

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 620.9-027.236

**КАПАНСКИЙ**  
Алексей Александрович

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ  
ВОДОПРОВОДНО-КАНАЛИЗАЦИОННОГО ХОЗЯЙСТВА**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

Минск 2019

Научная работа выполнена в Учреждении образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»

Научный руководитель **ГРУНТОВИЧ Надежда Владимировна**,  
доктор технических наук, профессор кафедры  
«Электроснабжение» Учреждения образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Официальные  
оппоненты: **РУСАН Викентий Иванович**,  
доктор технических наук, профессор кафедры  
практической подготовки студентов Белорус-  
ского государственного аграрного технического  
университета;

**ТИМОШУК Александр Леонидович**,  
кандидат технических наук, доцент, заведую-  
щий кафедрой «Теплоэнергетика и эффектив-  
ное использование ТЭР» Государственного  
института повышения квалификации и пере-  
подготовки кадров в области газоснабжения  
«ГАЗ-ИНСТИТУТ»

Оппонирующая  
организация Учреждение образования «Полоцкий государ-  
ственный университет»

Защита состоится 26 апреля 2019 г. в 14.00 на заседании совета по за-  
щите диссертаций Д 02.05.01 при Белорусском национальном техническом  
университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп. 2,  
ауд. 201, телефон ученого секретаря (017) 293-92-16, e-mail: pte@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского  
национального технического университета.

Автореферат разослан 25 марта 2019 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций,  
кандидат технических наук

А. А. Бобич

© Капанский А. А., 2019

© Белорусский национальный  
технический университет, 2019

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В последние годы экономический эффект от внедряемых энергосберегающих мероприятий в Республике Беларусь заметно сократился. Предприятия водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ), входящие в структуру жилищно-коммунального хозяйства, также столкнулись с проблемой снижения результативности внедрения энергосберегающих мероприятий и, как правило, не получают даже часть того эффекта, который был технически обоснован. В ряде случаев это связано с тем, что существующее методическое обеспечение не позволяет достоверно спрогнозировать изменение общих и удельных расходов электроэнергии (ЭЭ) в условиях изменения производственных программ, развития трубопроводных сетей, внедрения насосного оборудования, изменения качества очистки сточных вод и проводимых мероприятий в области энергосбережения. Известные на сегодняшний день методы прогнозирования показателей энергоэффективности (ЭЭФ) предприятий ВКХ не учитывают эмерджентные свойства технологических систем, а основываются на режимах работы единичного электрооборудования, в связи с чем, разработка методов и способов комплексной оценки текущего состояния и прогнозирования ЭЭФ является актуальной задачей.

В диссертационной работе представлены результаты исследований на примере трех водоканалов Республики Беларусь: КПУП «Гомельводоканал»; УП «Витебскводоканал»; КЖУП «Уником», Жлобин. Результаты исследований позволяют производить комплексную оценку текущего состояния и прогнозирование ЭЭФ предприятий ВКХ при изменении влияющих условий, определять резервы экономии электрической энергии (ЭЭ) и эффективные пути их реализации.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами**

Работа выполнялась в соответствии с Государственной программой научных исследований «Энергобезопасность, энергоэффективность и энергосбережение, атомная энергетика» по заданию 2.2.36 (№ г.р. 20141922) на 2014–2015 гг. по теме «Разработка методологических принципов управления энергоэффективностью основных технологических процессов для снижения энергоемкости продукции». Исследования проводились на кафедре «Электроснабжение» Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого в рамках задания 2014 г. «Разработка методологических принципов формирования программ по энергосбережению для промышленных потребителей, работающих в условиях переменной технологической загрузки» и задания 2015 г. «Разработка методики прогнозирования показателей энергоэффективности промышленных предприятий, работающих в условиях переменной технологической загрузки при учете структуры потребляемых ТЭР и структуры внедряемых мероприятий по энергосбережению».

### **Цель и задачи исследования**

Целью работы является разработка способа оценки энергоэффективности, методов её прогнозирования и повышения при учете многофакторных характеристик подсистем, участвующих в формировании удельных и общих расходов электроэнергии на предприятиях водопроводно-канализационного хозяйства.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математические модели электропотребления систем водоснабжения и водоотведения при учете множества факторов для решения задач прогнозирования и оценки текущего состояния энергоэффективности.

2. Исследовать влияние факторов, формирующих общий и удельный расход электроэнергии на предприятиях водопроводно-канализационного хозяйства.

3. Разработать методы прогнозирования показателей энергоэффективности предприятий водопроводно-канализационного хозяйства, учитывающие ввод в эксплуатацию дополнительных трубопроводных сетей, насосного оборудования, внедрение мероприятий по энергосбережению, изменение качества очистки и объемов питьевых и сточных вод.

4. Разработать способ оценки текущего состояния энергоэффективности предприятий водопроводно-канализационного хозяйства, позволяющий производить выбор приоритетных мероприятий в области энергосбережения.

5. Разработать метод выбора оптимального состава насосного оборудования станций первого подъема воды для минимизации расхода электроэнергии под заданные объемы водопотребления.

6. Создать методическое и программное обеспечение для решения задач оценки текущего и прогнозного состояния энергоэффективности предприятий водопроводно-канализационного хозяйства.

### **Научная новизна**

Научная новизна и значимость полученных результатов заключаются в следующем:

– с использованием метода регрессионного анализа произведено исследование степени влияния факторов и установлена математическая взаимосвязь между электропотреблением в системе водоснабжения, объемами поднятой из скважин воды и температурой наружного воздуха и расходом электроэнергии в системе водоотведения, объемом и химическим составом сточных вод, температурой наружного воздуха и количеством атмосферных осадков;

– для предприятий водопроводно-канализационного хозяйства разработаны методы прогнозирования общих и удельных расходов электроэнергии, основанные на многофакторных регрессионных моделях электропотребления, отличающиеся от существующих методов корректировкой коэффициентов регрессии, направленной на минимизацию погрешности прогнозирования, позволяющие учесть внедрение энергосберегающих мероприятий, ввод в экс-

плуатацию трубопроводных сетей, насосного оборудования, изменение качества очистки и объемов производства;

– на основе многофакторного моделирования разработан способ оценки текущего состояния энергоэффективности, отличающийся определением коэффициента чувствительности удельного расхода электроэнергии, учитывающий многофакторную взаимосвязь между электропотреблением и влияющими факторами в системах водоснабжения и водоотведения, позволяющий определить приоритетные энергосберегающие мероприятия;

– для систем водоснабжения разработан метод выбора оптимального состава насосного оборудования, основанный на проведении инструментальных измерений режимов работы насосных агрегатов, отличающийся учетом необходимости включения погружных насосов в процессе эксплуатации для предотвращения заиливания скважин, позволяющий минимизировать расходы электроэнергии при управлении режимами работы насосных агрегатов для заданных объемов водопотребления.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Многофакторные аддитивные регрессионные модели электропотребления, позволяющие оценить и спрогнозировать состояние энергоэффективности на предприятиях водопроводно-канализационного хозяйства, отличающиеся взаимосвязью между: электропотреблением в системе водоснабжения, объемами поднятой из скважин воды и температурой наружного воздуха; расходом электроэнергии в системе водоотведения, объемом и химическим составом сточных вод, температурой наружного воздуха и количеством атмосферных осадков.

2. Методы прогнозирования показателей энергоэффективности предприятий водопроводно-канализационного хозяйства, основанные на многофакторных аддитивных моделях общих и удельных расходов электроэнергии, отличающиеся корректировкой технологической и условно-постоянной составляющей регрессионной модели, позволяющие учесть внедрение энергосберегающих мероприятий, ввод трубопроводных сетей, насосного оборудования и изменение качества очистки и объемов производства.

3. Способ оценки текущего состояния энергоэффективности, основанный на многофакторных регрессионных моделях электропотребления, отличающийся определением коэффициента чувствительности изменения удельного расхода электроэнергии, позволяющий определить приоритетные энергосберегающие мероприятия.

4. Метод выбора оптимального состава насосного оборудования, основанный на проведении инструментальных измерений режимов работы насосных агрегатов, отличающийся учетом включения погружных насосов в процессе эксплуатации для предотвращения заиливания скважин, позволяющий минимизировать затраты электроэнергии в условии заданных объемов водопотребления.

### **Личный вклад соискателя**

В диссертационной работе представлены результаты работ, выполненных автором самостоятельно и в соавторстве. Изложенные в диссертации положения, выводы и рекомендации получены автором лично. Постановка задачи, анализ и интерпретация полученных результатов осуществлены совместно с научным руководителем доктором технических наук Н. В. Грунтович.

Автор диссертационного исследования принимал непосредственное участие в разработке отраслевой методики расчета норм расхода ТЭР на предприятиях водопроводно-канализационного хозяйства Республики Беларусь.

### **Апробация результатов работы**

Основные положения диссертации и отдельные ее разделы докладывались и обсуждались на международных и республиканских конференциях, в том числе:

1. Международная научно-техническая конференция «Актуальные вопросы эксплуатации современных систем энергообеспечения и природопользования», г. Брянск, сентябрь 2015 г.

2. II Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах», г. Тамбов, апрель 2015 г.

3. Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электроэнергетики», г. Н. Новгород, декабрь 2015 г.

4. Международная научно-практическая конференция «Энергоэффективность, энергетическая безопасность, конкурентоспособность», г. Витебск, март 2015 г.

5. Международная научно-техническая конференция «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах», г. Севастополь, сентябрь 2015 г.

6. III Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах», г. Тамбов, апрель 2016 г.

7. IV Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах», г. Тамбов, июнь 2017 г.

### **Опубликованность результатов диссертации**

По результатам выполненных исследований опубликовано 20 печатных работ, из них: 14 статей в научных журналах в т.ч. 11 из перечня журналов рекомендованных ВАК; 3 статьи в сборниках международных и республиканских конференций; 3 тезиса докладов. 3 статьи в научных журналах опубликованы без соавторов. Общий объем материалов, опубликованных по теме диссертации, составляет 7,7 авторских печатных листа.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Общий объем диссертации с приложениями составляет 226 страниц, 64 рисунка, 45 таблиц. Приложения и список использованных источников из 188 наименований, включая собственные публикации, занимают 78 страниц, основная часть диссертации занимает 137 страниц.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

**Во введении** отражена проблема методического обеспечения и актуальность разработки методов и способов комплексной оценки текущего состояния и прогнозирования ЭЭФ предприятий ВКХ в условиях изменяющихся производственных программ, развития трубопроводных сетей, изменения качества очистки сточных вод и проводимых мероприятий в области энергосбережения.

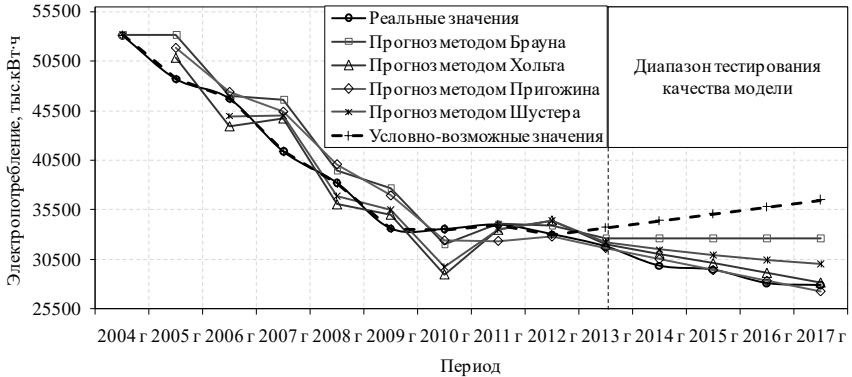
**В первой главе** описано взаимодействие структурных подсистем предприятий ВКХ. Приведены существующие методы оценки показателей ЭЭФ Республики Беларусь и стран ближнего зарубежья. Рассмотрены энергетические аспекты транспортировки жидкости по трубопроводам. Показана актуальность, сформулирована цель и задачи диссертации.

В роли потребителя ЭЭ системы водоснабжения и водоотведения характеризуются сложной взаимосвязью между энергетикой и технологией и состоят из большого количества технологических подсистем, взаимодействующих между собой и обладающих свойством целостности. Существующие методы оценки показателей ЭЭФ предприятий ВКХ основываются на анализе режимов работы единичных электроприемников и не учитывают изменения влияющих факторов, характеризующих системы в целом.

Качественные прогнозы ЭЭФ важны на всех стадиях процесса производства, передачи, распределения и потребления ЭЭ, в связи с чем, на сегодняшний день для планирования электропотребления разработано множество математических методов. В качестве тестовых моделей прогнозирования ЭЭФ использовались: метод экспоненциального сглаживания Брауна; модель Хольта; логистические модели на основе теории детерминированного хаоса Пригожина и Шустера. В качестве тестовой выборки принималась годовая статистика расхода ЭЭ в системе водоснабжения КПУП «Гомельводоканал» за последние 13 лет. Результаты моделирования приведены на рисунке 1.

Рассмотренные модели, несмотря на свою простоту и во многих случаях хорошее качество прогнозов, имеют недостатки. Поскольку прогнозы электропотребления рассмотренных моделей основываются на предыстории статистических данных и не учитывают формирующие электропотребление факторы, то и результат прогнозирования отражает лишь общую тенденцию расхода ЭЭ. Это означает, что в случае изменения направления тренда электропотребления в тестовом (прогнозируемом) периоде погрешность моделирования существенно возрастает, что наблюдается на рисунке 1 в виде расхождения условно-возможных значений с прогнозируемыми.

Кроме того, оценка состояния ЭЭФ усложняется при вводе в эксплуатацию трубопроводных сетей и подкачивающих насосных станций (ПНС), повышении качества очистки сточных вод и внедрении мероприятий по энергосбережению, сопровождаясь непрерывным изменением производственной программы. При этом возникает область неопределенного состояния ЭЭФ.



**Рисунок 1. – Результаты тестирования моделей прогнозирования**

Во второй главе сформирована система управления энергопотреблением технологических систем водоснабжения и водоотведения. Подробно рассмотрена процедура сбора, обработки статистических данных и особенности построения математических моделей электропотребления предприятий ВКХ.

Для решения ряда задач, поставленных в диссертационной работе, предлагается использовать комплексный подход к управлению ЭЭФ, основанный на построении многофакторных аддитивных моделей общих и удельных расходов ЭЭ, которые базируются на обработке статистических наблюдений с применением метода регрессионного анализа. В состав информационной базы данных (ИБД) входит суточная статистика ретроспективных производственных показателей, что позволяет учесть действительное изменение объемов производства, климатические особенности региона, а также фактические затраты ЭЭ при транспортировке жидкости.

Для снижения влияния разброса на результат моделирования установлен оптимальный период сглаживания ИБД, который равен календарной неделе. Оптимальный период сглаживания определен по критерию, основанному на минимизации среднеквадратического отклонения погрешности моделирования:

$$n_{\text{опт}} = \arg \min \sigma_{\text{погр}}(n), \quad (1)$$

где  $n$  – период сглаживания, сутки;  $\sigma_{\text{погр}}$  – среднеквадратическое отклонение погрешности моделирования.

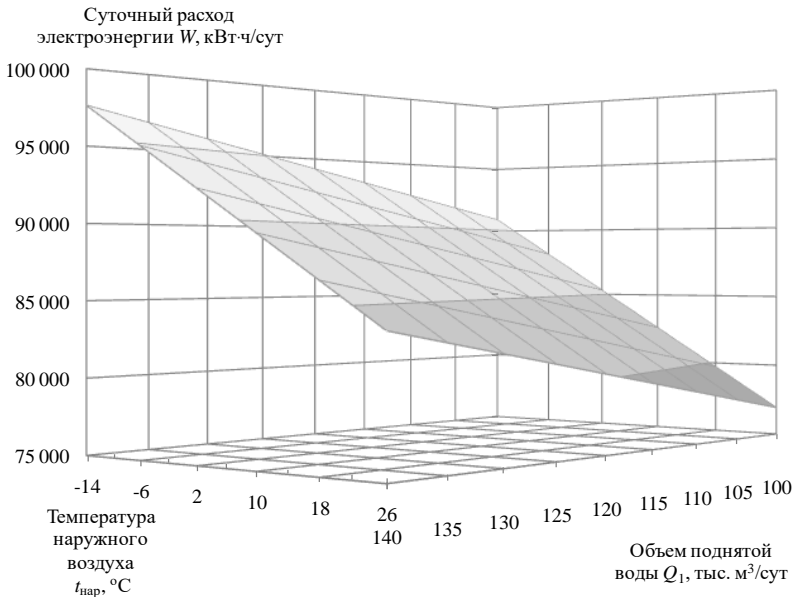


При обработке статистических данных в системе водоснабжения установлена линейная связь между объемами поднятой из скважин воды  $Q_1$  и поданной воды потребителю  $Q_2$ , разница которых определяла расход воды на технологические нужды водозаборов  $Q_{\text{тех}}$ . Оценка мультиколлинеарности между факторными признаками модели с использованием коэффициента парной корреляции Пирсона позволила исключить из математической модели фактор подачи воды. В результате суточная многофакторная аддитивная модель электропотребления в системе водоснабжения представлена зависимостью:

$$W_B = w_{\text{уд.тех}} \cdot Q_1 + a \cdot t_{\text{нар}} + W_{\text{усл.п}}, \quad (2)$$

где  $w_{\text{уд.тех}}$  – коэффициент регрессии перед фактором объема поднятой воды, кВт·ч/тыс. м<sup>3</sup>;  $Q_1$  – объемы поднятой из скважин воды, тыс. м<sup>3</sup>;  $a$  – коэффициент регрессии перед фактором температуры наружного воздуха, кВт·ч/°С;  $t_{\text{нар}}$  – температура наружного воздуха, °С;  $W_{\text{усл.п}}$  – свободный член регрессии, характеризующий условно-постоянный расход ЭЭ, не зависящий от формирующих электропотребление факторов, кВт·ч.

Приведенная математическая модель электропотребления может быть представлена в виде плоскости в трехмерном пространстве (рисунок 2).



**Рисунок 2. – Результат многофакторного моделирования электропотребления в системе водоснабжения**

Базовая модель расхода ЭЭ в системе водоотведения представлена зависимостью:

$$W_k = w_{уд.тех} \cdot Q_{сток} + a \cdot t_{нар} + b \cdot N_{осад} + W_{усл.п}, \quad (3)$$

где  $Q_{сток}$  – объем сточных вод, тыс. м<sup>3</sup>;  $b$  – коэффициент регрессии перед фактором количества выпавших атмосферных осадков, кВт·ч/мм;  $N_{осад}$  – количество выпавших атмосферных осадков, мм.

При наличии автоматизированного или ручного регулирования режима работы воздухоудовных агрегатов определена значимость факторов, характеризующих химический состав сточных вод. Оценка статистической значимости коэффициентов регрессии основывалась на  $t$ -критерии Стьюдента с уровнем надежности  $\alpha = 0,95$ , в результате чего математическая модель описана зависимостью:

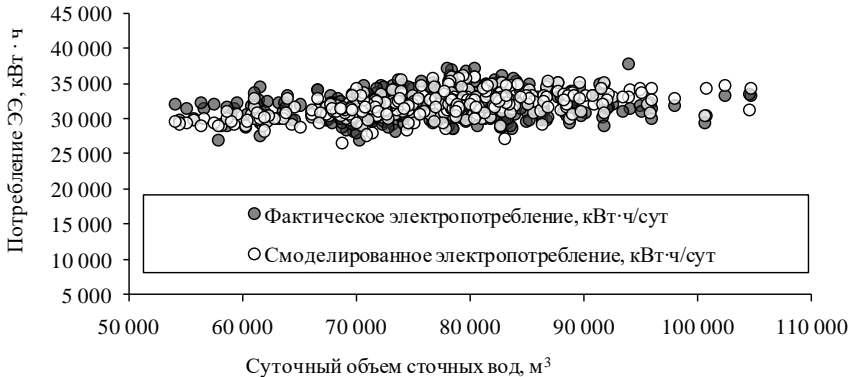
$$W_k = w_{уд.тех} \cdot Q_{сток} + a \cdot t_{нар} + b \cdot N_{осад} + W_{хим} + W_{усл.п}, \quad (4)$$

где  $W_{хим}$  – затраты ЭЭ, обусловленные химическим изменением сточных вод, кВт·ч:

$$W_{хим} = (c \cdot ХПК + d \cdot БПК_5 + e \cdot NH_4), \quad (5)$$

где ХПК, БПК<sub>5</sub> и NH<sub>4</sub> – химические показатели приходящих к местам очистки сточных вод, мг/л;  $c$ ,  $d$ ,  $e$  – коэффициент регрессии перед факторами ХПК, БПК<sub>5</sub> и NH<sub>4</sub> соответственно, (кВт·ч)·л/мг.

На рисунке 3 представлено графическое сравнение результатов моделирования с фактическими данными потребления ЭЭ на примере системы водоотведения УП «Витебскводоканал».



**Рисунок 3. – Сравнение результатов моделирования с фактическими значениями суточного электропотребления системы водоотведения УП «Витебскводоканал»**

В третьей главе приведены результаты исследования влияния внешних и внутренних факторов, формирующих удельные и общие расходы ЭЭ на предприятиях ВКХ. Степень влияния факторов, формирующих электропотребление, производилась на основе определения частных коэффициентов эластичности.

По характеру исходной информации выделялась интегральная и усредненная статистика. Для систем водоснабжения и водоотведения интегральная статистика включала фактор объема производства, определяющий изменение технологических расходов ЭЭ:

$$W_{\text{тех}} = w_{\text{уд.тех}} \cdot Q = w_{\text{уд.тех}} \cdot \sum q_i, \quad (6)$$

где  $Q$  – объем производства в заданном периоде прогнозирования, тыс. м<sup>3</sup>;  $q_i$  – суточный объем производства, тыс. м<sup>3</sup>.

Для системы водоотведения в состав интегральной статистики включен фактор количество выпавших атмосферных осадков:

$$W_{\text{осад}} = b \cdot N_{\text{осад}} = \sum b \cdot N_{\text{осад}_i}, \quad (7)$$

где  $N_{\text{осад}_i}$  – количество выпавших атмосферных осадков за  $i$ -е сутки, мм.

По усредненной статистике определялись затраты ЭЭ, связанные с влиянием температуры наружного воздуха и химического состава сточных вод:

$$W_{\text{нар}} = a \cdot t_{\text{нар}} \cdot N = \sum a \cdot t_{\text{нар}_i}; \quad (8)$$

$$W_{\text{хим}} = (c \cdot \text{ХПК} + d \cdot \text{БПК}_5 + e \cdot \text{NH}_4) \cdot N = \sum (c \cdot \text{ХПК}_i + d \cdot \text{БПК}_{5_i} + e \cdot \text{NH}_{4_i}), \quad (9)$$

где  $N$  – количество дней в исследуемом периоде, сут;  $t_{\text{нар}_i}$  – средняя температура наружного воздуха за  $i$ -е сутки, °С;  $\text{ХПК}_i$ ,  $\text{БПК}_{5_i}$ ,  $\text{NH}_{4_i}$  – усредненные суточные значения химических показателей сточных вод, мг/л.

Проведенные исследования позволили выявить общую структуру моделей электропотребления для систем водоснабжения и водоотведения, которые представляются в виде суммы технологических, условно-постоянных и прочих влияющих факторов, формирующих затраты ЭЭ:

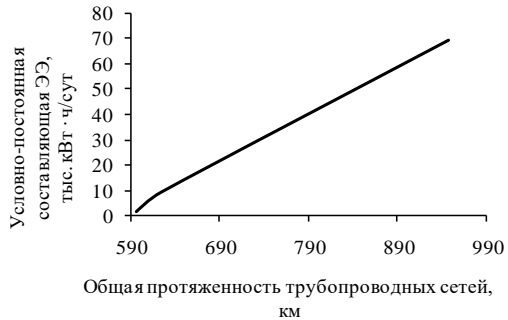
$$W = w_{\text{уд.тех}} \cdot Q + a \cdot x_2 + b \cdot x_3 + K + e \cdot x_j + W_{\text{усл.п}} = W_{\text{тех}} + W_{\text{п.ф}} + W_{\text{усл.п}}, \quad (10)$$

где  $x_2$ ,  $x_3$   $x_j$  – входные параметры модели электропотребления, не связанные с технологическим фактором (температура наружного воздуха, количество выпавших атмосферных осадков и т.д.);  $a$ ,  $b$   $e$  – коэффициенты регрессии модели перед факторами  $x_2$ ,  $x_3$   $x_j$  соответственно;  $j$  – количество формирующих электропотребление факторов;  $W_{\text{п.ф}}$  – расход ЭЭ, обусловленный влиянием прочих факторов, кВт · ч.

В общем виде удельное электропотребление, отнесенное к объемам производства, описывается зависимостью:

$$w_{\text{уд}} = w_{\text{уд.тех}} + \frac{a \cdot x_2 + b \cdot x_3 + K + e \cdot x_j + W_{\text{усл.п}}}{Q} = w_{\text{уд.тех}} + \frac{W_{\text{п.ф}} + W_{\text{усл.п}}}{Q}. \quad (11)$$

Основной причиной роста условно-постоянной составляющей электропотребления  $W_{\text{усл.п}}$  в системе водоснабжения является увеличение протяженности трубопроводных сетей, что сопровождается необходимостью непрерывного поддержания сетевого давления на заданном уровне вне зависимости от объемов разбора воды потребителями. Проведенные исследования позволили установить практически линейную зависимость условно-постоянного расхода ЭЭ от общей протяженности трубопроводных сетей (рисунок 4).



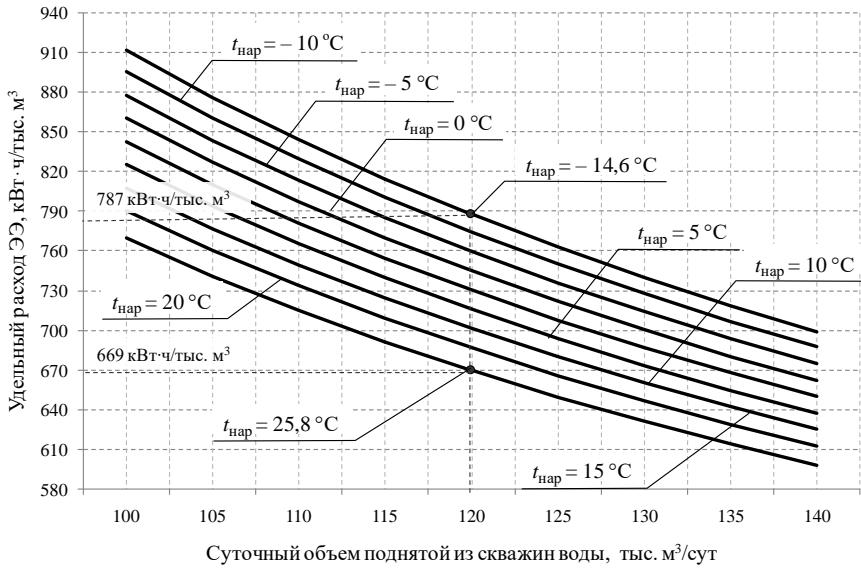
**Рисунок 4. – Влияние протяженности трубопроводных сетей на условно-постоянную составляющую затрат ЭЭ**

Для крупных систем водоснабжения, характеризующихся большим количеством водозаборов и сложной разветвленной трубопроводной системой сетей, наблюдается положительное влияние температуры наружного воздуха, способствующее снижению общих и удельных расходов ЭЭ (рисунок 5).

Результаты моделирования удельного расхода ЭЭ приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты моделирования удельного расхода ЭЭ в системе водоснабжения

Предприятия ВКХ	Зависимость удельного расхода ЭЭ от формирующих факторов
КПУП «Гомельводоканал»	$w_{\text{уд}} = 167,9 + \left( -350,1 \cdot t_{\text{нар}} + 69,23 \cdot 10^3 \right) / Q_1$
УП «Витебскводоканал»	$w_{\text{уд}} = 461,9 + \left( -28,97 \cdot t_{\text{нар}} + 9,717 \cdot 10^3 \right) / Q_1$
КЖУП «Уником», Жлобин	$w_{\text{уд}} = 393,1 + \left( 8,84 \cdot t_{\text{нар}} + 2,029 \cdot 10^3 \right) / Q_1$



**Рисунок 5. – Номограмма удельного расхода ЭЭ при изменении суточных объемов воды и температуры наружного воздуха**

В таблице 2 приведены результаты исследования степени влияния факторов, формирующих расходы ЭЭ в системе водоснабжения.

**Таблица 2. – Оценка степени влияния формирующих электропотребление факторов в системе водоснабжения**

Объект исследования	Частные коэффициенты эластичности		Доля условно-постоянного расхода ЭЭ в структуре электропотребления, %
	Объемы поднятой воды	Температура наружного воздуха	
УП «Витебскводоканал»	0,789	-0,005	21,6
КЖУП «Гомельводоканал»	0,228	-0,034	80,7
КЖУП «Уником», г Жлобин	0,771	-0,007	22,2

Исследование степени влияния технологических расходов воды на формирование ЭЭФ в системе водоснабжения реализовано в соответствии со следующим алгоритмом:

1) Определяются средневзвешенные удельные расходы ЭЭ насосных станций первого и второго подъема:

$$w_{\text{уд.тех}}^{\{z\}} = \sum_{i=1}^n w_{\text{уд}_i} \cdot Q_{\text{ср.ч}_i} / \sum_{i=1}^n Q_{\text{ср.ч}_i}, \quad (12)$$

где  $z$  – индекс, характеризующий уровень подъема воды;  $w_{\text{уд}_i}$  – удельный расход ЭЭ  $i$ -го НА, кВт · ч/тыс. м<sup>3</sup>;  $Q_{\text{ср.ч}_i}$  – средний часовой расход воды НА, м<sup>3</sup>/ч;  $n$  – количество НА, шт.

2) Устанавливается связь между объемами поднятой и поданной воды:

$$Q_1 = Q_2 + Q_{\text{тех}}, \quad (13)$$

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

3) Определяется аналитическая зависимость удельного расхода ЭЭ при отнесении затрат ЭЭ (нормировании ЭЭ) к объемам поднятой воды:

$$w_{\text{уд}Q_1} = w_{\text{уд.тех}}^{\{1\}} + w_{\text{уд.тех}}^{\{2\}} - \frac{w_{\text{уд.тех}}^{\{2\}} \cdot Q_{\text{тех}}}{Q_2 + Q_{\text{тех}}} + \frac{W_{\text{усл.п}}}{Q_2 + Q_{\text{тех}}}, \quad (14)$$

где  $w_{\text{уд.тех}}^{\{1\}}$  – удельный технологический расход ЭЭ станции первого подъема воды, кВт · ч/тыс. м<sup>3</sup>;  $w_{\text{уд.тех}}^{\{2\}}$  – удельный технологический расход ЭЭ станции второго подъема воды, кВт · ч/тыс. м<sup>3</sup>.

4) Определяется аналитическая зависимость удельного расхода ЭЭ при отнесении затрат ЭЭ (нормировании ЭЭ) к объемам поданной воды:

$$w_{\text{уд}Q_2} = w_{\text{уд.тех}}^{\{1\}} + w_{\text{уд.тех}}^{\{2\}} + \frac{w_{\text{уд.тех}}^{\{1\}} \cdot Q_{\text{тех}}}{Q_2} + \frac{W_{\text{усл.п}}}{Q_2}. \quad (15)$$

Установлено, что при отнесении затрат ЭЭ к объемам поднятой воды, так как это делается на текущий момент в системе водоснабжения, снижение технологических расходов воды сопровождается ростом удельного расхода ЭЭ (рисунок 6), несмотря на общее снижение электропотребления. При нормировании ЭЭ к объемам поданной воды наблюдается противоположное влияние.

Для системы водоотведения установлено, что при одинаковых объемах перекаченных и очищенных сточных вод, как правило, наибольшее воздействие на формирование электропотребления оказывает технологический фактор, связанный с работой насосного оборудования. В противном случае, когда объемы очищенных сточных вод больше объемов перекаченных, преобладает условно-постоянная составляющая затрат ЭЭ, что объясняется непрерывной работой воздухоудовного оборудования станций очистки сточных вод. На рисунке 7 представлено практически линейное влияние объема очищаемых сточных вод на рост условно-постоянного расхода ЭЭ.

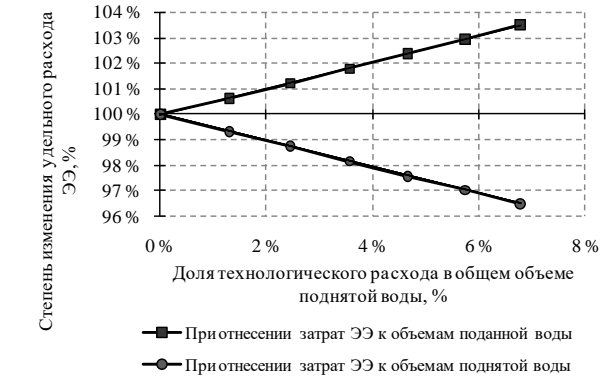
Установлено положительное влияние выпавших атмосферных осадков на формирование ЭЭФ в системе водоотведения. Суточное влияние атмосферных осадков в наиболее дождливые дни доходило до 13 %.

Среднегодовое влияние температуры наружного воздуха в системе водоотведения Гомеля, Витебска и Жлобина привело к снижению общих и удельных расходов ЭЭ на 2,5 %, 2,2 % и 0,4 % соответственно. Среднегодовое влияние химического состава сточных вод на примере системы водоотведения Витебска достигало в сумме более 20 % от общих затрат ЭЭ.

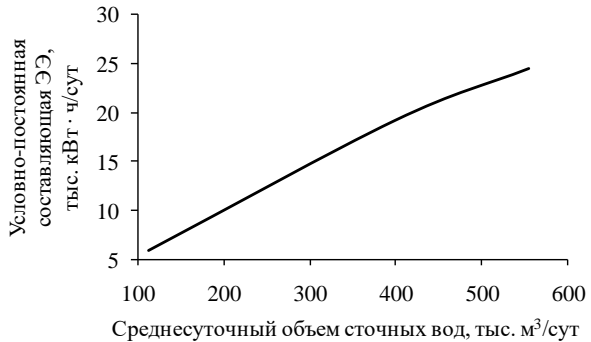
Результаты моделирования представлены в таблице 3.

В таблице 4 приведены результаты анализа степени влияния факторов, формирующих расход ЭЭ в системе водоотведения.

Планирование показателей энергоэффективности предлагается осуществлять с учетом исследования динамики объемов производственной программы, т.е. после составления трендовой модели производства. При оценке изменения объемов производства предложено использовать коэффициент роста  $K_p$ , который показывает, во сколько раз планируемый объем отличается от базового:



**Рисунок 6. — Влияние технологического расхода воды на изменение удельного расхода ЭЭ**



**Рисунок 7. — Влияние среднесуточного объема сточных вод на условно-постоянную составляющую затрат ЭЭ**

$$K_p(t) = \frac{Q_{\Pi}(t_{\Pi})}{Q_{\sigma}} = \frac{b_0 + b_1 \cdot t_{\Pi}}{Q_{\sigma}}, \quad (16)$$

где  $Q_{\Pi}(t_{\Pi})$  – планируемый годовой объем производства в расчетном году, тыс. м<sup>3</sup>;  $Q_{\text{б}}$  – базовый объем производства, тыс. м<sup>3</sup>;  $b_0, b_1$  – коэффициенты регрессии модели тренда;  $t_{\Pi}$  – значения тренда в прогнозируемом периоде, год.

За базовый период прогнозирования предложено принимать последний год статистических наблюдений изменения объемов производства:

$$w_{\text{уд}}(t_{\Pi}) = w_{\text{уд.тех}} + \frac{a \cdot x_1 + b \cdot x_2 + K + e \cdot x_j + W_{\text{усл.п}}}{K_{\text{р}}(t_{\Pi}) \cdot Q_{\text{б}}} = w_{\text{уд.тех}} + \frac{W_{\text{п.ф}} + W_{\text{усл.п}}}{K_{\text{р}}(t_{\Pi}) \cdot Q_{\text{б}}}. \quad (17)$$

Таблица 3. – Результаты моделирования удельного расхода ЭЭ в системе водоотведения

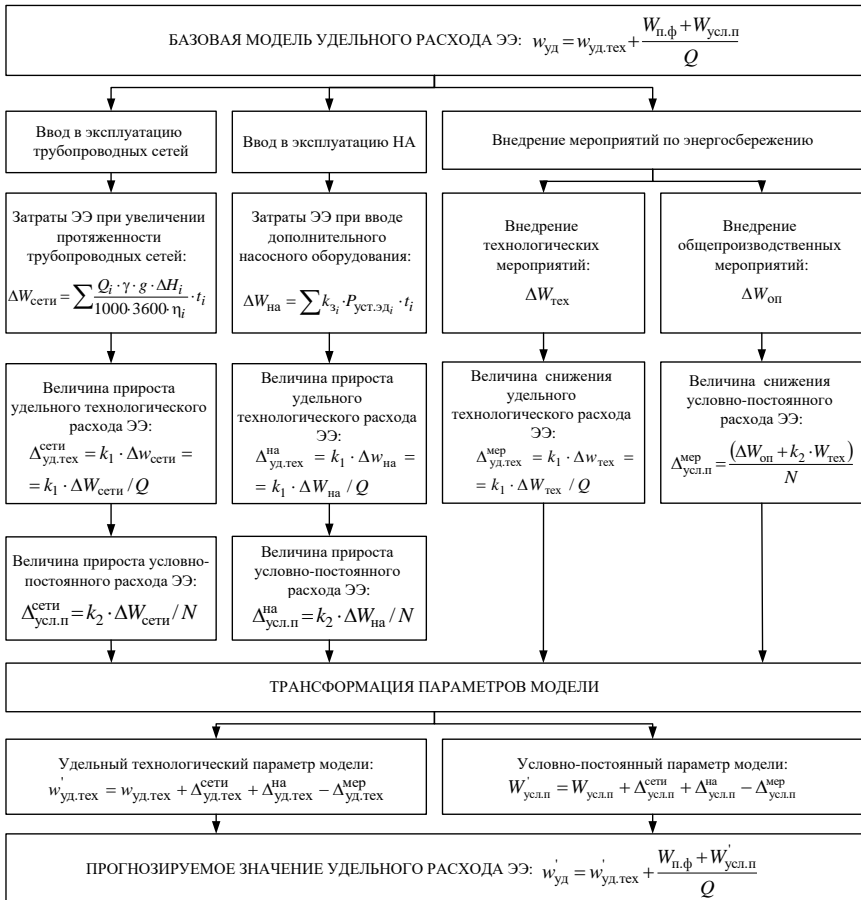
Предприятия ВКХ	Зависимость удельного расхода ЭЭ от формирующих факторов
КПУП «Гомельводоканал»	$w_{\text{уд}} = 305,9 + \frac{-172,3 \cdot t_{\text{нар}} - 192,5 \cdot N_{\text{осад}} + 24,23 \cdot 10^3}{Q_{\text{сток}}}$
УП «Витебскводоканал»	$w_{\text{уд}} = 92,73 + \frac{-95,98 \cdot t_{\text{нар}} - 152,9 \cdot N_{\text{осад}} + 2,062 \cdot \text{ХПК} + 8,062 \cdot \text{БПК}_5 + 49,18 \cdot \text{NH}_4 + 19,21 \cdot 10^3}{Q_{\text{сток}}}$
КЖУП «Уником», Жлобин	$w_{\text{уд}} = 74,79 + \frac{-4,056 \cdot t_{\text{нар}} + 5,267 \cdot 10^3}{Q_{\text{сток}}}$

Таблица 4. – Оценка степени влияния формирующих электропотребление факторов в системе водоотведения

Объект исследования	Частные коэффициенты эластичности						Доля условно-постоянного расхода ЭЭ в структуре электропотребления, %
	Объемы сточных вод	Температура наружного воздуха	Атмосферные осадки	Химические показатели			
				БПК <sub>5</sub>	ХПК	NH <sub>4</sub>	
УП «Витебскводоканал»	0,223	-0,022	-0,009	0,082	0,049	0,075	60,1
КПУП «Гомельводоканал»	0,612	-0,025	-0,006	–	–	–	41,8
КЖУП «Уником»	0,277	-0,004	–	–	–	–	72,7



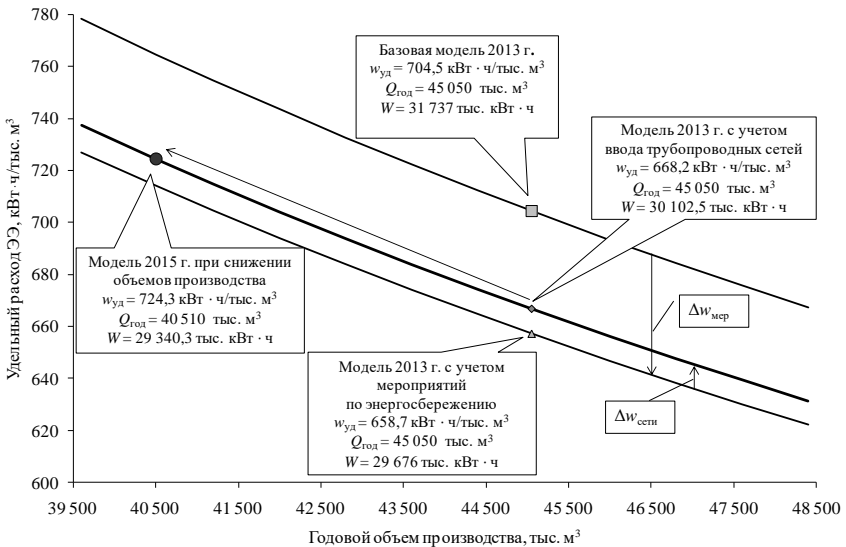
В четвертой главе приведен метод прогнозирования ЭЭФ и его адаптация на примере системы водоснабжения КПУП «Гомельводоканал» при учете таких факторов, как внедрение энергосберегающих мероприятий, ввод в эксплуатацию трубопроводных сетей и насосных станций, изменение производственной программы. Метод основан на трансформации базовой математической модели удельного расхода ЭЭ в соответствии с алгоритмом, приведенным на рисунке 8.



**Рисунок 8. – Блок-схема расчета удельного расхода ЭЭ при внедрении мероприятий по энергосбережению, вводе насосного оборудования и трубопроводных сетей**

В блок-схеме рисунка 8 приведены следующие обозначения:  $Q_i$  – расход воды на  $i$ -м участке сети,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $\Delta H_i$  – потери напора на  $i$ -м участке сети,  $\text{м}$ ;  $t_i$  – время работы,  $\text{ч}$ ;  $k_{зi}$  – коэффициент загрузки электродвигателя  $i$ -го НА;  $P_{\text{уст.эд}i}$  – установленная мощность электродвигателя  $i$ -го НА,  $\text{кВт}$ ;  $\Delta w_{\text{тех}}$  – удельная экономия ЭЭ при проведении мероприятий по энергосбережению,  $\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{тыс. м}^3$ ;  $\Delta w_{\text{сети}}$  – удельные технологические затраты ЭЭ при увеличении протяженностей трубопроводных сетей,  $\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{тыс. м}^3$ ;  $\Delta w_{\text{на}}$  – удельные технологические затраты ЭЭ при вводе в эксплуатацию дополнительных насосных станций,  $\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{тыс. м}^3$ ;  $k_1, k_2$  – коэффициенты, отражающие долю технологического и условно-постоянного расхода ЭЭ соответственно от внедрения мероприятий в общей экономии ЭЭ ( $k_1 + k_2 = 1$ ).

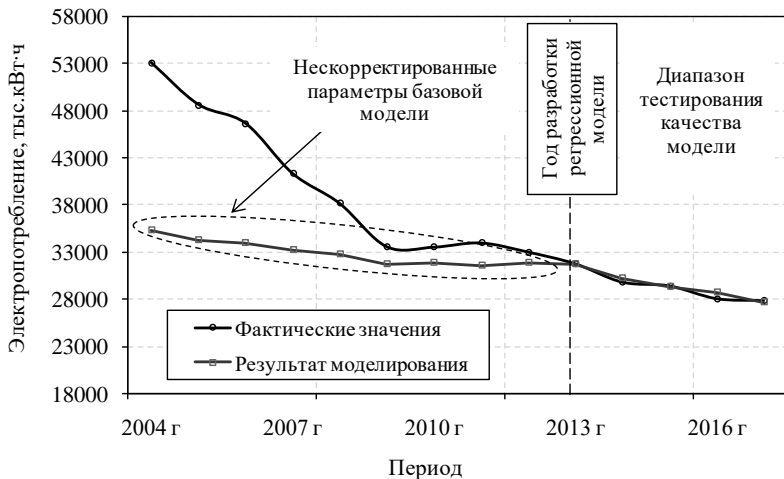
На примере системы водоснабжения Гомеля (рисунок 9) установлено, что внедренные мероприятия по энергосбережению обеспечили при существующем объеме производства снижение удельного расхода ЭЭ с 704,5 до 658,7  $\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{тыс. м}^3$ . Однако ввод в эксплуатацию новых трубопроводных сетей снизил эффект от мероприятий, что привело к росту удельного расхода ЭЭ с 658,7 до 668,2  $\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{тыс. м}^3$ .



**Рисунок 9. – Изменение удельного расхода ЭЭ при внедрении энергосберегающих мероприятий и вводе в эксплуатацию трубопроводных сетей на примере системы водоснабжения Гомеля**

Наиболее значимым фактором, формирующим удельный расход ЭЭ на 2015 г., являлась производственная программа. Из-за снижения объема поднятой воды с 45 050 до 40 510 тыс. м<sup>3</sup>/год удельный расход ЭЭ вырос до 724,3 кВт·ч/тыс. м<sup>3</sup>, что полностью перекрыло эффект от внедренных мероприятий по энергосбережению.

На рисунке 10 приведены результаты сравнения фактических значений электропотребления с предлагаемой моделью ЭЭ в системе водоснабжения КПУП «Гомельводоканал». Слева области построения отражены результаты с нескорректированными параметрами базовой модели, справа – при учете реализованных энергосберегающих мероприятий, внедрении трубопроводных сетей и ПНС.



**Рисунок 10. – Сравнение реальных значений электропотребления с результатами моделирования**

С 2004–2013 г. наблюдается расхождение фактических значений и результатов модели 2013 г., причем реальное значение существенно выше смоделированных, что подтверждается ежегодной реализацией энергосберегающих мероприятий. В тестовом периоде с 2013 г. по 2017 г. погрешность прогнозирования не выходила за пределы 2,0 %.

Для системы водоотведения разработан метод прогнозирования ЭЭФ при учете изменения объемов и качества очистки сточных вод. Повышение степени очистки сточных вод сопровождается дополнительной загрузкой воздушного оборудования, что приводит к росту условно-постоянной составляющей электропотребления, которая изменяет характеристику удельного расхода ЭЭ. Для возможности прогнозирования ЭЭ предложено осуществлять трансформацию условно-постоянной составляющей базовой модели:

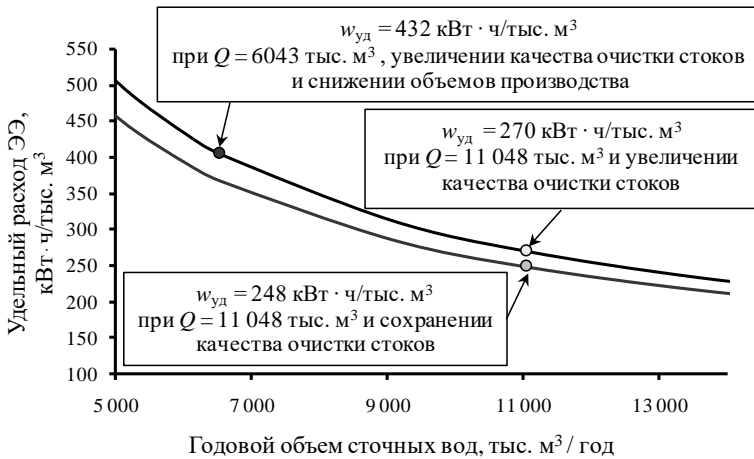
$$W'_{\text{усл.п}} = W_{\text{усл.п}} + \Delta W_{\text{усл.п}}^{\text{В}} \quad (18)$$

где  $\Delta W_{\text{усл.п}}^{\text{В}}$  – затраты ЭЭ после включения дополнительного воздухоудовного оборудования, приведенные к суточному уровню дискретизации, кВт · ч:

$$\Delta W_{\text{усл.п}}^{\text{В}} = \Delta W_{\text{В}} / N, \quad (19)$$

где  $\Delta W_{\text{В}}$  – прирост электропотребления в прогнозируемом периоде после включения дополнительного воздухоудовного оборудования, кВт · ч;  $N$  – количество дней в прогнозируемом периоде, сут.

На примере системы водоотведения г. Жлобина, установлено что, увеличение качества очистки сточных вод способствовало росту удельного расхода ЭЭ с 248 до 270 кВт · ч/тыс. м<sup>3</sup>. Однако в результате резкого снижения объемов производства удельный расход ЭЭ вырос до 432 кВт · ч/тыс. м<sup>3</sup>. На рисунке 11 отражена характеристика удельного расхода ЭЭ при увеличении качества очистки и снижении объемов сточных вод.



**Рисунок 11. – Прогнозирование удельного расхода при увеличении качества очистки и снижении объемов сточных вод**

Для оценки состояния ЭЭФ предприятий ВКХ предлагается ввести понятие «коэффициента чувствительности», который отражает влияние объемов производства на изменение ЭЭФ:

$$K_{\text{ч}} = \left| \frac{Q \cdot w_{\text{уд.тех}}}{Q \cdot w_{\text{уд.тех}} + a \cdot x_2 + b \cdot x_3 + K + e \cdot x_j + W_{\text{усл.п}}} - 1 \right|. \quad (20)$$

При увеличении производственной программы технологический расход ЭЭ резко возрастает, что приводит к заметному снижению чувствительности удельного расхода ЭЭ. При этом  $K_q \rightarrow 0$ . Когда производственная программа стремится к значениям близким к нулю, технологический расход ЭЭ в структуре электропотребления снижается, в результате чего изменение объемов производства существенно сказывается на изменении удельного расхода ЭЭ. При этом  $K_q \rightarrow 1$ :

$$K_q = \lim_{Q \rightarrow 0} \left| \frac{Q \cdot w_{уд.тех}}{Q \cdot w_{уд.тех} + a \cdot x_2 + b \cdot x_3 + K + e \cdot x_j + W_{усл.п}} - 1 \right| = 1 \text{ К } 0. \quad (21)$$

Если при оценке экономической эффективности внедрения энергосберегающих мероприятий не установлены однозначные режимы работы производства для достижения рассчитанного эффекта, тогда выбор приоритетных мероприятий основан на следующем: при значении коэффициента чувствительности от 0 до 0,5 энергосберегающие мероприятия должны быть направлены на снижение технологических затрат ЭЭ, а при значении от 0,5 до 1,0 – условно-постоянных.

Предложен метод выбора оптимального состава насосного оборудования, позволяющий минимизировать расходы ЭЭ в условиях заданного объема воды и сохранении конфигурации трубопроводной сети. Целевая функция предложенного метода характеризует работу НА в зоне высокой ЭЭФ:

$$W_{В.ЭЭФ} = \sum_{i=1}^m w_{уд_i} \cdot Q_{ср.ч_i} \cdot t_{и_i} \cdot 10^{-3} + \sum_{i=1}^n w_{уд_i} \cdot Q_{ср.ч_i} \cdot (T_{Г_i} - t_{и_i}) \cdot 10^{-3} \rightarrow \min, \quad (22)$$

где  $w_{уд_i}$  – удельный расход ЭЭ  $i$ -го НА, кВт · ч/м<sup>3</sup>;  $Q_{ср.ч_i}$  – средняя часовая производительность  $i$ -го НА, м<sup>3</sup>/ч;  $t_{и_i}$  – минимальное время работы  $i$ -го НА, необходимое для предотвращения заиливания скважин, ч;  $T_{Г_i}$  – годовое время работы  $i$ -го НА, ч;  $n$  – количество НА, обеспечивающих потребителя требуемым объемом воды;  $m$  – общее количество НА.

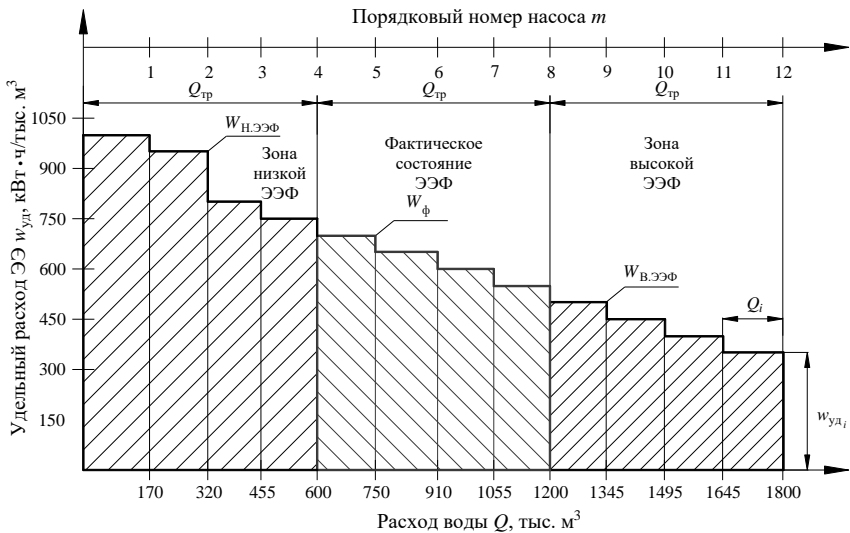
Система линейных ограничений принимает вид:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n Q_{ср.ч_i} \cdot (T_{Г_i} - t_{и_i}) \cdot 10^{-3} = Q_{пр} - Q_{и}, \\ Q_{ср.ч_i} \cdot (T_{Г_i} - t_{и_i}) \cdot 10^{-3} \geq 0, \\ Q_{ср.ч_i} \cdot (T_{Г_i} - t_{и_i}) \cdot 10^{-3} \leq Q_{max_i}, \end{cases} \quad (23)$$

где  $Q_{тр}$  – требуемый объем транспортировки воды, тыс. м<sup>3</sup>;  $Q_{max_i}$  – максимально возможный объем воды, который может быть подан насосом из скважины, тыс. м<sup>3</sup>, определяется производительностью и временем работы НА.

На основе проведенных инструментальных измерений режимов работы насосных агрегатов и предложенной методики оценен потенциал повышения ЭЭФ для системы водоснабжения УП «Витебскводоканал» и КПУП «Гомельводоканал» в размере 1855 тыс. кВт·ч и 1404 тыс. кВт·ч соответственно.

На рисунке 12 приведена иллюстрация к предложенному методу оценки регулировочной способности по ЭЭФ.



**Рисунок 12. – Определение состояния ЭЭФ при работе насосных агрегатов**

Экономическая значимость диссертационной работы определяется возможностью предотвращения штрафных санкций за перерасход ЭЭ путем повышения достоверности прогнозирования ЭЭФ и снижения денежных затрат на разработку норм расхода ЭЭ за счет использования разработанного программного комплекса «Electricity and water», внедренного в производственный процесс предприятия КПУП «Гомельводоканал».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решение задачи прогнозирования и оценки текущего состояния ЭЭФ систем водоснабжения и водоотведения базируется на построении многофакторных моделей электропотребления, разработанных с использованием суточных статистических данных энергетических, гидравлических и производственных режимов работы предприятий ВКХ на основе методов регрессионного анализа.

### **Основные научные результаты диссертации**

1. В диссертационной работе установлено, что существующее методическое обеспечение, разработанное несколько десятилетий назад, не может использоваться для оценки текущего состояния ЭЭФ и прогнозирования ее на перспективу в связи с тем, что оно основано в большинстве случаев на анализе режимов работы единичных электроприемников, а не всей технологической системы. Оценка показателей ЭЭФ усложняется при вводе в эксплуатацию трубопроводных сетей, ПНС, повышении качества очистки сточных вод и внедрении мероприятий по энергосбережению, сопровождаясь при этом изменением объемов производства, поскольку в результате прироста или снижения электропотребления возникает область неопределенного состояния ЭЭФ [3, 5, 6].

2. Моделирование электропотребления в системе водоснабжения и водоотведения основывается на обработке суточной информационно-статистической базы данных потребления ЭЭ, объемов поднятой из скважин воды, объемов перекаченных и очищенных сточных вод и прочих влияющих факторов, охватывающих годовой интервал времени, что в общей сложности составляет 365 суток. Обоснован оптимальный период сглаживания временных рядов, который составляет 7 суток, что в итоге снижает влияние разброса обрабатываемых ретроспективных статистических данных на результат моделирования [1, 4, 12].

3. Произведено исследование степени влияния внешних и внутренних факторов на формирование общих и удельных расходов ЭЭ в системе водоснабжения, основанное на разработанных многофакторных аддитивных моделях, учитывающих взаимосвязь между электропотреблением, объемами поднятой из скважин воды и температурой наружного воздуха [6, 7].

4. Установлена практически линейная зависимость условно-постоянного расхода ЭЭ от общей протяженности сетей водоснабжения, находящихся на балансе предприятий ВКХ, доказывающая, что увеличение трубопроводных сетей приводит к росту условно-постоянных затрат ЭЭ за счет необходимости непрерывного поддержания сетевого давления в диктующих точках системы водоснабжения на установленном уровне. Это позволяет обосновать приоритетность энергосберегающих мероприятий за счет оптимизации графиков давления насосных станций и модернизации изношенных трубопроводных сетей [6].

5. Исследована степень влияния факторов, формирующих общие и удельные расходы ЭЭ в системе водоотведения, основанное на разработанных многофакторных аддитивных моделях электропотребления, учитывающих взаимосвязь между электропотреблением, объемами и химическим составом сточных вод, температурой наружного воздуха и количеством атмосферных осадков [3, 5].

6. Определено практически линейное влияние объема очищаемых сточных вод на рост условно-постоянного расхода ЭЭ. Установлено, что в том случае, если объемы очищенных сточных вод больше объемов перекаченных, преобладают условно-постоянные затраты ЭЭ, связанные с непрерывной рабо-

той воздухоудного оборудования очистных сооружений сточных вод, что делает приоритетными энергосберегающие мероприятия по ее автоматизации и модернизации. Если в структуре электропотребления преобладают затраты ЭЭ, связанные с непосредственной транспортировкой питьевых и сточных вод, тогда энергосберегающие мероприятия должны быть направлены на снижение технологического расхода ЭЭ, т.е. на повышение энергоэффективности насосного оборудования [7, 15].

7. Исследовано влияние технологических расходов воды в системе водоснабжения на значение показателей ЭЭФ. Установлено, что уменьшение технологических расходов воды сопровождается увеличением удельного расхода ЭЭ при отнесении энергозатрат к объемам поднятой воды и уменьшением удельного расхода ЭЭ при отнесении энергозатрат к объемам поданной воды в трубопроводную сеть. Предложен метод прогнозирования показателей ЭЭФ, позволяющий оценить значения общих и удельных расходов ЭЭ при изменении технологических расходов воды в системе водоснабжения [8].

8. Разработан способ прогнозирования удельных расходов ЭЭ в условиях изменения объемов перекаченной питьевой и сточной воды, основанный на статистическом анализе изменения производственной программы. В основу способа положено построение линейного тренда с целью определения динамики изменения объемов производства и вычисления коэффициента роста, который показывает, во сколько раз планируемый объем производства отличается от базового. Достоинства предложенного способа заключаются в возможности прогнозирования удельных и общих расходов ЭЭ при учете реальной производственной динамики. Предложенный способ может использоваться промышленными и жилищно-коммунальными потребителями ЭЭ [7, 15].

9. Для систем водоснабжения разработан метод прогнозирования ЭЭФ, основанный на многофакторных регрессионных моделях электропотребления, позволяющий учесть внедрение энергосберегающих мероприятий, ввод трубопроводных сетей, дополнительных насосных станций и изменение объемов производственных программ на предприятиях ВКХ [9, 13, 17].

10. Разработан метод прогнозирования ЭЭФ для системы водоотведения, основанный на многофакторных регрессионных моделях электропотребления, позволяющий учесть изменение качества очистки и объема сточных вод [10, 14, 18, 19].

11. Разработан способ оценки текущего состояния ЭЭФ для предприятий ВКХ, позволяющий определить приоритетные мероприятия в области энергосбережения, основанный на определении фактического значения коэффициента чувствительности модели, который учитывает взаимосвязь между электропотреблением и воздействующими факторами систем водоснабжения и водоотведения в условиях внешних и внутренних возмущающих воздействий [11, 16].

12. Разработан метод выбора оптимального состава насосного оборудования, основанный на проведении инструментальных измерений режимов работы НА, отличающийся учетом включения НА в процессе эксплуатации для



предотвращения заиливания скважин, позволяющий минимизировать затраты ЭЭ в условии заданных объемов водопотребления [2, 11, 20].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Диссертационная работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований «Энергобезопасность, энергоэффективность и энергосбережение, атомная энергетика» в соответствии с заданием 2.2.36 (№ г.р. 20141922) на 2014–2015 гг. по теме «Разработка методологических принципов управления энергоэффективностью основных технологических процессов для снижения энергоемкости продукции». Результаты исследований внедрены: в производственный процесс КПУП «Гомельводоканал»; в производственный процесс УП «Витебскводоканал»; в производственный процесс КЖУП «Уником», г. Жлобин; в учебный процесс ГГТУ им. П. О. Сухого при проведении лекционных и практических занятий по дисциплине «Основы энергосбережения»; в учебный процесс Института повышения квалификации кадров агробизнеса и международных связей ФГБОУ ВПО «Брянская ГСХА» при проведении лекционных и практических занятий по курсу «Практические вопросы реализации государственной политики в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности»; в учебный процесс ФГБОУ ВПО «Брянская ГСХА».

Разработанные в диссертационной работе методы и способы прогнозирования ЭЭФ включены в отраслевую методику по расчету норм расхода ТЭР в системах водоснабжения и водоотведения Республики Беларусь, утвержденную Министерством жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь и согласованную Департаментом по энергоэффективности Госстандарта Республики Беларусь.

Задача прогнозирования и оценки текущего состояния ЭЭФ реализована в виде программного комплекса «Electricity and water», внедренного в отдел главного энергетика на КПУП «Гомельводоканал».

Основные научные результаты работы и ее практические положения имеют существенное значение для работников энергетических служб организаций жилищно-коммунального хозяйства за счет возможности оценки текущего состояния ЭЭФ, ее прогнозирования и выбора приоритетных направлений в области энергосбережения, что подтверждается актами внедрения результатов научных исследований на предприятиях ВКХ.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в научных журналах

1. Капанский, А. А. Моделирование электропотребления в технологической системе водоснабжения / А. А. Капанский // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2016. – № 2. – С. 74–85.
2. Грунтович, Н. В. Расчетно-аналитический метод нормирования расходов электрической энергии в технологических система водоснабжения и водоотведения / Н. В. Грунтович, А. А. Капанский // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2015. – № 2. – С. 70–79.
3. Капанский, А. А. Энергоэффективность технологических систем водоснабжения и водоотведения и методы ее оценки / А. А. Капанский // Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. Энергетика. – 2016. – № 5. – С. 436–451.
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. – № 3. – С. 20–23.
5. Капанский, А. А. Управление энергоэффективностью трубопроводных систем водоотведения на основе многофакторного моделирования режимов электропотребления / А. А. Капанский // Агротехника и энергообеспечение. – 2016. – № 1 (10). – С. 51–63.
6. Грунтович, Н. В. Исследование влияния факторов на формирование удельных и общих расходов электрической энергии в технологической системе водоснабжения / Н. В. Грунтович, А. А. Капанский, О. В. Федоров // Электротехнические системы и комплексы. – 2016. – № 3 (32). – С. 54–59.
7. Грунтович, Н. В. Влияние внешних и внутренних факторов на формирование удельных и общих расходов электроэнергии в системах городского водоотведения Республики Беларусь / Н. В. Грунтович, А. А. Капанский // Энергия и менеджмент. – 2016. – № 3. – С. 24–30.
8. Грунтович, Н. В. Прогнозирование удельного расхода электрической энергии при изменении технологических расходов воды в системах городского водоснабжения / Н. В. Грунтович, А. А. Капанский // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2016. – № 3 (66). – С. 37–45.
9. Грунтович, Н. В. Прогнозирование энергоэффективности технологических систем водоснабжения и водоотведения при внедрении мероприятий по энергосбережению / Н. В. Грунтович, Н. В. Грунтович, А. А. Капанский // Энергоэффективность. – 2016. – № 1. – С. 44–48.
10. Грунтович, Н. В. Прогнозирование показателей энергоэффективности технологических систем водоотведения при изменении качества очистки и объема стоков / Н. В. Грунтович, А. А. Капанский // Энергия и менеджмент. – 2016. – № 4. – С. 18–23.

11. Грунтович, Н. В. Оценка текущего состояния энергоэффективности технологических систем водоснабжения и водоотведения / Н. В. Грунтович, А. А. Капанский // Энергоэффективность. – 2016. – № 8. – С. 20–24.

12. Капанский, А. А. Особенности сбора и обработки данных для построения вероятностно-статистических моделей энергопотребления / А. А. Капанский, Е. Л. Шенец // Агротехника и энергообеспечение. – 2017. – № 1 (14). – С. 12–22.

13. Шенец, Е. Л. Анализ показателей эффективности использования энергоресурсов и методов оценки эффективности внедрения мероприятий по энергосбережению на промышленных предприятиях / Е. Л. Шенец, А. А. Капанский // Энергия и менеджмент. – 2017. – № 2. – С. 6–11.

14. Грунтович, Н. В. Исследование методов математического моделирования для решения практических задач оценки энергоэффективности / Н. В. Грунтович, Д. Р. Мороз, А. А. Капанский, С. Г. Жуковец, Е. Л. Шенец // Энергия и менеджмент. – 2017. – № 3. – С. 21–25.

### **Материалы конференций**

15. Грунтович, Н. В. Расчетно-статистический метод оценки показателей энергоэффективности в технологических системах водоотведения / Н. В. Грунтович, А. А. Капанский // Актуальные проблемы электроэнергетики : материалы Всерос. науч.-техн. конф., Н. Новгород, 18 дек. 2015 г. / Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева ; редкол.: А. Б. Дарьенков (отв. ред.) [и др.]. – Н. Новгород, 2015. – С. 145–150.

16. Капанский, А. А. Оценка чувствительности показателей энергоэффективности при изменении производственных программ в системах водоснабжения и водоотведения / А. А. Капанский // Актуальные вопросы эксплуатации современных систем энергообеспечения и природопользования : материалы IX Междунар. науч.-техн. конф., Брянск, 23–24 сент. 2015 г. / Брян. гос. аграр. ун-т ; под общ. ред. Л. М. Маркарянц. – Брянск, 2015. – С. 97–102.

17. Капанский, А. А. Основные направления использования методов статистического анализа при анализе энергоэффективности производства / А. А. Капанский, Е. Л. Шенец // Энергосбережение и эффективность в технических системах : материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., Тамбов, 10–12 июля 2017 г. / Тамбов. гос. техн. ун-т ; редкол.: Т. И. Чернышова (отв. ред.). – Тамбов, 2017. – С. 110–111.

### **Тезисы докладов**

18. Грунтович, Н. В. Диагностирование и прогнозирование показателей энергоэффективности технологических систем водоснабжения и водоотведения / Н. В. Грунтович, А. А. Капанский // Энергоресурсосбережение 2015 : материалы науч.-практ. конф., Минск, 19–20 марта 2015 г. / Витеб. обл. исполн. ком. – Минск, 2015. – С. 47–51.

19. Капанский, А. А. Многофакторный аддитивный метод оценки показателей энергоэффективности в технологических системах водоснабжения и водоотведения / А. А. Капанский // Актуальные проблемы энергосбережения и

энергоэффективности в технических системах : тез. докл. II Междунар. конф. с элементами науч. шк., Тамбов, 22–24 апр. 2015 г. / М-во образования и науки Рос. Федерации ; Тамбов. гос. техн. ун-т ; редкол.: Т. И. Чернышова (отв. ред.). – Тамбов, 2015. – С. 223–225.

20. Капанский, А. А. Оценка регулировочной способности по энергоэффективности насосных станций системы водоснабжения / А. А. Капанский // Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах : тез. докл. III Междунар. конф. с элементами науч. шк., Тамбов, 25–27 апр. 2016 г. / М-во образования и науки Рос. Федерации ; Тамбов. гос. техн. ун-т ; редкол.: Т. И. Чернышова (отв. ред.). – Тамбов, 2016. – С. 82–83.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'A. A. Kapanskiy', with a long, sweeping underline.

## РЭЗЮМЭ

Капанскі Аляксей Аляксандравіч

### Прагназаванне і павышэнне энергетычнай эфектыўнасці прадпрыемстваў водаправодна-каналізацыйнай гаспадаркі

**Ключавыя словы:** прагназаванне энергаэфектыўнасці, ацэнка існуючага стану энергаэфектыўнасці, электраспажыванне, сістэма водазабеспячэння, сістэма водаадвядзення, удзельны расход электраэнергіі, агульны расход электраэнергіі, паліўна-энергетычныя рэсурсы.

**Мэта працы:** распрацоўка спосабу ацэнкі энергетычнай эфектыўнасці, метадаў яе прагназавання і павышэння пры ўліку шматфактарных характарыстык падсістэм, якія ўдзельнічаюць у фарміраванні ўдзельных і агульных выдаткаў электраэнергіі на прадпрыемствах водаправодна-каналізацыйнай гаспадаркі.

**Метады даследавання.** Для вызначэння ступені ўзаемасувязі паміж доследнымі фактарамі, якія фарміруюць электраспажыванне ў сістэмах водазабеспячэння і водаадвядзення, выкарыстоўваўся метада карэляцыйнага аналізу. Вызначэнне віду матэматычнай функцыі электраспажывання ажыццяўлялася з выкарыстаннем метаду рэгрэсійнага аналізу.

**Атрыманьня вынікі і іх навізна.** Ўсталяваная многафактарная ўзаемасувязь паміж электраспажываннем ў сістэме водазабеспячэння, аб'ёмам паднятай са свідравін вады і тэмпературай навакольнага асяроддзя. Матэматычная мадэль электраспажывання ў сістэме водаадвядзення можа быць апісана з улікам наступных фактараў: аб'ёмаў і хімічнага складу сцёкавых вод, тэмпературы навакольнага асяроддзя, колькасці атмасферных ападкаў. Распрацаваны метады прагназавання энергоэфектывнасці, якія дазваляюць ўлічыць ўкараненне энергазберагальных мерапрыемстваў, увод у эксплуатацыю трубаправодных сетак, помпавага абсталявання, змяненне якасці ачысткі і аб'ёмаў вытворчасці. Распрацаваны метада выбару аптымальнага складу помпавага абсталявання, які дазваляе мінімізаваць выдаткі электраэнергіі для зададзеных аб'ёмаў водаспажывання. Распрацаваны спосаб ацэнкі існуючага стану энергаэфектыўнасці, які дазваляе вызначаць прыярытэтныя меры-прыманне ў галіне энергазберажэння.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** вынікі навуковых даследаванняў могуць быць выкарыстаны энергетычнымі службамаі арганізацый жыллёва-камунальнай гаспадаркі, якія аказваюць паслугі водазабеспячэння і водаадвядзення, і прадпрыемствамаі, якія ажыццяўляюць трубаправодную транспарціроўку сыравіны (вадкасцяў, газаў) і прадуктаў, пры фарміраванні сабекошту прадукцыі, прагназаванні электраспажывання і ацэнцы існуючага стану энергетычнай эфектыўнасці.

**Галіна выкарыстання:** агульныя прынцыпы і падыходы, якія прымяняюцца ў дысертацыйнай працы, могуць выкарыстоўвацца для ацэнкі існуючага стану і прагназавання энергаэфектыўнасці розных прамысловых і жыллёва-камунальных спажывоў пры ўліку асаблівасцяў іх функцыянавання.

## РЕЗЮМЕ

**Капанский Алексей Александрович**

### **Прогнозирование и повышение энергетической эффективности предприятий водопроводно-канализационного хозяйства**

**Ключевые слова:** прогнозирование энергоэффективности, оценка текущего состояния энергоэффективности, электропотребление, система водоснабжения, система водоотведения, удельный расход электроэнергии, общий расход электроэнергии, топливно-энергетические ресурсы.

**Цель работы:** разработка способа оценки энергетической эффективности, методов её прогнозирования и повышения при учете многофакторных характеристик подсистем, участвующих в формировании удельных и общих расходов электроэнергии на предприятиях водопроводно-канализационного хозяйства.

**Методы исследования.** Для определения степени взаимосвязи между исследуемыми факторами, формирующими электропотребление в системах водоснабжения и водоотведения, использовался метод корреляционного анализа. Определение вида математической функции электропотребления осуществлялось с использованием метода регрессионного анализа.

**Полученные результаты и их новизна.** Установлена многофакторная взаимосвязь между электропотреблением в системе водоснабжения, объемами поднятой из скважин воды и температурой окружающей среды. Математическая модель электропотребления в системе водоотведения может быть описана с учетом следующих факторов: объемов и химического состава сточных вод, температуры окружающей среды, количества атмосферных осадков. Разработаны методы прогнозирования энергоэффективности, позволяющие учесть внедрение энергосберегающих мероприятий, ввод в эксплуатацию трубопроводных сетей, насосного оборудования, изменение качества очистки и объемов производства. Разработан метод выбора оптимального состава насосного оборудования, позволяющий минимизировать расходы электроэнергии для заданных объемов водопотребления. Разработан способ оценки текущего состояния энергоэффективности, позволяющий определять приоритетные мероприятия в области энергосбережения.

**Рекомендации по использованию.** Результаты научных исследований могут быть использованы энергетическими службами организаций жилищно-коммунального хозяйства, оказывающими услуги водоснабжения и водоотведения, и предприятиями, осуществляющими трубопроводную транспортировку сырья (жидкостей, газов) и продуктов, при формировании себестоимости продукции, прогнозировании электропотребления и оценке текущего состояния энергетической эффективности.

**Область применения.** Общие принципы и подходы, применяемые в диссертационной работе, могут использоваться для оценки текущего состояния и прогнозирования энергоэффективности различных промышленных и жилищно-коммунальных потребителей при учете особенностей их функционирования.

## SUMMARY

Kapanskiy Aleksey

### Forecasting and improving the energy efficiency of water supply and sewerage enterprises

**Keywords:** energy forecasting, assessment of the current state of energy efficiency, power consumption, water supply system, water disposal system, specific energy consumption, total consumption of electricity, fuel and energy resources.

**Objective:** development of a method for assessing energy efficiency, methods for forecasting it and raising it with the consideration of the multifactor characteristics of subsystems participating in the formation of specific and general electric power consumption at the enterprises of the water and sewerage sector.

**Research methods:** correlation analysis was used to determine the tightness and direction of the relations between the studied factors forming the electricity consumption in water supply systems and water disposal systems. Regression analysis was used to determine the mathematical function of the electricity consumption.

**The results and their novelty:** multifactorial interrelation was set between electricity consumption in the water supply system, volumes of raised water and the ambient temperature. Mathematical model of power consumption in the water disposal system can be described by the inclusion of the following factors: the volume and chemical composition of the waste water, the ambient temperature, the amount of precipitation. Methods for forecasting energy efficiency have been developed that allow for the introduction of energy saving measures, commissioning of pipeline networks, pumping equipment, change in the quality of cleaning and production volumes. A method has been developed for selecting the optimal composition of pumping equipment, which makes it possible to minimize electricity consumption for a given volume of water consumption. A way of assessing the current state of energy efficiency has been developed, which makes it possible to identify priority measures in the field of energy conservation.

**Recommendations for use:** results of scientific research can be used by energy services of utilities that provide water supply and water disposal services, pipeline transportation of raw materials (liquids, gases) and products in the formation of the cost of production, forecasting energy consumption and assessing the current state of the energy efficiency.

**Applications:** general principles and approaches used in this thesis can be applied to assess the current state and forecasting of the energy efficiency of any industrial and housing consumers, taking into account the peculiarities of their functioning.

Научное издание

**КАПАНСКИЙ**  
Алексей Александрович

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ  
ВОДОПРОВОДНО-КАНАЛИЗАЦИОННОГО ХОЗЯЙСТВА**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

Подписано в печать 21.03.2019. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 1,74. Уч.-изд. л. 1,36. Тираж 100. Заказ 144.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.





