коллинеарности входных параметров целесообразно провести исследование формирующих факторов на основе корреляционного анализа, в результате которого устанавливается сила связи между рассматриваемыми факторами. Так, например, в результате корреляционного анализа установлена сильная связь между подъемом и подачей воды с коэффициентом корреляции  $r = 0,91$ .

Линейная взаимосвязь между объемами поднятой и поданной воды наблюдается на корреляционном поле рис. 3.

Одним из способов устранения коллинеарности является исключение одной из коррелирующих переменных из модели. Какую именно переменную исключать, как правило, решают на основании технических соображений. Поскольку текущая система нормирования в системе водоснабжения предполагает отнесение энергозатрат на объемы поднятой из подземных источников воды, тогда в качестве исключаемой переменной принимается фактор объема подачи воды потребителю.

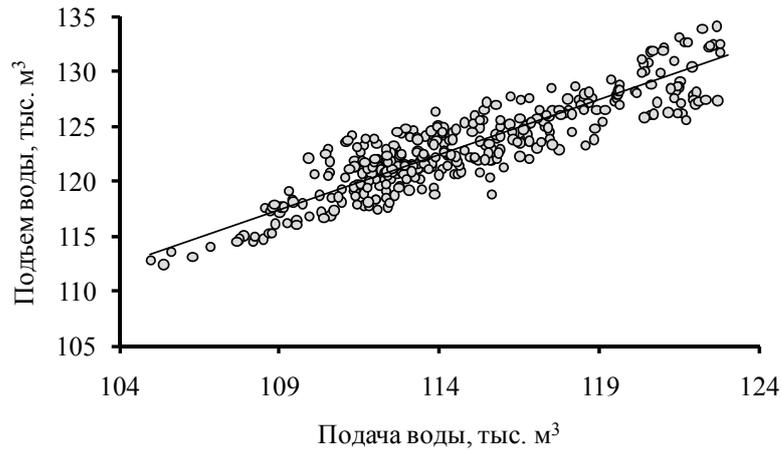


Рис. 3. Графическое определение взаимосвязи между факторными признаками

**Обоснование факторов, включенных в модель**

Предположим, что динамика электропотребления в системе водоснабжения может быть описана однофакторной математической моделью вида

$$W = w_{уд.тех} Q_1 + W_{усл.п.} \tag{11}$$

Зависимости фактического и смоделированного суточного электропотребления при изменении объемов воды приведены на рис. 4.

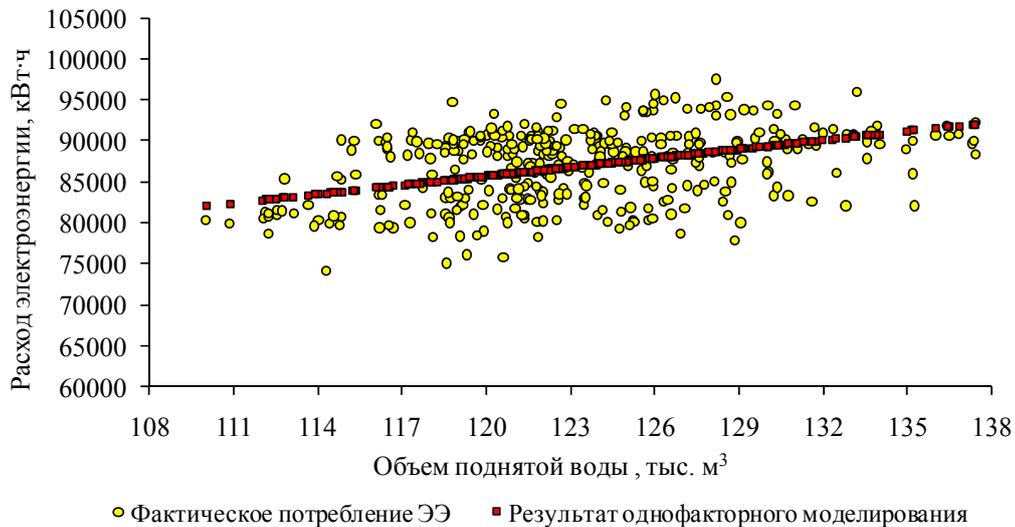


Рис. 4. Сравнение фактического электропотребления с результатами однофакторной модели

Очевидно, что приведенная модель в полной мере не отражает фактическую величину электропотребления. Коэффициент детерминации составил  $R^2 = 0,15$ , т. е. объемы поднимаемой из скважины воды характеризуют не более 15 % изменения электропотребления. Проверка модели на гомоскедастичность указывает на наличие сезонности (рис. 5), динамика которой повторяет поведение температуры окружающей среды  $t_{окр}$  с сильной обратной корреляционной взаимосвязью  $r = -0,76$ .

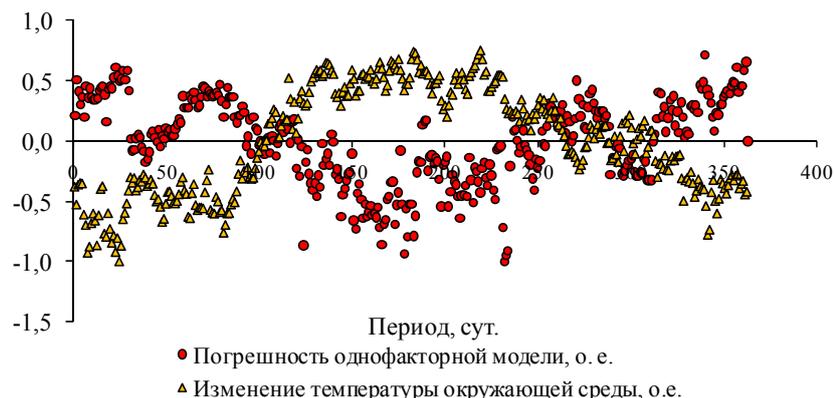


Рис. 5. Динамика погрешности однофакторной модели и изменение температуры окружающей среды в относительных единицах

Включение в модель фактора температуры окружающей среды позволило скомпенсировать погрешность модели и повысить точность прогноза электропотребления. Коэффициент детерминации  $R^2$  модели составил 0,82, среднеквадратическое отклонение погрешности при определении суточного электропотребления менее 3 %, при этом погрешность годового прогнозирования составляет менее 5 %, что говорит о высоком качестве модели. Сравнительные характеристики фактических и смоделированных значений электропотребления представлены на рис. 6.

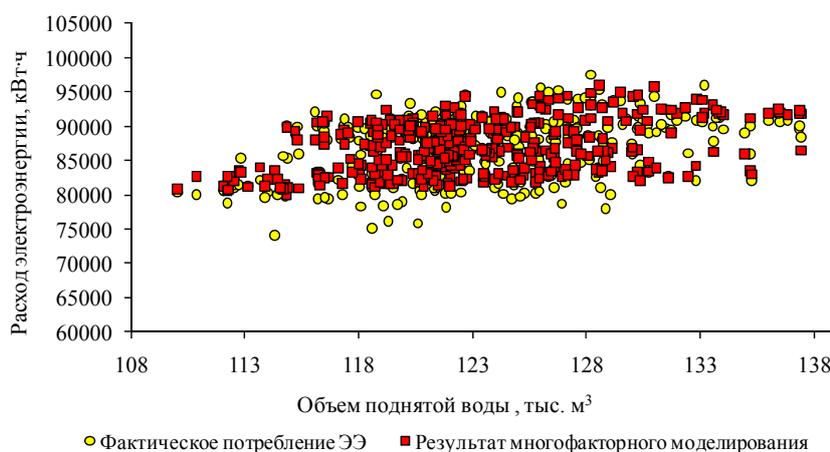


Рис. 6. Сравнение результатов моделирования с фактическим электропотреблением

Полученная многофакторная математическая модель электропотребления может быть представлена в виде плоскости в трехмерном пространстве, приведенной на рис. 7.

Таким образом, многофакторная модель в системе водоснабжения может быть представлена:

$$W = f(Q_1, t_{\text{окр}}) = w_{\text{уд.тех}} Q_1 + a t_{\text{окр}} + W_{\text{усл.п}}, \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (5)$$

или

$$W = f(Q_1, t_{\text{окр}}) = 167,9 Q_1 - 350,1 t_{\text{окр}} + 69228,3, \text{ кВт} \cdot \text{ч/сут}, \quad (5)$$

где  $a$  – коэффициент регрессии при температуре;  $t_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды, °С.

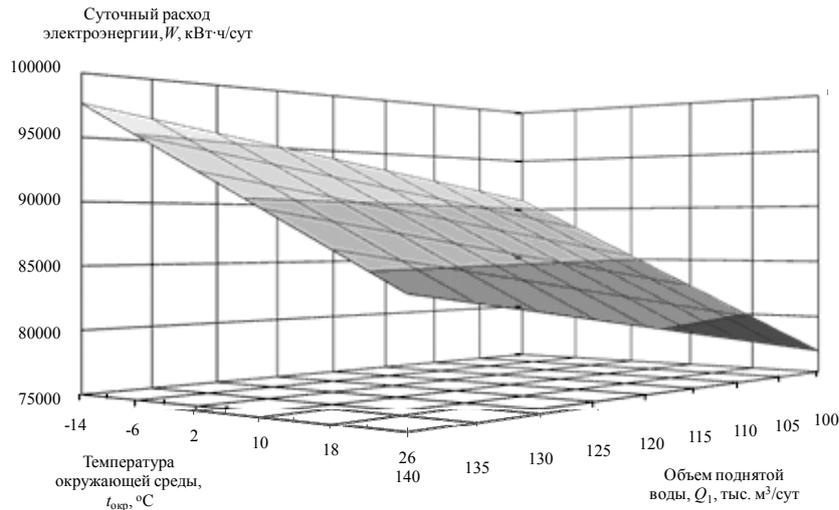


Рис. 7. Графическая интерпретация многофакторной модели электропотребления в системе водоснабжения

Разработанная математическая модель позволяет осуществлять планирование ЭЭ водоснабжающих предприятий при изменении объемов поднятой из скважин воды и температуры окружающей среды, а также производить оценку состояния ЭЭФ при переходе от общих затрат ЭЭ к удельным:

$$W_{уд} = f(Q_1, t_{окр}) = w_{уд.тех} + \frac{at_{окр} + W_{усл.п}}{Q_1}, \text{ кВт} \cdot \text{ч/тыс. м}^3. \quad (6)$$

Анализ коэффициентов регрессии свидетельствует о высоком значении условно-постоянной составляющей расхода электроэнергии (79,8 %), не зависящей от объемов производства предприятия. Постоянство расхода ЭЭ обусловлено работой осветительных установок, хозяйственно-бытовых и санитарно-гигиенических нужд предприятия, работой вспомогательных и обслуживающих цехов (ремонтно-механический цех, участок по ремонту приборов учета и расхода воды и т. д.). Кроме того, технологические операции, связанные с повышением качества питьевой воды (промывка фильтровальных сооружений, испытание откачками водозаборных скважин, дезинфекция и промывка скважин и т. д.), определяются строгим временным регламентом и не зависят от производственной программы предприятия.

Однако наиболее весомый вклад в постоянство электропотребления вносит тот факт, что водоснабжающие организации обеспечивают непрерывное поддержание сетевого давления на заданном (минимально необходимом) уровне независимо от объемов производства. Развитие системы водоснабжения также приводит к росту условно-постоянной составляющей расхода ЭЭ.

Значимость температурного фактора связана, во-первых, с изменением режимов работы общезаводских установок, во-вторых, с ростом температуры уменьшаются потери напора в трубопроводах, которые зависят от кинематической вязкости жидкости [14]. Таким образом, уменьшение температуры приводит к росту гидравлического сопротивления при движении воды и, соответственно, увеличению затрат электроэнергии. В результате статистического анализа электропотребления установлено, что при самой высокой среднесуточной температуре расход электроэнергии уменьшился на 10,9 %, а при самой низкой (−14,6 °C) вырос на −5,4 %.

Номограмма рис. 8 наглядно отражает влияние температурного фактора и объемов производства на изменение удельного расхода электроэнергии.

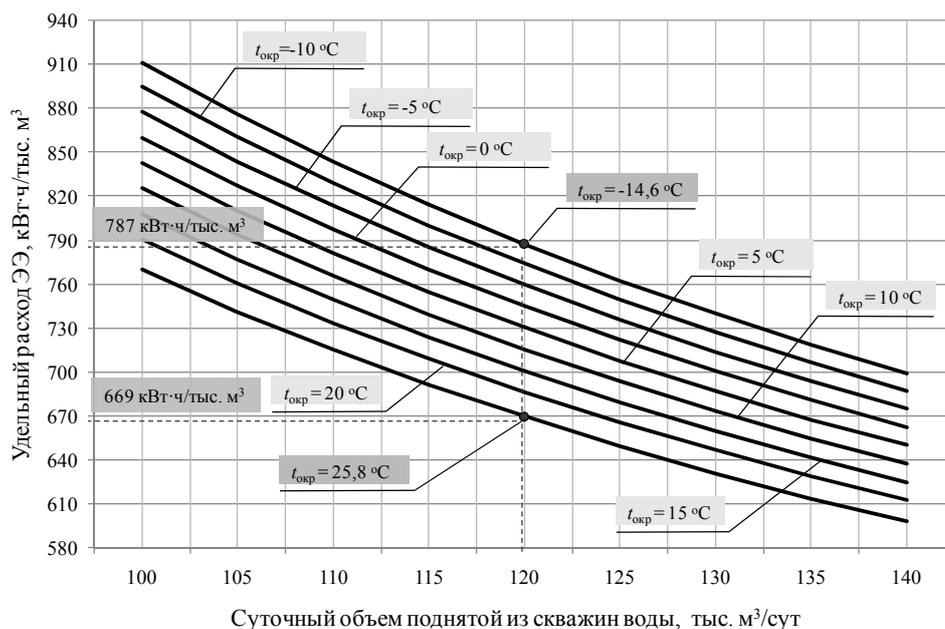


Рис. 8. Номограмма удельного расхода ЭЭ при изменении суточных объемов подъема воды и температуры окружающей среды

### Заключение

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Комплексный подход к управлению энергетической эффективностью в технологической системе водоснабжения основан на аддитивной, многофакторной регрессионной модели электропотребления.
2. Для снижения влияния разброса на результат моделирования установлен оптимальный период сглаживания временных рядов, который составляет календарную неделю.
3. Математическое описание расхода электроэнергии в системе водоснабжения может быть представлено в виде многофакторной модели. В качестве независимых переменных выступают объемы поднятой из скважин воды и температура окружающей среды. Принятые факторные признаки отражают изменения электропотребления более чем на 82 % при среднегодовой погрешности прогнозирования менее 5 %.
4. Выявлена высокая доля постоянных затрат электроэнергии, не зависящих от объемов воды, поданной потребителю, что обосновывается необходимостью в поддержании установленного давления в диктующих точках системы.
5. Влияние температуры на уровень электропотребления в системе водоснабжения может варьироваться от 10,9 до -5,4 %.
6. Результаты научных исследований могут быть использованы организациями жилищно-коммунального хозяйства, оказывающими услуги водоснабжения, для планирования общих и удельных расходов электроэнергии и оценки состояния энергоэффективности.

### Литература

1. О Программе развития жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь до 2015 года : Постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 8 февр. 2013 г. № 97. – Минск, 2013.

2. О Государственной программе по водоснабжению и водоотведению «Чистая вода» на 2011–2015 годы : Постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 15.09.2011 № 1234. – Минск, 2011.
3. Грунтович, Н. В. Диагностирование и прогнозирование показателей энергоэффективности технологических систем водоснабжения и водоотведения / Н. В. Грунтович, А. А. Капанский // Инновации в энергосбережение – инвестиции в будущее / ККУП «Витебский областной центр маркетинга». – Витебск, 2015. – С. 47–51.
4. Грунтович, Н. В. Развитие методического обеспечения диагностирования и прогнозирования энергоэффективности технологических систем водоснабжения и водоотведения / Н. В. Грунтович, Д. Р. Мороз, А. А. Капанский // Энергоэффективность. – 2015. – № 1. – С. 20–23.
5. Токочакова, Н. В. Расчетно-статистические модели режимов потребления электроэнергии как основа нормирования и оценки энергетической эффективности / Н. В. Токочакова, Д. Р. Мороз // Энергоэффективность. – 2006. – № 1. – С. 14–15 ; № 2. – С. 14–15.
6. Токочакова, Н. В. Управление энергоэффективностью промышленных потребителей на основе моделирования режимов электропотребления / Н. В. Токочакова // Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. Энергетика. – 2006. – № 3. – С. 67–75.
7. Мороз, Д. Р. Моделирование энергопотребления промышленных предприятий для прогнозирования показателей энергетической эффективности : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.01 / Д. Р. Мороз // ОИЭиЯИ Сосны–Минск, 2009. – 185 с.
8. Токочакова, Н. В. Методология оценки энергоэффективности транспорта нефти на основе моделирования электропотребления : дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.01 / Н. В. Токочакова // БНТУ, ГГТУ им. П. О. Сухого. – Минск–Гомель, 2007. – 357 с.
9. Бокс, Дж. Анализ временных рядов, прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс ; пер. с англ. под ред. В. Ф. Писаренко. – М. : Мир, 1974. – Кн. 1. – 406 с.
10. Эконометрия. Книга третья. Анализ временных рядов / В. И. Суслов [и др.]. – Новосибирск, 2003. – 157 с.
11. Рао, С. Р. Линейные статистические методы и их применения : пер. с англ. / С. Р. Рао ; пер. А. М. Каган под ред. Ю. В. Линник. – М. : Наука, 1968. – 547 с.
12. Введение в эконометрику : пер. с англ. / К. Доугерти [и др.]. – 2-е изд. – М. : ИНФРА-М, 2004. – 419 с.
13. Теория и практика систем водоотведения : учеб. пособие фирмы Grundfos.

*Получено 10.11.2015 г.*