

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-5-436-451

УДК 621.311

## **Энергоэффективность технологических систем водоснабжения и водоотведения и методы ее оценки**

**А. А. Капанский<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого (Гомель, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016  
Belarusian National Technical University, 2016

**Реферат.** Рассмотрены существующие методы оценки энергетической эффективности технологических систем водоснабжения и водоотведения. Основным инструментом существующих методик – расчетно-аналитический метод, в соответствии с которым определение общих и удельных расходов электрической энергии базируется на оценке фактического расхода, напора и коэффициента полезного действия насосного агрегата. Однако в практических условиях на эти характеристики воздействует множество факторов, которые оказывают влияние на результирующее значение энергетической эффективности и приводят к погрешностям в расчетах. К таким факторам относятся техническое состояние оборудования и трубопроводных сетей, изменение режимов работы насосных агрегатов с течением времени, заметное влияние на электропотребление температуры окружающей среды, объема атмосферных осадков и химического состава стоков. Как объект управления системы водоснабжения и водоотведения обладают свойством целостности, в связи с чем оценка показателей энергоэффективности трубопроводных предприятий должна базироваться на системном подходе, тогда как существующие методы основаны главным образом на анализе режимов работы единичного электрооборудования, а не всей технологической системы. Приведена система управления энергетической эффективностью трубопроводных систем водоснабжения и водоотведения, которая основывается на информационной базе статистических данных энергетических, гидравлических и производственных показателей водоканализационного хозяйства. Представлены разработанные базовые математические модели общих и удельных расходов электрической энергии в системах водоснабжения и водоотведения, которые являются основой для решения задач прогнозирования и оценки текущего состояния энергетической эффективности работы предприятий, выбора приоритетных направлений энергосбережения и поиска резервов экономии топливно-энергетических ресурсов.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, водоснабжение, водоотведение, топливно-энергетические ресурсы, методы оценки

**Для цитирования:** Капанский, А. А. Энергоэффективность технологических систем водоснабжения и водоотведения и методы ее оценки / А. А. Капанский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 5. С. 436–451

---

### **Адрес для переписки**

Капанский Алексей Александрович  
Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого  
просп. Октября, 48а, корп. 2,  
246746, г. Гомель, Республика Беларусь  
Тел.: +375 232 48-86-12  
kaf\_power@gstu.by

### **Address for correspondence**

Kapansky Aleksey A.  
P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel  
48a, build. 2, October Ave.,  
246746, Gomel, Republic of Belarus  
Tel.: +375 232 48-86-12  
kaf\_power@gstu.by

---

## Energy Efficiency and Assessment Methods of Technological Systems of Water Supply and Water Disposal

A. A. Kapansky<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel (Gomel, Republic of Belarus)

**Abstract.** The existing methods for assessing the energy efficiency of technological systems of water supply and water disposal are examined. The main tool of the existing methods is a settlement-and-analytical method, and, in accordance with the mentioned one, the determining of general and specific electric power consumption is based on actual consumption evaluation, evaluation of pressure and efficiency of the pump unit. However, in practical terms a lot of factors influence on those characteristics therefore affecting the resulting magnitude of energy efficiency and leading to errors in the calculation. These factors include the technical condition of the equipment and piping systems, alterations in the modes of operation of pumping units over time, a significant impact of the ambient temperature on the power consumption, amount of precipitation and the chemical composition of the effluent. As an object of management water supply and water disposal systems are considered as a totality; therefore the assessment of the energy efficiency of pipeline enterprises ought to be based on a systematic approach, whereas the existing methods are mainly based on an analysis of operating modes of individual electrical equipment, not on the whole technological system. The article describes the management system of energy efficiency of pipeline water supply and water disposal systems. The management system is based on information base of statistic data of power, hydraulic and industrial indexes of wastewater management. The original basic mathematical models of common costs and unit costs of electrical power in the water supply and water disposal systems, which are the basis for the solution of the problems of forecasting and the current state assessment of energy efficiency of enterprises, the selection of priority areas of energy efficiency and finding the ways to save energy resources, are presented.

**Keywords:** energy efficiency, water supply system, water removal system, fuel and energy resources evaluation methods

**For citation:** Kapansky A. A. (2016) Energy Efficiency and Assessment Methods of Technological Systems of Water Supply and Water Disposal. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (5), 436–451 (in Russian)

### Введение

В целях укрепления и формирования системы энергосбережения Республики Беларусь одним из важнейших приоритетов является выполнение комплекса организационных и технических мероприятий, направленных на снижение энергоемкости продукции в промышленном секторе, минимизацию потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ), замещение импортируемых энергоресурсов местными и создание необходимых условий для повышения уровня энергетической безопасности страны. Проводимая активная политика в области энергосбережения только за 2006–2010 гг. с объемом финансирования 2438,7 млрд бел. руб. позволила обеспечить экономический эффект в секторе ЖКХ в размере 1313,0 тыс. т у. т. при среднегодовом значении 262,6 тыс. т у. т. [1]. Экономический эффект от энергосберегающих мероприятий за 2014 г. составил 169,7 тыс. т у. т. [2].

Государственный инструмент регулирования потенциала энергосбережения ЖКХ – это механизм нормирования расходов ТЭР [3, 4]. Кроме то-

го, в основе себестоимости продукции лежит энергетическая составляющая затрат, в связи с чем внедрение технически и экономически обоснованных мероприятий по энергосбережению, прогнозирование и оценка текущего состояния энергоэффективности (ЭЭФ) приводят к совершенствованию системы тарифного регулирования и социальной защиты населения. Современные системы водоснабжения и водоотведения, входящие в структуру ЖКХ, представляют собой сложные технологические комплексы, состоящие из нескольких подсистем, которые взаимодействуют между собой, оказывают влияние друг на друга и формируют режим работы всей технологической системы в целом. Оценка показателей ЭЭФ для таких объектов должна базироваться на системном анализе, тогда как существующие подходы основаны в большинстве случаев на анализе режимов работы единичных электроприемников, а не всей технологической системы.

На формирование ЭЭФ технологических систем водоснабжения и водоотведения в первую очередь оказывают влияние состав насосного оборудования и установки очистки стоков [5]. Для крупного промышленного центра суммарные установленные мощности насосных агрегатов достигают 10 МВт и ежегодно растут. В рамках реализации мероприятий Государственной программы «Чистая вода» только за 2014 г. принято в эксплуатацию и реконструировано более 109 объектов водоснабжения и водоотведения.

С одной стороны, увеличение расхода электроэнергии в технологических системах водоснабжения и водоотведения напрямую связано с развитием и строительством городов и населенных пунктов, которые предусматривают плановый рост трубопроводных сетей и ввод дополнительных насосных станций. А с другой – водоканалы республики активно внедряют мероприятия по энергосбережению, что обеспечивает снижение удельных и общих расходов электроэнергии [6]. Структурные изменения технологических систем требуют пересмотра и развития методических принципов оценки текущего состояния и прогнозирования показателей ЭЭФ водоснабжающих и водоотводящих организаций в условиях изменяющихся производственных программ, развития трубопроводных сетей, изменения качества очистки стоков и проводимых мероприятий в области энергосбережения.

#### **Функционирование технологических систем водоснабжения и водоотведения в современных условиях**

В настоящее время услуги водоснабжения и канализации оказывают 1460 организаций Республики Беларусь, из них 144 относятся к системе Министерства жилищно-коммунального хозяйства. При этом на долю организаций ЖКХ приходится более 85 % объема оказываемых услуг [7]. Для решения социальных задач ежегодно осуществляется целенаправленная работа по развитию системы питьевого водоснабжения и водоотведения, улучшению качества, мониторингу и контролю химических показателей очищаемой сточной и питьевой воды. Производственный контроль качества сточной, поверхностной и питьевой воды в обязательном порядке

осуществляют испытательные лаборатории городских и районных водоснабжающих и водоотводящих организаций. Совершенствование системы управления водоканализационным хозяйством отражается в стремительном развитии автоматизации процессов по запуску и останову насосов, регулированию давления и расходов воды, которые зачастую на водоканалах республики осуществляются дистанционно. Развитие отраслевых и индивидуальных нормативных баз по водопотреблению и водоотведению, контроль технологических расходов и утечек воды приводят к повышению ЭЭФ работы водоканалов.

Развитие технологических систем водоснабжения и водоотведения по сравнению с 2004 г. стремительно увеличивается. Уже в 2011 г. обеспеченность населения централизованным водоснабжением и водоотведением выросла на 6 и 12 % соответственно, обеспеченность систем питьевого водоснабжения сооружениями обработки воды увеличилась на 18 % [8]. Источниками водоснабжения в основном выступают подземные воды, ресурсы которых оцениваются в размере от 43,5 до 49,6 млн м<sup>3</sup> в сутки [8, 9]. Обеспеченность водными ресурсами на душу населения Республики Беларусь значительно выше, чем в соседних странах (Польше, Украине), и составляет 5,8 тыс. м<sup>3</sup>, тогда как среднеевропейская норма 4,2 тыс. м<sup>3</sup>.

Показатель удельного водопотребления за 2010 г. приблизился к европейским стандартам и составил 140–150 л/сут. на человека. Стремительное внедрение водосчетчиков, проводимая политика экономии энергоресурсов и сложное экономическое положение у населения и промышленных предприятий приводят к ощутимым снижениям добычи воды водоканалами страны. Месячная динамика подъема воды из артезианских скважин городской системы водоснабжения, производственные показатели которой за полтора года снизились более чем на 10 %, представлена на рис. 1. Снижение объемов добычи воды, перекачки и очистки стоков отслеживается по всей республике.

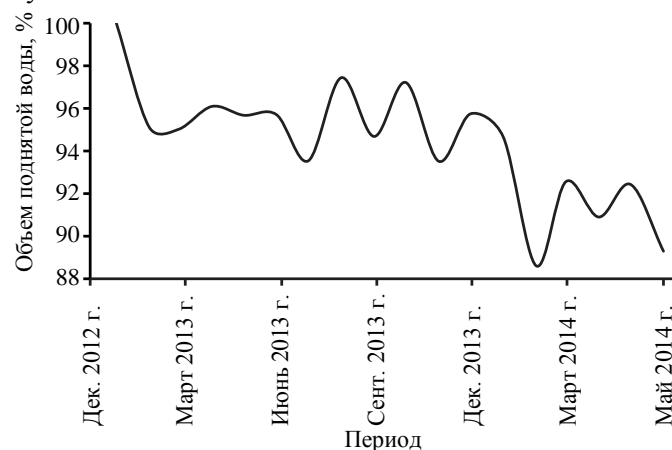


Рис. 1. Месячная динамика подъема воды за 2013–2014 гг. городской системы водоснабжения

Fig. 1. Monthly dynamics of water rise in the urban water supply system, 2013–2014

Снижение объемов производства на объектах водоканализационного хозяйства негативно отражается на оценке фактического состояния ЭЭФ работы предприятия, прогнозировании общих и удельных расходов электроэнергии, что связано в первую очередь с отсутствием методического обеспечения, позволяющего производить оценку ЭЭФ при учете различных влияющих факторов.

### **Существующие методы оценки энергоэффективности и их недостатки**

Государственное регулирование в сфере эффективного использования ТЭР в системах водоснабжения и водоотведения осуществляется путем:

- разработки показателей в сфере энергосбережения;
- нормирования расхода ТЭР;
- проведения энергетического обследования.

Нормирование в системах водоснабжения и водоотведения необходимо для определения потребности в электрической энергии на технологические нужды при заборе воды из природных источников, транспортировании, при доведении воды до нужного качества и поддержании необходимого давления в системе водоснабжения, а также при перекачке в системе водоотведения и очистке сточных вод. Нормы расхода электрической энергии в системах водоснабжения рассчитываются на 1000 м<sup>3</sup> поднятой из природных источников воды, а для водоотведения – на 1000 м<sup>3</sup> перекаченной по городской канализационной сети сточной воды и очищенной до установленного качества. Существующая система нормирования расхода электрической энергии в системе водоканализационного хозяйства осуществляется на основании положения о нормировании расхода топлива, тепловой и электрической энергии в народном хозяйстве Республики Беларусь [3] и Методики нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов для предприятий и организаций жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь [10].

Основной инструмент существующей методики – расчетно-аналитический метод, с помощью которого удельный расход электроэнергии для насосных агрегатов определяется по выражению

$$W_{\text{уд.н}} = 2,72 \frac{H}{\eta}, \quad (1)$$

где  $H$  – полный напор, развиваемый насосом, м;  $\eta$  – коэффициент полезного действия агрегата, о. е.

Удельный расход электроэнергии для воздуходувного оборудования [10]

$$W_{\text{уд.в}} = \frac{26,8 \cdot 10^6 p \cdot \text{БПК}}{\eta K_1 K_2 N_1 N_2 (C_p - C)}, \quad (2)$$

где  $p$  – избыточное давление, создаваемое воздуходувным агрегатом, атм; БПК – величина снятой биологической потребности в кислороде, мг/л,

равная БПК поступающей сточной воды в среднем за год;  $\eta$  – коэффициент полезного действия агрегата, о. е.;  $K_1$  – коэффициент, учитывающий тип агрегата, о. е.;  $K_2$  – то же, зависящий от глубины погружения аэратора, о. е.;  $N_1$  – температурный коэффициент, о. е.;  $N_2$  – коэффициент, учитывающий физико-химические свойства сточной воды, о. е.;  $C_p$  – растворимость кислорода воздуха в сточной воде на 1/2 глубины аэротенка, мг/л;  $C$  – концентрация растворенного кислорода в иловой смеси аэротенка, мг/л.

К недостаткам расчетно-аналитического метода можно отнести трудоемкость и низкую точность расчетов. Погрешности в расчетах обусловлены сложностью фактической оценки рабочих параметров насосного, воздухоудвигного и прочего технологического оборудования, изменением режимов работы насосных агрегатов с течением времени, старением водопроводных и канализационных сетей, заметным влиянием на электропотребление температуры окружающей среды, объемов осадков, химического состава сточных вод при автоматизированной работе системы компрессорного хозяйства предприятия и т. д.

В странах ближнего зарубежья, таких как Россия и Казахстан, кроме расчетно-аналитического метода используется также нормативный, который основан на удельных нормах расхода электрической энергии [11, 12]. Для насосных станций удельные нормативные расходы электроэнергии включают в себя непосредственную перекачку жидкости, работу механических граблей и дробилок, а также общепроизводственные расходы электроэнергии

$$W = (w_n + w_{гр} + w_{др})Q_{г} + W_{в.о} + W_{вент}, \quad (3)$$

где  $w_n$  – удельный расход электрической энергии, потребляемой насосной станцией на перекачку воды (сточных вод), кВт·ч/1000 м<sup>3</sup>;  $w_{гр}$ ,  $w_{др}$  – то же на работу соответственно механических граблей и (или) дробилки при наличии их в составе оборудования насосной станции перекачки сточных вод, кВт·ч/1000 м<sup>3</sup>;  $Q_{г}$  – годовой объем перекачиваемой жидкости, тыс. м<sup>3</sup>;  $W_{в.о}$ ,  $W_{вент}$  – годовой расход электроэнергии на работу вспомогательного оборудования и принудительной вентиляции при ее наличии, тыс. кВт·ч.

Расход электрической энергии очистными сооружениями нормативным методом определяется в зависимости от применения различных способов очистки

$$W = (w_m + w_{об})Q_{г} + w_o M_o + W_{в.о}, \quad (4)$$

где  $w_m$  – показатель удельного расхода электрической энергии на механическую очистку, глубокое осветление и обесцвечивание воды, кВт·ч/м<sup>3</sup>;

$w_{об}$  – то же на обеззараживание воды, кВт·ч/м<sup>3</sup>;  $Q_t$  – годовой объем очищаемой воды, тыс. м<sup>3</sup>;  $w_o$  – удельный расход электрической энергии на озонирование воды, кВт·ч/кг озона;  $M_o$  – количество расходуемого озона, кг.

Нормативный метод расчета используется в том случае, если отсутствуют необходимые данные для определения потребности в электрической энергии расчетно-аналитическим методом в силу невысокой точности расчета [11]. Для оценки деятельности предприятий ЖКХ, направленной на эффективное использование ТЭР, республиканскими органами государственного управления устанавливается целевой показатель (ЦП) по энергосбережению, под которым понимается относительное изменение обобщенных энергозатрат в отчетном периоде по сравнению с базисным периодом. ЦП определяется по выражению [13]

$$\text{ЦП} = \left( \frac{\text{ОЭЗ}^o}{\text{ОЭЗ}^6 + \sum \Delta \text{ОЭЗ}^6} - 1 \right) \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где  $\text{ОЭЗ}^o$  – обобщенные энергозатраты отчетного периода, т у. т.;  $\text{ОЭЗ}^6$  – то же базисного периода, т у. т.;  $\sum \Delta \text{ОЭЗ}^6$  – величина, на которую должны быть изменены обобщенные энергозатраты в сопоставимых условиях, т у. т.

К сопоставимым условиям относятся любые факторы, приводящие к изменению уровня энергопотребления, кроме мероприятий по энергосбережению. Для организаций системы ЖКХ в качестве таких факторов могут выступать: темпы изменения объемов производства; ввод в эксплуатацию новых объектов (водозаборов, очистных сооружений и т. п.); увеличение протяженности водопроводов; качественные показатели питьевой воды после станции водоподготовки; качественные показатели очищенных сточных вод и т. п. К достоинствам ЦП можно отнести возможность оценки выполнения мероприятий, направленных на снижение энергопотребления, к недостаткам – сложность приведения энергозатрат к сопоставимым условиям. Так, в соответствии с инструкцией [13] расчет поправки на изменение объемов производства выполняется по формуле

$$\Delta \text{ОЭЗ} = \sum (V_i^o - V_i^6) W_{уд.i}^6, \quad (6)$$

где  $V_i^o$ ,  $V_i^6$  – объем производства  $i$ -го вида продукции в отчетном и базисном периодах, тыс. м<sup>3</sup>;  $W_{уд.i}^6$  – фактический удельный расход электроэнергии в соответствующем базисном периоде, кВт·ч/тыс. м<sup>3</sup>.

На текущий момент все расчеты, связанные с оценкой ЦП и приведением обобщенных энергозатрат к сопоставимым условиям, учитываются своим изменением к базисному году, где за базис принят фактический удельный расход электроэнергии прошедшего периода. Однако удельный

расход электроэнергии является производным показателем фактического электропотребления и объемов производства, в связи с чем в разных периодах исследования его значение может существенно отличаться (рис. 2).

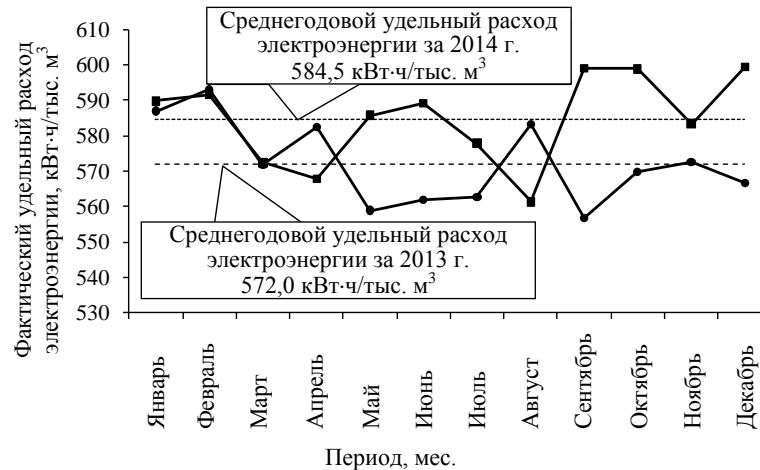


Рис. 2. Сравнение фактических удельных расходов электроэнергии в системе водоснабжения: —●— — 2013 г.; —■— — 2014 г.

Fig. 2. Comparing actual unit costs of electricity in the water supply system: —●— — 2013 year; —■— — 2014 year

Эти отличия вносят существенный вклад в расчет поправки электроэнергии и в конечном итоге влияют на оценку ЦП, приводя к ложному анализу экономического эффекта от проведенных мероприятий по энергосбережению. Так, в Методических рекомендациях по планированию, учету производственных затрат и калькулированию себестоимости услуг (продукции, работ) в жилищно-коммунальном хозяйстве [14] сказано, что при планировании расходов по статье «Электроэнергия» необходимо учитывать снижение объемов реализации услуг, внедрение систем регулирования и других мероприятий по энергосбережению. Однако планирование расходов от базового периода не позволяет производить оценку фактических результатов деятельности, направленной на энергосбережение, и стимулировать производственные службы реализовывать эти мероприятия. Кроме того, оценка экономического эффекта от реализованных мероприятий по энергосбережению усложняется при вводе в эксплуатацию трубопроводных сетей или повышении качества очистки стоков, сопровождаясь при этом изменением объемов производства. В результате таких изменений появляется область неопределенности фактического состояния ЭЭФ.

Характеристики, отражающие расхождение поправки электроэнергии, учитывающей фактическую динамику изменения удельного расхода, от поправки, основанной на базовой норме расхода электроэнергии прошедшего периода, представлены на рис. 3.



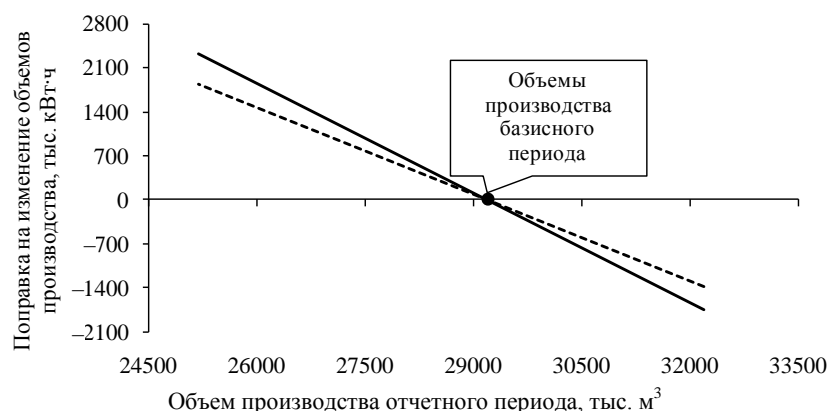


Рис. 3. Оценка погрешности расчета поправки при изменении объемов производства:  
 — по инструкции; ---- по факту

Fig. 3. Estimation of the error correction calculation under the circumstances of alteration of the production volumes: — according to the instructions; ---- according to the actual state of affairs

### Система управления энергоэффективностью

Существующее методическое обеспечение, разработанное несколько десятилетий назад, не может использоваться для оценки текущего состояния энергоэффективности 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. Для решения задач прогнозирования и оценки текущего состояния ЭЭФ необходимо учитывать, что технологическая система водоснабжения и водоотведения как объект управления имеет свои индивидуальные свойства и закономерности функционирования, отличающиеся от закономерностей функционирования отдельных подсистем и элементов, входящих в систему [15]. Сформированная структура управления ЭЭФ технологических систем водоснабжения и водоотведения представлена на рис. 4.

В современных технологических системах водоснабжения и водоотведения возникают затруднения при решении задач, связанных с управлением электропотреблением после воздействия внутренней и внешней среды. К внутренним воздействиям можно отнести ежегодное внедрение на предприятиях ЖКХ подкачивающих и канализационных насосных станций, рост и изменение структуры трубопроводных сетей, ввод в эксплуатацию современного энергосберегающего оборудования. Внешнее воздействие обусловливается изменением конъюнктуры рынка, покупательской способностью населения и промышленных предприятий, что в целом существенно сказывается на производственных показателях.

Как объект управления, система водоснабжения обладает свойством целостности и неделимости. Именно поэтому исследование влияющих факторов базируется на построении многофакторных аддитивных моделей электропотребления, основанных на обработке статистических наблюде-

ний методами регрессионного анализа [6, 16]. В состав информационной базы данных входит суточная статистика ретроспективных производственных показателей, т. е. фактически отработанных показателей прошедшего периода исследования. Эти показатели позволяют учесть действительное изменение объемов производства, климатические особенности региона, а также фактические затраты электроэнергии при транспортировке питьевой воды и стоков.

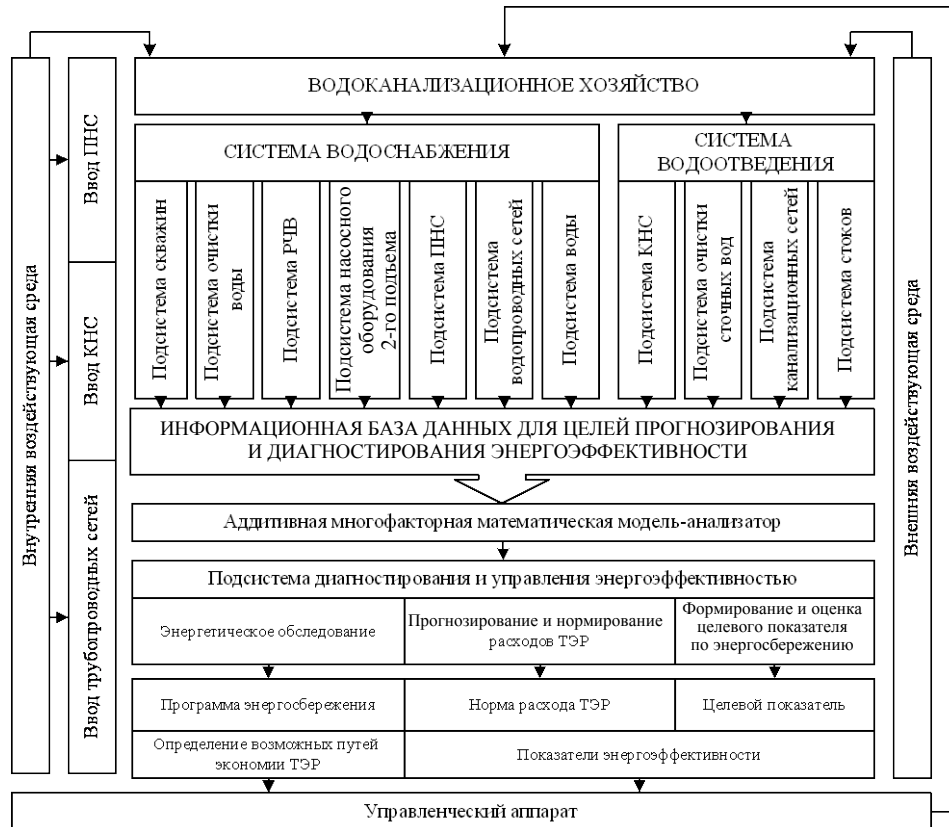


Рис. 4. Схема управления энергоэффективностью технологических систем водоснабжения и водоотведения

Fig. 4. The control circuit of power efficiency of technological systems of water supply and water removal

В роли факторов могут выступать такие показатели подсистем, как:

- объемы поднятой из скважин или поданной потребителю воды;
- объемы перекачиваемых или очищаемых сточных вод;
- температура окружающей среды;
- объемы атмосферных осадков;
- химический состав стоков и др.

Для системы водоснабжения при выборе суточной дискретизации ретроспективных производственных показателей неравномерность часового потребления воды усредняется. Это позволяет не учитывать часовой гра-

фик давления насосных станций, который сильно коррелирует с водопотреблением, и упростить математическое описание потребления электроэнергии. Разработанная базовая многофакторная модель суточного электропотребления в системе водоснабжения описывается зависимостью

$$W = f(Q_1, t_{\text{окр}}) = w_{\text{уд.техн}} Q_1 + at_{\text{окр}} + W_{\text{усл.пост}}, \quad (7)$$

где  $w_{\text{уд.техн}}$  – удельный технологический расход (коэффициент регрессии), кВт·ч/1000 м<sup>3</sup>;  $Q_1$  – количество поднятой воды, м<sup>3</sup>;  $a$  – коэффициент регрессии при факторе температуры окружающей среды, кВт·ч/°C;  $t_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды, °C;  $W_{\text{усл.пост}}$  – условно-постоянная составляющая расхода электроэнергии, кВт·ч.

Для системы водоотведения суточная модель потребления электроэнергии определяется наличием автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУТП). Например:

– для предприятий с неавтоматизированным процессом очистки стоков математическая модель имеет вид

$$W = w_{\text{уд.техн}} Q_{\text{сток}} + at_{\text{окр}} + bN_{\text{осад}} + W_{\text{усл.пост}}, \quad (8)$$

где  $Q_{\text{сток}}$  – объем стоков, тыс. м<sup>3</sup>;  $N_{\text{осад}}$  – количество выпавших атмосферных осадков, мм;  $a$  – коэффициент регрессии перед фактором температуры окружающей среды, кВт·ч/°C;  $b$  – то же перед фактором количества выпавших атмосферных осадков, кВт·ч/мм;

– для предприятий при наличии АСУТП

$$W = w_{\text{уд.техн}} Q_{\text{сток}} + at_{\text{окр}} + bN_{\text{осад}} + W_{\text{хим}} + W_{\text{усл.пост}}, \quad (9)$$

где  $W_{\text{хим}}$  – затраты электроэнергии, обусловленные химическим изменением состава стоков, кВт·ч,

$$W_{\text{хим}} = (c \cdot \text{ХПК} + d \cdot \text{БПК}_5 + e \cdot \text{NH}_4), \quad (10)$$

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

Модель удельного расхода электроэнергии в общем виде может быть представлена

$$W_{\text{уд}} = w_{\text{уд.техн}} + \frac{\sum x_k b_k + b_0}{Q} = w_{\text{уд.техн}} + \frac{W_{\text{факт}} + W_{\text{усл.пост}}}{Q}, \quad (11)$$

где  $Q$  – объем производства продукции, тыс. м<sup>3</sup>;  $w_{\text{уд.техн}}$  – технологический расход электроэнергии, кВт·ч;  $x_k, b_k$  – включенный в модель фактор и ко-

эффицент регрессии модели;  $b_0$  – свободный член уравнения регрессии;  $W_{\text{факт}}$  – расход электроэнергии, обусловленный включением в модель различных факторов, не связанных с технологическими, кВт·ч.

Сформированные математические закономерности позволяют одновременно решать множество актуальных задач. К таким задачам относятся вопросы, связанные с прогнозированием, оценкой текущего состояния и мониторингом ЭЭФ, выбором приоритетных направлений энергосбережения и поиском резервов экономии ТЭР. Зависимости изменения удельного расхода электрической энергии в системе водоснабжения, построенные по разработанным моделям, приведены на рис. 5.

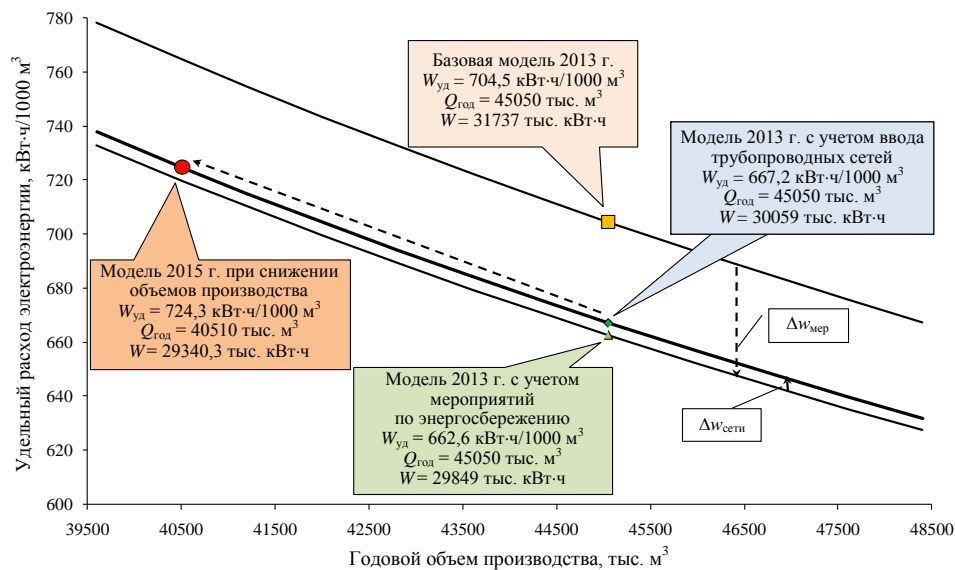


Рис. 5. Изменение удельного расхода модели при внедрении энергосберегающих мероприятий и вводе в эксплуатацию трубопроводных сетей

Fig. 5. The change in specific consumption models under the conditions of energy saving activities implementation and commissioning of pipeline networks

На основании полученных зависимостей установлено:

- 1) внедренные энергосберегающие мероприятия при существующем объеме производства обеспечивают снижение удельного расхода электроэнергии с 704,5 до 662,6 кВт·ч/ тыс. м³;
- 2) ввод в эксплуатацию новых трубопроводных сетей снижает эффект от мероприятий по энергосбережению, в результате чего удельный расход электроэнергии возрастает до 667,2 кВт·ч/тыс. м³;
- 3) наиболее значимым фактором, формирующим удельный расход электроэнергии, является производственная программа. Из-за снижения объемов воды с 45050 до 40510 тыс. м³/год удельный расход электроэнергии возрастает до 724,3 кВт·ч/тыс. м³, что полностью съедает эффект от внедренных мероприятий по энергосбережению.

Погрешность годового прогнозирования общих и удельных расходов электроэнергии при верификации результатов моделирования с данными статистической отчетности предприятия на примере системы водоотведения составила менее 1,0 % с квартальным разбросом от (–3,3) % до 3,6 %, что отражено на рис. 6.

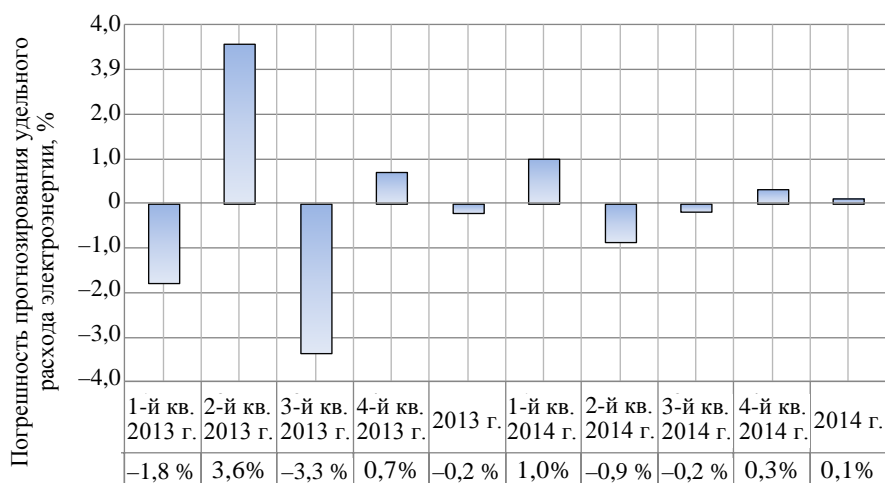


Рис. 6. Верификация модели электропотребления: ■ – погрешность, %

Fig. 6. Verification of the energy consumption model: ■ – error, %

## ВЫВОДЫ

1. Сформирована система управления энергетической эффективностью для трубопроводных систем водоснабжения и водоотведения, основа которой – информационная база данных суточной статистики энергетических, гидравлических и производственных показателей водоканализационного хозяйства.

2. Разработаны модели электропотребления в технологических системах водоснабжения и водоотведения, являющиеся основой для решения задач прогнозирования и оценки текущего состояния энергоэффективности работы предприятий, выбора приоритетных направлений энергосбережения и поиска резервов экономии топливно-энергетических ресурсов.

3. Погрешность годового прогнозирования общих и удельных расходов электроэнергии при верификации результатов многофакторного моделирования с фактическими данными статистической отчетности исследуемого предприятия составила менее 1,0 % с квартальным разбросом от –3,3 до 3,6 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Об итогах работы в 2014 году и задачах по повышению эффективности работы и модернизации жилищно-коммунального хозяйства на 2015 год [Электронный ресурс]: поста-

- новление коллегии Министерства жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь, 28 января, № 1. Режим доступа: [mjkh.gov.by/uploaded/2012/Itogi2014/Itogi2014Z2015.doc](http://mjkh.gov.by/uploaded/2012/Itogi2014/Itogi2014Z2015.doc). Дата доступа: 18.03.2016.
2. Углубленный обзор политики и программ в сфере энергоэффективности Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Секретариат энергетической хартии, 2013. Режим доступа: [http://belgium.mfa.gov.by/docs/belarus\\_ee\\_2013\\_rus.pdf](http://belgium.mfa.gov.by/docs/belarus_ee_2013_rus.pdf). Дата доступа: 18.03.2016.
3. Положение по нормированию расхода топлива, тепловой и электрической энергии в народном хозяйстве Республики Беларусь [Электронный ресурс]: утв. постановлением Комитета по энергоэффективности при Совете Министров Республики Беларусь, 19.11.2002, № 9 // Право. Законодательство Республики Беларусь. Режим доступа: <http://www.levonevski.net/pravo/norm2009/num31/d31029.html>. Дата доступа: 18.11.2015.
4. Энергоэффективность и энергетическая безопасность в Содружестве Независимых Государств [Электронный ресурс] // Организация Объединенных Наций, 2011. Режим доступа: [http://www.unece.org/fileadmin/DAM/ie/se/pdfs/ece\\_energy\\_44\\_r.pdf](http://www.unece.org/fileadmin/DAM/ie/se/pdfs/ece_energy_44_r.pdf). Дата доступа: 11.08.2006.
5. Грунтович, Н. В. Расчетно-аналитический метод нормирования расходов электрической энергии в технологических системах водоснабжения и водоотведения / Н. В. Грунтович, А. А. Капанский // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. 2015. № 2. С. 70–79.
6. 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.
7. О Программе развития жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь до 2015 года [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Республики Беларусь, 8 февраля 2013 г., № 97 // Законодательство Республики Беларусь. Режим доступа: <http://pravo.newsby.org/belarus/postanovsm0/sov697.htm>. Дата доступа: 18.03.2016.
8. О Государственной программе по водоснабжению и водоотведению «Чистая вода» на 2011–2015 годы [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Республики Беларусь, 15.09.2011, № 1234. Режим доступа: <http://www.government.by/upload/docs/file4a18314a78f3e347.PDF>. Дата доступа: 18.11.2015.
9. Карабанов, А. К. Проблемы оценки ресурсов пресных подземных вод на территории Беларуси / А. К. Карабанов, П. С. Лопух, Ю. А. Гледко // Актуальные вопросы инженерной геологии, гидрогеологии и рационального недропользования: материалы IX Университетских геол. чтений, 3 апр. 2015 г., Минск, Беларусь / В. И. Зуй (гл. ред.) [и др.]. Минск: Изд. центр БГУ, 2015. С. 54–56.
10. Об утверждении и введении в действие Методики нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов для предприятий и организаций жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь: приказ Министерства жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь, 9 июля 2007 г., № 125 // Право. Законодательство Республики Беларусь. Режим доступа: <http://pravo.kulichki.com/zak2007/bz12/dcm12308.htm>. Дата доступа: 19.03.2016.
11. Методические рекомендации по определению потребности в электрической энергии на технологические нужды в сфере водоснабжения, водоотведения и очистки сточных вод [Электронный ресурс] / Центр муниципальной экономики и права. Москва, 2007. Режим доступа: [http://www.os39.ru/file/oksana/metodicheskie\\_rekomendatsii\\_po\\_opredele\\_niyu\\_potrebности\\_v\\_elektricheskoi.pdf](http://www.os39.ru/file/oksana/metodicheskie_rekomendatsii_po_opredele_niyu_potrebности_v_elektricheskoi.pdf). Дата доступа: 18.03.2016.
12. Методика расчета норм расхода электрической энергии на забор и перекачку воды по групповым магистральным водопроводам [Электронный ресурс]: утв. приказом Председателя Комитета государственного энергетического надзора и контроля Министерства индустрии и новых технологий Республики Казахстан, 24 дек. 2012 г. № 122-п. Режим доступа: [http://www.kazee.kz/userfiles/ufiles/konkursnaya\\_doks/1.\\_metodika\\_rashcheta\\_norm\\_raskhoda\\_elektricheskoy\\_energii\\_na\\_zabor\\_i\\_perekachku\\_vody.pdf](http://www.kazee.kz/userfiles/ufiles/konkursnaya_doks/1._metodika_rashcheta_norm_raskhoda_elektricheskoy_energii_na_zabor_i_perekachku_vody.pdf). Дата доступа: 19.03.2016.

13. Инструкция по расчету целевых показателей по энергосбережению для предприятий и организаций жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь: утв. постановлением Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь, 01.08.2007, № 40. Режим доступа: [http://www.pravo.by/pdf/2007-214/2007-214\(045-053\).pdf](http://www.pravo.by/pdf/2007-214/2007-214(045-053).pdf). Дата доступа: 13.03.2016.
14. Об утверждении методических рекомендаций по планированию, учету производственных затрат и калькулированию себестоимости услуг (продукции, работ) в жилищно-коммунальном хозяйстве: приказ Министерства жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь, 27 августа 2010 г., № 126а // Право. Законодательство Республики Беларусь. Режим доступа: <http://www.levonevski.net/pravo/norm2013/num13/d13050.html>. Дата доступа: 13.03.2016.
15. 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; 2006. № 2. С. 14–15.
16. 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: международный форум. Витебск: Витебский областной центр маркетинга, 2015. С. 47–51.

Поступила 18.01.2016    Подписана в печать 16.03.2016    Опубликовано онлайн 26.09.2016

#### REFERENCES

1. *On the Results of the Activity in 2014 and Objectives to Improve the Efficiency and to Retrofit of Housing and Communal Services in 2015*. The Resolution of the Collegium of the Ministry of the Republic of Belarus of Housing and Communal Services of Jan. 28, No 1. Mode of Access: [mjkx.gov.by/uploaded/2012/Itogi2014/Itogi2014Z2015.doc](http://mjkx.gov.by/uploaded/2012/Itogi2014/Itogi2014Z2015.doc). Date of Access: 18 March 2016 (in Russian).
2. Energy Charter Secretariat (2013) *Profound Review of Policies and Programmes in the Area of Power Energy Efficiency of the Republic of Belarus*. Mode of Access: [http://belgium.mfa.gov.by/docs/belarus\\_ee\\_2013\\_rus.pdf](http://belgium.mfa.gov.by/docs/belarus_ee_2013_rus.pdf). Date of Access: 18 March 2016 (in Russian).
3. The Provision on Rationing of Consumption of Fuel, Thermal and Electric Energy in the National Economy of the Republic of Belarus: Approved by the Resolution of the Committee on Energy Efficiency at the Council of Ministers of Belarus, 19.11.2002, No 9. *Right. Legislation of the Republic of Belarus*. Mode of Access: <http://www.levonevski.net/pravo/norm2009/num31/d31029.html>. Date of Access: 18 Nov. 2015 (in Russian).
4. Power Efficiency and Power Security in the Commonwealth of Independent States. *United Nations*. 2001. Mode of Access: [http://www.unece.org/fileadmin/DAM/ie/se/pdfs/ece\\_energy\\_44\\_r.pdf](http://www.unece.org/fileadmin/DAM/ie/se/pdfs/ece_energy_44_r.pdf). Date of Access: 11 Aug., 2006 (in Russian).
5. Gruntowych N. V., Kapansky A. A. (2015) Analytical Method for the Valuation of Costs of Electric Power in the Technological Systems of Water Supply and Sanitation. *Vestnik Gomelskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta Imeni P. O. Sukhogo* [P. O. Sukhoy State Technical University of Gomel], (2), 70–79 (in Russian).
6. Gruntowych N. V., Moroz D. R., Kapansky A. A. (2015) Development of Methodical Support of Diagnostics and Prediction of Energy Efficiency of Technological Systems of Water Supply and Sanitation. *Energoeffektivnost* [Power Efficiency], (3), 20–23. (in Russian).
7. On the Program of the Republic of Belarus Housing Utilities Development till 2015. The Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of 8 Feb. 2013, No 97. *Right. Legislation of the Republic of Belarus*. Mode of Access: <http://pravo.newsby.org/belarus/postanovsm0/sovsm697.htm>. Date of Access: 18 March 2016 (in Russian).
8. *On the State Programme on Water Supply and Sanitation “Clean Water” for 2011–2015*. The Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of 15.09.2011, No 1234. Mode of Access: <http://www.government.by/upload/docs/file4a18314a78f3e347.PDF>. Date of Access: 18 Nov. 2015 (in Russian).

9. Karabanov A. K., Lopuch P. S., Gledko Yu. A. (2015) Problems of the Assessment of Resources of Fresh Underground Waters in the Territory of Belarus. *Aktualnye Voprosy Inzhenernoi Geologii, Gidrogeologii i Ratsionalnogo Nedropolzovaniia: Materialy IX<sup>th</sup> Universitetskikh Geol. Chlenii* [Topical Problems of the Engineering Geology, Hydrogeology and Rational Use of Mineral Resources: Proceedings of the IX University Geology Readings]. Minsk, Izd. Tsentr of BSU [BSU Publishing Center], 2015. 54–56 (in Russian).
10. On Approval and Introduction of the Technique of Rationing of Fuel and Energy Resources for Businesses and Organizations of Housing and Communal Services of Belarus: the order of the Ministry of the Republic of Belarus of Housing and Communal Services, July 9, 2007, No 125. *Right. Legislation of the Republic of Belarus*. Mode of Access: <http://pravo.kulichki.com/zak2007/bz12/dcm12308.htm>. Date of Access: 19 March 2016 (in Russian).
11. Municipal Center for Economics and Law (2007) *Methodic Recommendations for Determining Requirements for Electric Power for Technological Needs in Water Supply, Sanitation and Wastewater Treatment*. Moscow. Mode of Access: [http://www.os39.ru/file/oksana/metodicheskie\\_rekomendatsii\\_po\\_opredeleniyu\\_potrebности\\_v\\_elektricheskoi.pdf](http://www.os39.ru/file/oksana/metodicheskie_rekomendatsii_po_opredeleniyu_potrebности_v_elektricheskoi.pdf). Date of Access: 18 March 2016 (in Russian).
12. *The Method of Calculation of Norms of Consumption of Electric Power on the Seizure and Pumping Water at the Main Water Supply Group*: Approved by the order of the Chairman of the Committee of State Energy Supervision and Control of the Ministry of Industry and New Technologies of the Republic of Kazakhstan of 24 December 2012, No 122-п. Mode of Access: [http://www.kazee.kz/userfiles/ufiles/konkursnaya\\_doks/1.\\_metodika\\_rascheta\\_norm\\_raskhoda\\_elektricheskoy\\_energii\\_na\\_zabor\\_i\\_perekachku\\_vody.pdf](http://www.kazee.kz/userfiles/ufiles/konkursnaya_doks/1._metodika_rascheta_norm_raskhoda_elektricheskoy_energii_na_zabor_i_perekachku_vody.pdf). Date of Access: 19 March 2016 (in Russian).
13. *Instruction for Calculating Targets for Energy Conservation for Enterprises and Organizations of Housing and Communal Services of the Republic of Belarus*: Approved by the Resolution of the State Committee for Standardization of Belarus, 01.08.2007, No 40. Mode of Access: [http://www.pravo.by/pdf/2007-214/2007-214\(045-053\).pdf](http://www.pravo.by/pdf/2007-214/2007-214(045-053).pdf). Date of Access: 13 March 2016 (in Russian).
14. On the Approval of Methodical Recommendations on Planning, Accounting of Production Expenses and Calculation of Cost of Services (Goods, Works) in the Housing and Utilities Sector. Order of the Ministry of the Republic of Belarus of Housing and Communal Services of 27 August 2010, No 126a. *Right. Legislation of the Republic of Belarus*. Mode of Access: <http://www.levonevski.net/pravo/norm2013/num13/d13050.html>. Date of Access: 13 March 2016 (in Russian).
15. Tokochakova N. V., Moroz D. R. (2006) Estimated Statistical Models of the Modes of Consumption of Electricity as the Basis of Energy Efficiency Valuation and Assessment. *Energoeffektivnost* [Power Efficiency], (1), 14–15; (2), 14–15 (in Russian).
16. Gruntowych N. V., Kapansky A. A. (2015) Diagnostics and Forecasting of Energy Efficiency of Technological Systems of Water Supply and Sanitation. *Innovatsii v Energoberezhenie – Investitsii v Budushchee. Mezhdunarodnyi Forum* [Innovations in Energy Efficiency – Investments in the Future. International Forum]. Vitebsk, Vitebsk Regional Center of Marketing, 47–51 (in Russian).