

**УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ
ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ НА ОСНОВЕ
МНОГОФАКТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ
ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ**

А.А. Капанский

Гомельский государственный технический университет
им. П.О. Сухого (Беларусь)

Аннотация. В работе представлены базовые многофакторные регрессионные модели электропотребления технологических систем водоотведения. Основой построения моделей общих и удельных расходов электрической энергии является информационная база данных, которая формируется за счет суточной статистики энергетических, климатических и производственных показателей работы системы водоотведения.

Результаты научных исследований могут быть использованы организациями жилищно-коммунального хозяйства, оказывающими услуги водоотведения, для прогнозирования общих и удельных расходов электроэнергии и оценки текущего состояния энергоэффективности.

Ключевые слова: модель электропотребления, система водоотведения, энергоэффективность, удельный расход электропотребления, электроэнергия.

Введение. Современные трубопроводные системы водоотведения, представляют собой сложные технологические комплексы, состоящие из большого количества подсистем, которые взаимодействуют между собой, оказывают влияние друг на друга и формируют режимы электропотребления всей технологической системы. Как объект управления система водоотведения обладает свойством целостности, в связи с чем, оценка показателей энергоэффективности (ЭЭФ) трубопроводных предприятий должна базироваться на системном подходе, тогда как существующие методы основаны в большинстве случаев на анализе режимов работы единичного электрооборудования, а не всей технологической системы [1-3].

В связи с чем, ставится актуальная задача в формировании общих принципов моделирования электропотребления в системе водоотведения, позволяющих осуществлять анализ энергоэффективности работы предприятия, планировать общие и удельные расходы электрической энергии (ЭЭ) в условиях изменяющейся производственной программы.

Энергетическая характеристика системы водоотведения

Как потребитель ЭЭ система водоотведения характеризуется множественным взаимодействием технологических подсистем, которые формируют энергоэффективность (рис. 1). К таким подсистемам относятся:

– Подсистема канализационно-насосных станций (КНС). Устройства отвода сточных вод к местам очистки. Разделяют на главные (ГКНС) и районные (РКНС) канализационно-насосные станции. Наиболее энергоемким потребителем выступают насосные агрегаты ГКНС, осуществляющие непрерывную перекачку значительного объема стоков к очистным сооружениям.

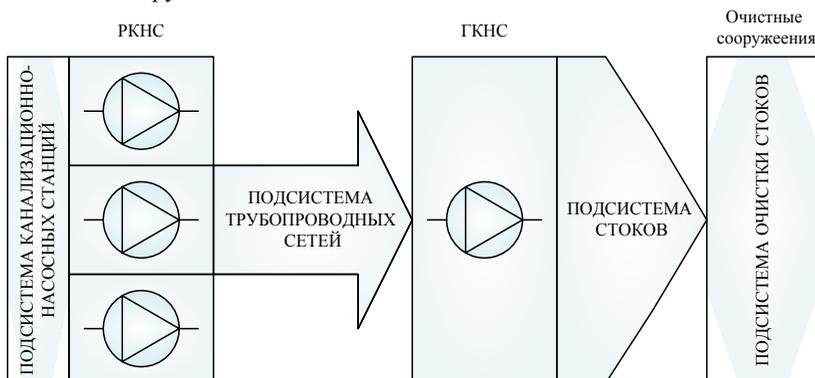


Рисунок 1 – Взаимодействие подсистем системы водоотведения в общем виде

– Подсистема очистки стоков – реализует комплекс мероприятий по удалению загрязнений, содержащихся в бытовых и промышленных потребителях перед выпуском их в водоемы. При наличии биологической очистке стоков выступает наиболее энергоемким потребителем электроэнергии по сравнению с другими подсистемами за счет непрерывной работы воздушного оборудования и работой мощных насосов по перекачке активного ила.

– Подсистема канализационных сетей – представляет собой совокупность трубопроводных линий для перекачки стоков к местам очистки. Обуславливает затраты электроэнергии на компенсацию потерь напора при транспортировке стоков.

– Подсистема стоков. Характеризует систему количественными (объем стоков) и качественными признаками (температура, химические показатели).

В практических условиях, взаимосвязь между энергетикой и технологией принимают более сложный вид. К примеру, технологическая система водоотведения может одновременно осуществлять как

биологическую, так и естественную очистку стоков, а городские и районные насосные станции, а также трубопроводные сети могут существенно отличаться между собой по установленной мощности и пропускной способности соответственно, либо вовсе находится на балансе другого предприятия, как показано на рисунке 2.

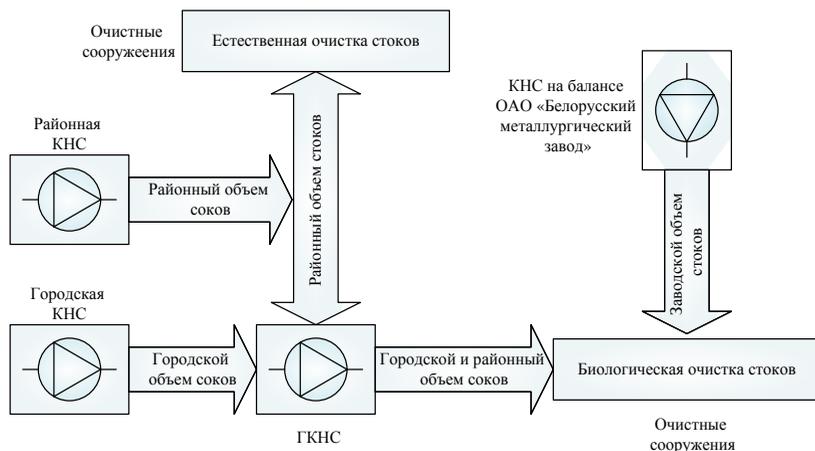


Рисунок 2 – Связь энергетики и технологии транспорта стоков в практических условиях функционирования на примере КЖУП «Уником» г. Жлобин, РБ

Очевидно, что достоверно учесть все особенности работы предприятия, используя существующий аналитический инструментарий, используемый в странах СНГ [1, 2, 3], не представляется возможным хотя бы по той причине, что в практических условиях на ЭЭФ воздействует большое количество факторов, которые в ряде случаев даже не связаны с производственной деятельностью предприятия. К примеру, связь температуры наружного воздуха, температуры сточных вод и удельного расхода ЭЭ отчетливо наблюдается даже без применения математического анализа. Увеличение температуры наружного воздуха приводит к росту температуры стоков и снижению удельного расхода ЭЭ (рисунок 1.3).

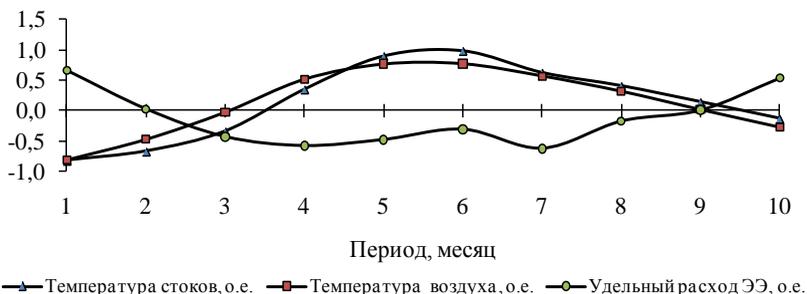


Рисунок 1.3 – Изменение температуры и удельного расхода в течение года в относительных единицах

Кроме того, на формирование удельных и общих расходов ЭЭ влияет также техническое состояние электрооборудования и трубопроводных сетей, химический состав стоков и атмосферные осадки, которые, не смотря на развитую систему водоотведения, попадают в водосточные каналы и разбавляют концентрацию стоков, тем самым снижая их плотность и улучшая химические показатели.

Предлагаемый комплексный подход к управлению энергетической эффективностью в технологической системе водоотведения основан на модели электропотребления, а точнее на аддитивной, многофакторной регрессионной модели общего (удельного) расхода ЭЭ [4-8]. В роли факторов могут выступать различные показатели подсистем такие как: объемы и химический состав стоков, температура наружного воздуха и объемы атмосферных осадков.

Впервые такая система была апробирована для предприятий трубопроводного транспорта нефти и предприятия по производству химических волокон [5].

Основой построения моделей общих и удельных расходов электрической энергии является информационная база данных (ИБД), которая формируется за счет суточной статистики энергетических, климатических и производственных показателей работы водоотводящих предприятий [9,10]. Статистическая выборка ИБД используется для разработки математической модели методами регрессионного анализа, которая в дальнейшем позволяют решать задачи эффективного энергоуправления в условиях изменения влияющих факторов.

Сбор и обработка статистических данных

Последовательность этапов работы, определяющих общий порядок действий при моделировании режимов электропотребления в системе водоотведения, включает в себя разработку схемы электропотребления, сбор первичной информации об исследуемом объекте и информации по

статьям расхода производственных, климатических и энергетических показателей.

На первом этапе составляется структурная схема с выявлением всех задействованных в технологическом процессе объектов, определяются энергетические потоки между технологическими подсистемами (рис. 2), а также общезаводские и вспомогательные расходы ЭЭ. Именно на этом этапе происходит понимание взаимосвязи системы с отдельными ее элементами.

Основой сбора первичной информации об исследуемом объекте является анализ режимов работы технологических установок. Здесь определяется степень контроля энергетическими службами предприятия подачи воздуха на аэротенки, наличие автоматизации воздухоудовного и насосного оборудования, а также особенности их работы. Выполнение требований этого этапа позволяет в дальнейшем упростить задачу поиска факторов, которые должны быть включены в модель, основываясь на технических соображениях. Кроме того, анализ режимов работы потребляющих ЭЭ установок в дальнейшем позволяет интерпретировать полученные результаты моделирования.

Наиболее значимым этапом моделирования электропотребления является процедура сбора информации по статьям расхода. На этом этапе определяются суточные объемы перекаченных и очищенных стоков; определяется фактическое электропотребление технологических подсистем и системы в целом; по показаниям гидрометцентра определяются ретроспективные данные выпавших осадков и температуры окружающей среды; производится сбор информации о химическом составе приходящих стоков. В конечном счете, точность построения модели определяется накопленной статистической информацией, которая должна выполнять условие однородности дискретизации периода накопления. Необходимый объем выборки при этом составляет 365 суток [11].

Часто при формировании информационной базы данных одно или несколько результатов выборки существенно отличаются от основной массы значений. Результаты не выявленных выбросов могут привести к искажению статистических расчетов и, соответственно, к некорректному определению математической зависимости электропотребления.

Существующие методы оценки выбросов основаны на поиске доверительных интервалов, под которыми понимаются границы прогноза, т.е. верхний и нижний предел, в рамки которых, с точностью не менее 5 % попадут исследуемые значения [6]. Оценка доверительных интервалов основывается на различных статистических критериях. К таким критериям относятся критерий Шовене, критерий Романовского, Q -критерий [11-13].

К наиболее простому статистическому критерию следуют отнести правило трех сигм ($3 \cdot \sigma$), которое позволяет без использования табличных данных выявить выбросы. Данный метод цензурирования используется

при нормальном законе распределения случайной величины, которому, как правило, подчиняются исследуемые значения в системе водоотведения. На рисунке 4 представлено корреляционное поле статистических наблюдений. В результате проверки ИБД на наличие грубых обнаружено 5 выбросов, которые в дальнейших расчетах исключались из общей информационной статистики.

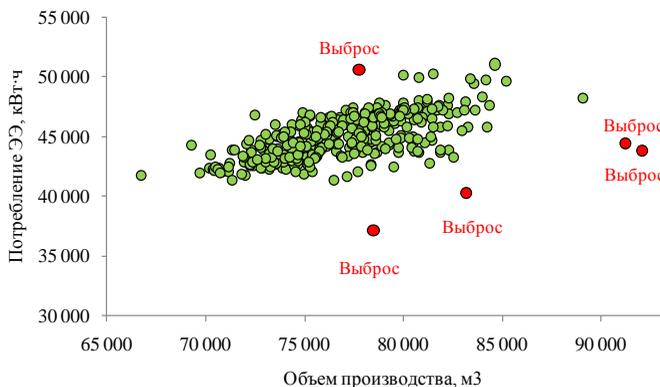


Рисунок 4 – Пример корреляционного поля с выбросами, исключенными из общей выборки

Наиболее предпочтительной моделью для решения задач прогнозирования в системе водоотведения является аддитивная модель множественной регрессии, уравнение которой принимает вид:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot z_1 + b_2 \cdot z_2 + \dots + b_k \cdot z_k, \quad (1)$$

где \hat{y} – теоретическое значение результативного признака. k – порядковый номер влияющего фактора b .

Общий метод, позволяющий оценивать неизвестные коэффициенты регрессии b_k , является метод наименьших квадратов (МНК), разработанный К. Гауссом и А. Марковым. Сущность метода заключается в минимизации суммы квадратов отклонений эмпирических значений результативного признака от теоретических [7]:

$$F = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - f(b_0 + b_1 \cdot z_1 + b_2 \cdot z_2 + \dots + b_k \cdot z_k))^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

Классическая регрессионная модель должна удовлетворять условиям теоремы Гаусса-Маркова [8]:

1. Модель данных правильно специфицирована. Здесь принимается во внимание линейность модели, ее определенность, а также отсутствие 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. Во избежание ошибок при моделировании электропотребления целесообразно провести исследование формирующих факторов на основе корреляционного анализа.

2. Факторы модели x_i не должны быть постоянными. Это условие позволяет исключить из модели факторы, которые не изменяются, либо изменяются не существенно в течение периода исследования. К примеру, к таким факторам можно отнести диаметры трубопроводных сетей, глубина погружения аэратора, площадь аэрации и др.

3. Погрешность модели не носит систематический характер, т.е. распределение случайной величины является нормальным с нулевым математическим ожиданием (рис. 5):

$$M(\varepsilon) = 0. \quad (3)$$



Рисунок 5 – Диаграмма распределения погрешности модели электропотребления в системе водоотведения

4. Ошибки модели некоррелированы между собой, т.е. ковариация случайных ошибок ε любых двух разных наблюдений равна нулю:

$$\text{Cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0 \quad \forall i, j. \quad (4)$$

где $i \neq j$.

5. Однородная вариативность значений (гомоскедастичность), т.е. одинаковость дисперсии ошибок модели. Одним из распространенных методов исследования на гомоскедастичность является визуальный анализ графиков остатков. Основной целью данного анализа является нахождение

влияющих факторов на изменение дисперсии [9]. На корреляционном поле рисунка 6 приведены результаты оценки распределения погрешности модели, дисперсия которых имеет однородную вариантность.

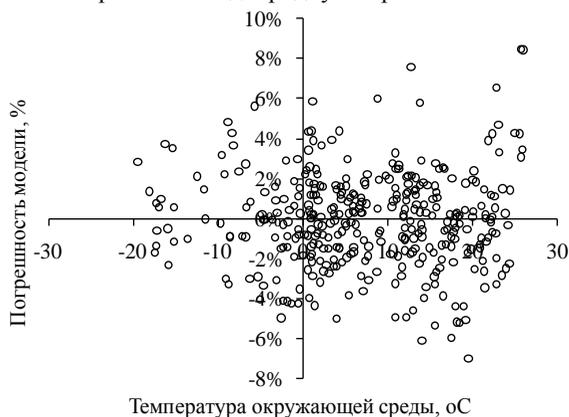


Рисунок 6 – Проверка модели на гомоскедастичность при исследовании фактора температуры окружающей среды

При построении математической модели важно установить, соответствует ли уравнение регрессии экспериментальным данным и достаточно ли включенных в уравнение объясняющих переменных для описания зависимой переменной. Проверка значимости математической модели основывается на оценке значимости коэффициентов и уравнения регрессии [11,14].

Обоснование факторов, включенных в модель, и оценка их статистической значимости

Отличие итоговой модели для различных предприятий определяется наличием автоматизированной работы станции очистки стоков. Однако даже в том случае, если на водоканалах непрерывный мониторинг содержания растворенного кислорода силами лаборатории не осуществлен, но регулирование работы воздухоудвнного оборудования все же осуществляется по общей тенденции снижения либо увеличения показателей очистки, в этом случае химические показатели стоков должны отразиться в общей выборке данных, при этом степень их значимости определяется на основании анализа статистических гипотез.

К примеру, на предприятии КПУП «Гомельводоканал» процесс очистки стоков не автоматизирован, что отражается при расчете значимости коэффициентов регрессии (таблица 1). Из выборки данных при построении модели были исключены факторы, не удовлетворяющие заданной степени надежности, а именно химические по ХПК, БПК₅, и азот общий.

Для предприятия УП «Витебскводоканал» процесс очистки стоков также не автоматизирован, однако, не смотря на это значимость химических показателей достаточна для включения коэффициентов в общую модель.

В общем случае при неавтоматизированной работе воздухоудовного оборудования значимость химического состава стоков определяется инертностью ручного регулирования подачи воздуха в аэротенки сотрудниками предприятия после получения лабораторных показаний. Однако, даже в таком случае не всегда получается предсказать динамику изменения химического состава стоков, поскольку анализ качества производится не чаще чем раз в 2-3 дня в соответствии с регламентом.

Таблица 1 – Результаты проверки значимости коэффициентов регрессии для разных водоканалов

Параметры модели	КПУП «Гомельводоканал»		УП «Витебскводоканал»	
	t-статистика	P-Значение	t-статистика	P-Значение
Условно-постоянный коэффициент	11,16	6,15E-25	14,96	1,9E-39
Объем стоков, тыс. м ³	25,24	8,21E-81	8,29	2,5E-15
Температура окружающей среды, °C	-16,50	1,24E-45	-13,65	2,7E-34
Кол-во атмосферных осадков, мм	-4,33	1,91E-05	-5,30	2,1E-07
ХПК, мг/л	-0,30	0,76 не значим	1,7E-08	1,7E-08 значим
БПК5, мг/лO ₂	-2,08	0,04 не значим	1,9E-17	1,9E-17 значим
Азот общий, мг/л	-1,62	0,11 не значим	1,2E-04	1,2E-04 значим

Графическое сравнение полученной модели удельного потребления ЭЭ с фактическими данными удельного электропотребления представлены на рисунке 7.

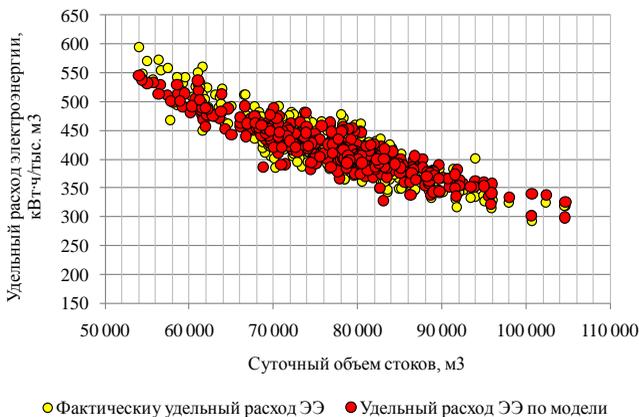


Рисунок 7 – Сравнение фактического удельного расхода ЭЭ с результатами многофакторной модели

Таким образом, многофакторная модель электропотребления в системе водоотведения может быть представлена:

– для предприятий с неавтоматизированным процессом очистки стоков:

$$W = w_{уд.тех} \cdot Q_{сток} + a \cdot t_{окр} + b \cdot N_{осад} + W_{усл.п}, \quad (5)$$

где $Q_{сток}$ – суточный объем стоков, тыс. м³; $t_{окр}$ – температура окружающей среды, °C; $N_{осад}$ – количество выпавших осадков, мм; a – коэффициент регрессии перед фактором температуры окружающей среды, кВт·ч/°C; b – коэффициент регрессии перед фактором количества выпавших осадков, кВт·ч/мм.

– для предприятий при наличии ручного регулирования или автоматизированного регулирования подачи воздуха в аэротенки:

$$W = w_{уд.тех} \cdot Q_{сток} + a \cdot t_{окр} + b \cdot N_{осад} + W_{хим} + W_{усл.п}, \quad (6)$$

где $W_{хим}$ – затраты электроэнергии обусловленные химическим изменением стоков, кВт·ч, определяется по формуле:

$$W_{хим} = (c \cdot \text{ХПК} + d \cdot \text{БПК}_5 + e \cdot \text{NH}_4), \quad (7)$$

где ХПК, БПК₅ и NH₄ – химические показатели сточных вод, мг/л; c , d , e – коэффициент регрессии перед факторами ХПК, БПК₅ и NH₄ соответственно, кВт·ч/мг/л.

Максимальная величина суточного среднего квадратичного отклонения модели для исследуемых систем не превышала 4,9%. Погрешность годового прогнозирования общих и удельных расходов ЭЭ при верификации результатов с данными статистической отчетности

предприятия составила менее 1 % с квартальным разбросом от -3,3 % до 3,6 %.

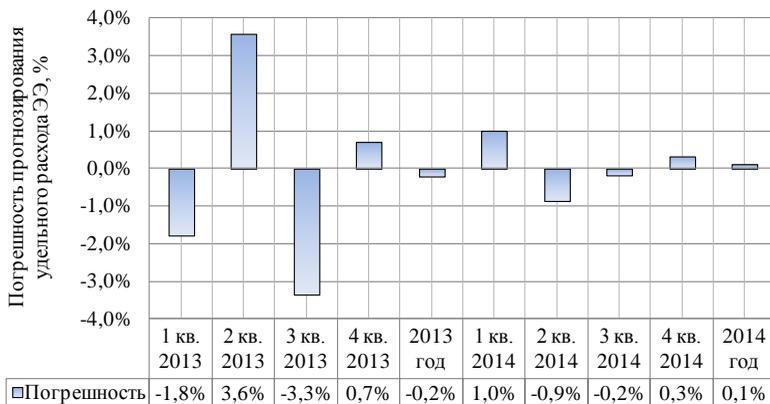


Рисунок 8 – Верификация модели электропотребления

Выводы

1. Существующие методы оценки энергоэффективности технологических систем водоотведения базируются на определении единичных режимов работы электрооборудования и не позволяют учитывать свойства целостности системы и взаимосвязи составляющих подсистем.

2. Разработаны базовые многофакторные аддитивные модели электропотребления технологических систем водоотведения, основанные на обработке статистических показателей производственной деятельности предприятия, позволяющие осуществлять планирование общих и удельных расходов электрической энергии со среднегодовой погрешностью менее 1 % и квартальным разбросом от -3,3 % до 3,6 %.

3. Разработанные многофакторные модели учитывают взаимосвязь между электропотреблением, объемами перекаченных стоков, температурой окружающей среды, количеством выпавших осадков и химическим составом стоков.

4. Установлено, что при неавтоматизированной работе воздухоудного оборудования значимость химического состава приходящих стоков на изменение общих и удельных расходов электроэнергии определяется инертностью ручного регулирования подачи воздуха в аэротенки сотрудниками предприятия после получения лабораторных показаний.

Список использованных источников:

1. Методика нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов для предприятий и организаций жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь – Минск, 2010.

2. Методические рекомендации по определению потребности в электрической энергии на технологические нужды в сфере водоснабжения, водоотведения и очистки сточных вод – Москва, 2007.
3. Методика расчета норм расхода электрической энергии на забор и перекачку воды по групповым магистральным водопроводам (утверждена приказом Председателя Комитета государственного энергетического надзора и контроля Министерства индустрии и новых технологий Республики Казахстан от 24 декабря 2012 года № 122-п)
4. Токочакова Н.В. Расчетно-статистические модели режимов потребления электроэнергии как основа нормирования и оценки энергетической эффективности / Н.В. Токочакова, Д.Р. Мороз // Минск: «Энергоэффективность», №1, 2006. - с. 14-15., №2, 2006. - с. 14-15.
5. Токочакова Н.В. Управление энергоэффективностью промышленных потребителей на основе моделирования режимов электропотребления / Н.В. Токочакова // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2006. № 3. С. 67-75.
6. Токочакова, Н. В. Методология оценки энергоэффективности транспорта нефти на основе моделирования электропотребления : Дисс. . . . д-ра техн. наук : 05.14.01 / БНТУ, Гом. гос. техн. ун-т. – Минск – Гомель, 2007. – 357 с.
7. Грунтович Н.В., Токочакова Н.В. Проблемные зоны системы управления энергоэффективностью промышленных потребителей республики//Энергоэффективность. 2008. № 3. С. 6-10
8. Грунтович Н.В. Экспертные системы управления энергоэффективностью и энергетической безопасностью. Энергоэффективность: опыт, проблемы, решения. 2014. № 4. С. 16-20.
6. Грунтович Н. В., Шенец Е.Л. Влияние структуры потребления ТЭР предприятия на эффективность внедрения мероприятий по энергосбережению. «Энергетика» (Известия вузов и энергетических объединений СНГ), 2014 г, №2, с.58-66.
7. Токочакова, Н. В. Определение договорных значений мощности и прогнозная оценка электропотребления рабочих суток промышленных потребителей региона: автореф. дис.. канд. техн. наук: 05.09.03/Н. В. Токочакова; МЭИ. -М., 1990 -19 с.
8. Токочакова Н.В. Структурное моделирование суточного электропотребления промышленных предприятий энергосистемы для быстрой оценки электросбережения / Н.В. Токочакова, В.И. Токочаков, Т.В. Алферова // Энергоэффективность: опыт, проблемы, решения. 2001. № 2. С. 18-21.
9. Совершенствование систем управления энергетической эффективностью и экономической безопасностью промышленных предприятий Грунтович Н.В., Грунтович Н.В., Ефремов Л.Г., Федоров О.В. Вестник Чувашского университета. 2015. № 3. С. 40-48.

10. Токочакова, Н. В. Управление энергоэффективностью промышленных потребителей на основе моделирования режимов электропотребления/Н. В. Токочакова//Изв. высш. учеб. завед. и энерг. обь-ний СНГ -Энергетика. -2006. -№ 3. -С. 67-75.

11. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон; под ред. Е. К. Масловского. – Москва : Издательство «Мир», 1978. – 420 с.

12. Ивченко Г.И., Медведев Ю.И. Введение в математическую статистику: Учебник. М.: Издательство ЛКИ, 2010. —600 с.

13. Кристофер Доугерти. Введение в эконометрику. — 2-е, пер. с англ. — М.: ИНФРА-М, 2004. — 419 с.

14. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. – М.: Физматлит, 2006. — 816 с.

Капанский Алексей Александрович, магистр, Беларусь, Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, kapanski@mail.ru.

THE MANAGEMENT EFFICIENCY OF PIPELINE WATER DISPOSAL SYSTEMS BASED ON MULTIVARIATE MODELLING OF ENERGY CONSUMPTION

A.A Kapansky

Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi (Belarus)

Abstract. The paper presents the basic multivariate regression models of electricity technological wastewater systems. The basis for the construction of models of general and specific electrical energy consumption is an information database, which is formed by the daily statistics of energy, climate and production performance of drainage enterprises.

The results of scientific research can be used by organizations of housing and communal services, providing wastewater services to plan general and specific electricity consumption and evaluation of energy efficiency state.

Keywords: model of electricity, sewerage system, energy efficiency, the share of electricity consumption, electricity.

Kapansky A.A, MA, Belarus, Gomel State Technical University. P.O. Sukhoi, kapanski@mail.ru.