

УДК 620.9:681.5:62-531.3

DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-105-114

СРАВНЕНИЕ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОСТИ ДАННЫХ

А. А. КАПАНСКИЙ, В. А. МАРКОВ, А. А. ЧУХАР

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

Проведен сравнительный анализ моделей электропотребления насосной станции на основе оперативных данных диспетчерского уровня. Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения затрат на электроэнергию за счет оптимизации графика включения скважинных насосов, формирующих значительную долю суммарной мощности водозабора. Дополнительная часть нагрузки связана с поддержанием давления в сети при изменяющемся водопотреблении и рассматривается в работе как объект моделирования для последующей оптимизации расхода электроэнергии. Рассмотрены как физические обоснованные уравнения с экспертными параметрами, так и статистические модели, коэффициенты которых оценивались методом наименьших квадратов. Сравнение показало, что простые зависимости обладают высокой интерпретируемостью, но ограниченной точностью, тогда как регрессионные аппроксимации позволяют снизить средние ошибки прогнозирования до 7 % и обеспечивают коэффициент детерминации до 0,81, что делает их пригодными для практического использования в условиях ограниченного набора данных.

Ключевые слова: электропотребление насосных станций, водозабор, энергоэффективность, прогнозирование нагрузок, регрессионные модели, физико-статистические модели, оптимизация режимов работы, снижение эксплуатационных затрат.

Для цитирования. Капанский, А. А. Сравнение подходов к моделированию энергопотребления насосных станций в условиях ограниченности данных / А. А. Капанский, В. А. Марков, А. А. Чухар // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 4 (103). – С. 105–114. – DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-105-114

COMPARISON OF APPROACHES TO MODELING ENERGY CONSUMPTION OF PUMPING STATIONS UNDER THE CONDITION OF DATA LIMITATIONS

A. A. KAPANSKI, V. A. MARKOV, A. A. CHUKHAR

*Sukhoi State Technical University of Gomel,
the Republic of Belarus*

A comparative analysis of pumping station energy consumption models was conducted based on operational data from the dispatcher level. The relevance of the study is determined by the need to reduce energy costs by optimizing the activation schedule of well pumps, which forms a significant portion of the total water intake capacity. An additional load is associated with maintaining network pressure under fluctuating water consumption and is considered in the study as a modeling object for subsequent energy consumption optimization. Both physically based equations with expert parameters and statistical models, the coefficients of which were estimated using the method of least squares, are considered. The comparison revealed that simple relationships have high interpretability but limited accuracy, whereas regression approximations reduce average forecast errors to 7 % and provide a determination coefficient of up to 0.81, making them suitable for practical use under the condition with data limitations.

Keywords: energy consumption of pumping stations, water intake, energy efficiency, load forecasting, regression models, physical and statistical models, optimization of operating modes, reduction of operating costs.

For citation. Kapansky A. A. Comparison of approaches to modeling energy consumption of pumping stations under the condition of data limitations. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2025, no. 4 (103), pp. 105–114 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-105-114

Введение

Поддержание нормативного давления в гидравлической сети является одним из наиболее энергоемких процессов водоснабжения. Высокий уровень электропотребления определяется непрерывной работой мощных насосных станций, обеспечивающих необходимый напор и подачу воды потребителю [1]. При этом стоимость электроэнергии (ЭЭ) занимает значительную часть в структуре затрат [2], что обуславливает высокую прикладную значимость точного планирования режимов работы водозаборов. Особенно важен прогноз нагрузок в странах с дефицитом электроэнергии, где возникает риск перегрузок сетей и аварийных отключений [3, 4]. В практических условиях к прогнозированию электропотребления прибегают для оптимизации графика включения насосов и оперативного планирования закупок энергии. На мировом уровне для участия в оптовом энергетическом рынке крупные водоканалы обязаны подавать заявку на электроэнергию на сутки вперед. Отклонение фактического потребления от прогнозов регулируются штрафными коэффициентами [5]. В Республике Беларусь планирование потребления электроэнергии осуществляется в конце года на предстоящий календарный период с помесечной детализацией. Превышение фактических значений над установленным лимитом увеличивает стоимость отклонений мощности и энергии в полтора раза, что делает задачу планирования актуальной [6].

Несмотря на существенный прогресс в методах прогнозирования электроэнергии насосных станций, проведенный анализ литературы выявил ряд существенных пробелов, восполнение которых и ставится задачей данного исследования. Большинство изложенных методов предполагает наличие электронной базы данных измерений энергопотребления водозаборов [7, 8]. Однако на практике системы водоснабжения могут не иметь детального учета электроэнергии, доступного для оперативного анализа [9, 10]. В литературе практически не рассмотрены случаи, когда приходится прогнозировать электропотребление исходя только из косвенных признаков, например, таких как подача воды и создаваемое давление [11, 12]. Существенным пробелом остается недостаток работ, посвященных сочетанию физических и статистических моделей в условиях ограниченного набора данных [13]. В этой связи целью исследования является проведение сравнительного анализа различных типов моделей прогнозирования электропотребления насосной станции второго подъема воды и выявление наиболее эффективных подходов для практического применения в системах водоснабжения с ограниченным набором факторов.

Методы исследования

Объект исследования и подготовка исходных данных. В качестве объекта исследования рассматривается энергетический компонент крупнейшего источника водоснабжения Гомеля – водозабора «Сож». Учет электропотребления на объекте разделен на два уровня подъема воды: первый (скважинные насосы) и второй (инфраструктура водозабора). В части данного анализа рассматривается исключительно второй подъем воды, который обеспечивает поддержание заданного давления в городской сети. В структуру этого компонента входят затраты электроэнергии на работу повысительных насосов, общепроизводственные нужды, а также на эксплуатацию технологических агрегатов, используемых для промывки фильтров станции обезжелезивания. На рис. 1 представлена упрощенная структурная схема взаимосвязей технологических подсистем, формирующих инфраструктуру водоснабжения.



Рис. 1. Структурная схема взаимосвязей технологических компонентов водоснабжения

В исследуемой насосной станции второго подъема установлено шесть основных агрегатов для подачи воды в городскую сеть и два вспомогательных насоса для промывки фильтров. Основное давление в сети формируется работой агрегатов № 1 (560 кВт, 2400 м³/ч, 67 м) и № 4 (160 кВт, 500 м³/ч, 59 м), которые оснащены преобразователями частоты и обеспечивают заданное давление на выходе станции. Остальные насосы – резервные и включаются в часы повышенного водопотребления: при максимальной нагрузке работают комбинации № 1 + № 2 (280 кВт, 1300 м³/ч, 58 м) или реже № 4 + № 5 (315 кВт, 1250 м³/ч, 63 м). Для корректного учета режимов работы номинальная подача станции нормируется по двум уровням: при работе одного насоса принимается $Q_{\text{ном}} = 2400 \text{ м}^3/\text{ч}$, а при включении пары насосов $Q_{\text{ном}} = 3250 \text{ м}^3/\text{ч}$. Такой подход позволяет вводить в модель коэффициент загрузки водозабора:

$$k = \min\left(1, \frac{Q_{\text{ч}}}{Q_{\text{ном}}}\right), \quad (1)$$

где $Q_{\text{ч}}$ – фактическая часовая подача воды, м³/ч.

Для насосов второго подъема номинальный суммарный КПД агрегатов (включая двигатель, насос и частотный преобразователь) находится в диапазоне 75–80 %, при этом среднее значение составляет около $\eta_{\text{ср}} = 78 \%$. Эта величина используется в качестве ориентировочного коэффициента для сопоставления гидравлической работы с фактическим энергопотреблением. Идеальная гидравлическая энергия за получасовой интервал рассчитывается по формуле

$$W_{\text{и.г}} = \frac{cgQH}{3600 \cdot 1000}, \quad (2)$$

где Q – подача воды за интервал Δt , м³; 1000 – коэффициент, появление которого обусловлено переходом энергии от Вт · ч к размерности кВт · ч; 3600 – количество секунд в часе; H – напор насоса, м; ρ – плотность воды, кг/м³; g – ускорения свободного падения, м/с².

При подготовке факторов отмечено, что входное давление насосов в эксплуатационных журналах не регистрировалось, в связи с чем в анализ включались только показатели выходного давления станции и объемы подачи воды в город. Проведенный анализ показал, что вариативность входного давления, создаваемого резервуарами чистой воды, относительно колебаний выходного является незначительной и составляет менее 10 %. Поэтому при построении регрессионных зависимостей данный параметр не учитывался, а величина напора для расчета идеальной гидравлической энергии определялась по фиксированному выходному давлению:

$$H = \frac{P_{\text{ВЫХ}} - P_{\text{ВХ}}}{\rho g} \approx \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{\rho g}, \quad (3)$$

где $P_{\text{ВЫХ}}$, $P_{\text{ВХ}}$ – входное и выходное давление насоса второго подъема, Па.

Исследуемые модели электропотребления. Для прогнозирования получасового расхода электроэнергии насосной станции второго подъема были рассмотрены семь различных моделей. В исследовании участвовали уравнения, основанные на расчете идеальной гидравлической работы, гибридные модели, совмещающие физическую основу с эмпирической калибровкой, а также статистические линейные и нелинейные регрессии. Для сопоставления эффективности различных подходов была проведена количественная оценка качества прогнозов. Метрики качества включали сравнение средней абсолютной (MAE), квадратической (RMSE) и процентной ошибок (MAPE), а также коэффициента детерминации (R^2). Дополнительно рассчитывались интегральные показатели: ошибка в суммарной энергии за сутки и месяц, а также ошибка в прогнозировании пиковых нагрузок. Период исследования охватывал 2023 г., при этом данные за январь–ноябрь использовались для обучения моделей, а декабрь – для тестирования. В табл. 1 приведен фрагмент базы статических данных водозабора, выступающий в качестве основы для построения моделей электропотребления.

Таблица 1

Фрагмент базы статических данных после первичного преобразования

Дата и время	Расход ЭЭ, кВт · ч	Подача воды, м ³ /ч	Выходное давление, кПа	Выходной напор, м
01-01-2023 00:00:00	125,7	922,7	350,1	35,7
01-01-2023 00:30:00	242,1	922,7	350,1	35,7
01-01-2023 01:00:00	145,9	827,7	350,1	35,7
01-01-2023 01:30:00	133,2	827,7	349,7	35,7

Базовая физическая модель электропотребления. Данная модель (M1-SIMPLE) представляет собой базовый физический подход к оценке энергопотребления водозабора. Модель используется в качестве отправной точки для сравнения с более сложными методами, так как опирается только на основные гидравлические зависимости и номинальную эффективность насосных агрегатов. Научная гипотеза состоит в том, что фактическое энергопотребление станции второго подъема с достаточной для планирования точностью может быть описано идеальной гидравлической энергией $W_{\text{и.г}}$, скорректированной усредненным коэффициентом полезного действия насосных агрегатов. Модель предполагает, что при фиксированном КПД рост электропотребления линейно связан с увеличением произведения расхода и напора:

$$\hat{W} = W_{\text{усл.п}} + \frac{1}{\eta_{\text{ср}}} W_{\text{и.г}}, \quad (4)$$

где $W_{\text{усл.п}}$ – постоянная составляющая электропотребления, $W_{\text{усл.п}} = 5\text{--}15$ кВт; $\eta_{\text{ср}}$ – среднее значение КПД насосной станции.

Приведенная линейная модель обладает преимущественном простоты построения и физической интерпретируемости. Для прогнозирования требуется минимальный набор исходных данных, а энергетические затраты напрямую соотносятся с гидравлической работой. Вместе с тем данный подход опирается на усредненной оценке КПД и не отражает изменение эффективности насосной станции при различных режимах эксплуатации.

Физическая модель с учетом режимов загрузки. Следующая модификация базовой модели (M2-LOAD) позволяет учесть влияние режимов загрузки насосных агрегатов. В отличие от модели M1-SIMPLE, где эффективность принималось фиксированной и усредненной номинальным КПД, здесь вводится дополнительная поправка, корректирующая энергопотребление при недогрузке:

$$\hat{W} = W_{\text{усл.п}} + \frac{1}{\eta_{\text{ср}}} W_{\text{и.г}} + b((1-k)W_{\text{и.г}}), \quad (5)$$

где b – эмпирический поправочный коэффициент, отражающий влияние загрузки водозабора на изменение электропотребления; k – коэффициент загрузки, определяемый по формуле (1).

В условиях переменного водопотребления конфигурация включения насосов изменяется, что обуславливает различное значение номинальной подачи насосной группы. В расчетах номинальная подача определяется по следующему условию:

$$Q_{\text{н}} = \begin{cases} 2400, & Q \leq 2400, \\ 3250, & Q > 2400. \end{cases} \quad (6)$$

Значение параметра b определяется эмпирически на основе фактических данных электропотребления. Преимущество рассмотренного подхода заключается в том, что модель может использоваться для укрупненной оценки электропотребления при отсутствии исторических данных о режимах работы второго подъема воды. В рамках сравнительного анализа параметр фиксировался на уровне $b = 0,1$.

Физическая модель с регрессионной оптимизацией коэффициентов. Модель M3-CALIB предполагает наличие статистических данных режимов водозабора и опирается на физическую основу через расчет гидравлической работы насосных агрегатов, однако в отличие от M2-LOAD коэффициенты подбираются не эмпирически, а оптимизируются по фактическим данным методом регрессионного анализа:

$$\hat{W} = a_0 + a_1 W_{\text{и.г}} + a_2((1-k)W_{\text{и.г}}), \quad (7)$$

где a_0 , a_1 , a_2 – коэффициенты, определяемые регрессионной аппроксимацией на основе исторических данных.

Преимущество подхода заключается в том, что модель сочетает физическую интерпретируемость с адаптивностью регрессионного подхода. В отличие от предыдущих моделей, где коэффициенты фиксированы, в модели M3-CALIB параметры уточняются на основе исторических измерений.

Результаты и обсуждения

Сравнительная характеристика параметров моделей. Для сопоставления моделей электропотребления станции второго подъема воды в табл. 2 приведены итоговые уравнения с подставленными коэффициентами. Для компактности представ-

ления уравнений введен коэффициент $C = \rho g / 3600 = 2,72 \cdot 10^{-3}$, который учитывает плотность воды $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, ускорение свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ и пересчет времени из секунд в часы.

Таблица 2

**Результаты моделирования электропотребления насосной станции
второго подъема воды**

Наименование модели	Вид уравнения	Примечание
M1-SIMPLE	$\hat{W}(Q, H) = 10 + \frac{C}{0,78} QH$	Коэффициенты заданы методом экспертных оценок на основании паспортных данных КПД насосов и среднего уровня электропотребления
M2-LOAD	$\hat{W}(Q, H) = 10 + \frac{C}{0,78} QH + 0,3((1-k))CQH$	Расширение базовой модели за счет учета коэффициента загрузки k и эмпирического подбора коэффициента модели $b = 0,3$
M3-CALIB	$\hat{W}(Q, H) = -118,6 + 2,32CQH + 0,0479((1-k))CQH$	Коэффициенты $a_0 = -118,6$, $a_1 = 2,32$, $a_2 = 0,0479$ оценены методом регрессионной аппроксимации на базе фактических данных режимов

Примечание. Во всех моделях для прогнозирования электропотребления используются согласованные единицы измерения: подача воды Q , м³; напор H , м; давление P , кПа. Результирующее значение электроэнергии $\hat{W}$, кВт · ч рассчитывается за интервал $\Delta t = 30$ мин.

Сравнительный анализ параметров, представленных в табл. 2, позволяет выявить различия в методологии построения моделей и особенности интерпретации полученных коэффициентов. В базовых моделях M1-SIMPLE и M2-LOAD коэффициенты заданы методом экспертных оценок, учитывая средний уровень электропотребления и КПД оборудования на основе паспортных данных насосов и анализа эксплуатационных характеристик. Эти модели обладают высокой физической наглядностью и позволяют напрямую связать расход электроэнергии с напором и подачей воды, однако в силу своей усредненности не учитывают вариации, присущие фактическим режимам работы водозабора. В свою очередь, в модели M3-CALIB коэффициенты оцениваются методом наименьших квадратов на основании фактических данных, в результате полученные параметры ($a_0 = -118,6$, $a_1 = 2,32$, $a_2 = 0,0479$) обеспечивают лучшее согласование с измерениями, но отрицательный свободный член уравнения свидетельствует о том, что часть дополнительных факторов остается неучтенной.

Анализ показателей качества моделей. Ниже приведены результаты применения и сравнения моделей электропотребления насосной станции второго подъема водозабора «Сож». В табл. 3 демонстрируются основные показатели точности моделей: в качестве критериев использованы метрики, отражающие ошибки как на часовом интервале (MAE, RMSE, MAPE, R^2), так и интегральные характеристики по суткам и месяцу. Анализ получасовых метрик качества необходим для оценки возможности применения полученных моделей насосной станции второго подъема в общей стратегии прогноза электропотребления всего водозабора (с учетом первого подъема воды).

Таблица 3

Сравнение показателей качества моделей электропотребления

Краткое обозначение метрик качества	Единица измерения	M1-SIMPLE	M2-LOAD	M3-CALIB
MAE	кВт · ч	40,9	40,5	23,4
RMSE	кВт · ч	46,4	46	30,2
MAPE	%	26 %	27 %	13 %
R^2	—	0,55	0,56	0,81
$W_{\text{day_err}}$	кВт · ч	835	737	640
$\text{MAPE}_{\text{day_}\%}$	%	9 %	8 %	7 %
$\text{MAE}_{\text{Month}}$	кВт · ч	25 868	22 852	19 832
$\text{MAPE}_{\text{Month}}$	%	9,2	8,1	7
MAE_{Pm}	кВт	139,9	134,7	68,1
$\text{MAPE}_{\text{Pm}\%}$	%	25 %	24 %	12 %

Примечание. MAE – средняя ошибка энергии в получасе; RMSE – среднеквадратичная ошибка энергии в получасе; MAPE – средняя процентная ошибка энергии в получасе; R^2 – коэффициент детерминации энергии в получасе; $W_{\text{day_err}}$ – средняя ошибка суточной энергии; $\text{MAPE}_{\text{day_}\%}$ – средняя процентная ошибка суточной энергии; $\text{MAE}_{\text{Month}}$ – ошибка суммарной энергии за месяц; $\text{MAPE}_{\text{Month}}$ – процентная ошибка суммарной энергии за месяц; MAE_{Pm} – средняя ошибка прогноза максимального пика; $\text{MAPE}_{\text{Pm}\%}$ – средняя процентная ошибка прогноза максимального пика.

Полученные результаты показывают, что простые физические модели (M1-SIMPLE и M2-LOAD) характеризуются относительно высокой ошибкой на получасовом горизонте предсказания ($\approx 26\text{--}27\%$), однако они сохраняют приемлемую точность в оценке суточных энергозатрат (ошибка в среднем $8\text{--}9\%$) и динамике суточной формы мощности ($R^2 \approx 0,55\text{--}0,56$). Эти модели могут использоваться для стартовых ориентиров при моделировании профиля электропотребления, когда в качестве исходных данных доступны исключительно номинальные параметры оборудования и ожидаемые значения внутрисуточной подачи воды. Однако для этих моделей характерна систематическая недооценка пиковых мощностей: прогнозируемые максимумы в среднем на $24\text{--}25\%$ ниже фактических. При наличии статистики наблюдений более высокой точности достигает модель M3-CALIB, которая позволяет выполнить калибровку коэффициентов физических моделей методом наименьших квадратов. В результате подстройки коэффициентов получасовая ошибка снижается до 13% , средняя суточная ошибка – до 7% , а предсказание пиковых нагрузок увеличивает точность до 12% .

На рис. 2 представлены примеры моделей, построенные по номинальным параметрам оборудования (M2-LOAD) и после калибровки коэффициентов (M3-CALIB).

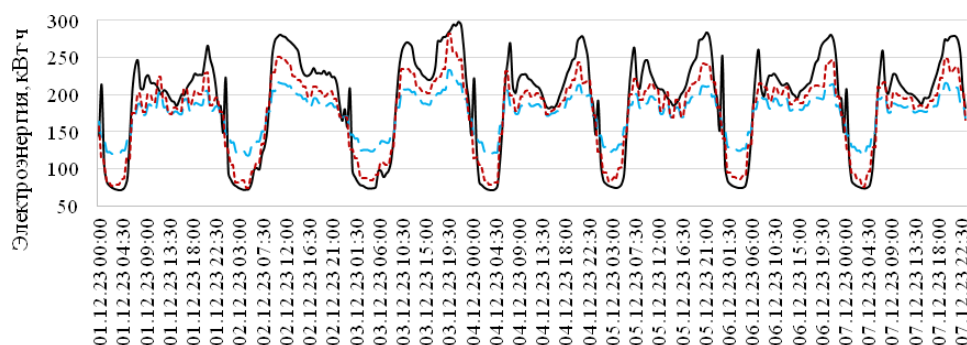


Рис. 2. Сравнение простой физической модели до (M2-LOAD) и после калибровки параметров (M3-CALIB):
— факт; — — — M2-LOAD; - - - M3-CALIB

Заключение

Проведенное исследование выполнено на основе оперативных данных станции второго подъема, используемых диспетчером водозабора и согласованных с эксплуатационными отчетами и системой учета электроэнергии. На этой базе построены и сопоставлены модели, которые опирались на физические уравнения с заданными параметрами методом экспертных оценок, и показателей, рассчитанных методом наименьших квадратов. Анализ показал, что простые модели обеспечивают наибольшую интерпретируемость, однако ввиду низкой точности получасового прогнозирования (средняя ошибка 25–27 %) и коэффициента детерминации (не выше 0,56) их применение целесообразно ограничивать при отсутствии данных для калибровки модели.

Использование подходов с оценкой параметров по методу наименьших квадратов позволило существенно повысить качество аппроксимации. Средняя ошибка прогнозирования электропотребления на получасовом интервале снизилась до 13 %, а коэффициент детерминации достиг 0,81. По месячным суммам электропотребления модели с калибровкой параметров привели к снижению ошибок предсказания с 9 до 7 %, а по пиковой мощности с 25 до 12 %. В целом результаты исследования показывают, что простые физические модели могут служить ориентиром при отсутствии исторических данных, однако при наличии статистики предпочтительно применять регрессионные модели.

Дальнейшее развитие исследования предполагает расширение набора используемых методов за счет включения более сложных статистических и физико-статистических подходов. В частности, планируется рассмотреть линейные регрессионные модели, основанные на использовании подачи и давления в качестве независимых факторов, гидравлические регрессионные зависимости, описывающие электропотребление через произведение расхода и напора, модели с учетом взаимодействий эксплуатационных параметров, а также степенные мультипликативные аппроксимации, позволяющие выявлять скрытую нелинейность процессов.

Литература

1. Świątochowska, M. Optimization of Energy Consumption in the Pumping Station Supplying Two Zones of the Water Supply System / M. Świątochowska, I. Bartkowska // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, N 1. – P. 310. – DOI 10.3390/en15010310
2. Грунтович, Н. В. Прогнозирование удельного расхода электрической энергии при изменении технологических расходов воды в системах городского водоснабжения / Н. В. Грунтович, А. А. Капанский // *Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого*. – 2016. – № 3. – С. 37–45.

3. Application of Machine Learning-based Energy Use Forecasting for Inter-basin Water Transfer Project / S. Yi, G. M. Kondolf, S. Sandoval-Solis, L. Dale // *Water Resources Management*. – 2022. – Vol. 36, N 14. – P. 5675–5694. – DOI 10.1007/s11269-022-03326-7
4. Uncertainty forecasting in a nutshell: Prediction models designed to prevent significant errors / J. Dobschinski, R. Bessa, P. Du [et al.] // *IEEE Power and Energy Magazine*. – 2017. – Vol. 15, N 6. – P. 40–49. – DOI 10.1109/MPE.2017.2729100
5. Alekseev, A. V. Study of the forecasting problem of energy consumption of water pumping station / A. V. Alekseev // *E3S Web of Conferences, Irkutsk, 16–22 June 2019*. – Irkutsk : EDP Sciences, 2019. – Vol. 102. – P. 03001. – DOI 10.1051/e3sconf/201910203001
6. Правила электроснабжения : утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь от 17 окт. 2011 г. № 1394 (в ред. постановлений от 25.05.2020 г. № 309 и др.) // *Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь*. – 2011. – № 5/34630.
7. Капанский, А. А. Методы решения задач оценки и прогнозирования энергетической эффективности / А. А. Капанский // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. – 2019. – Т. 11, № 2 (42). – С. 103–115.
8. Капанский, А. А. Климатические факторы и их роль в управлении энерго- и водопотреблением городской системы водоснабжения / А. А. Капанский // *Наука и техника*. – 2025. – Т. 24, № 1. – С. 72–82. – DOI 10.21122/2227-1031-2025-24-1-72-82
9. Капанский, А. А. Социально-экономические аспекты формирования энергетических режимов городского водоснабжения / А. А. Капанский, О. В. Федоров // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2024. – № 4 (65). – С. 4–13. – DOI 10.18503/2311-8318-2024-4(65)-4-13
10. Identification of Easily Accessible Urban Water Consumption Factors for Energy-Efficient Management of Pumping Stations / A. Kapanski, N. V. Hruntovich, R. V. Klyuev [et al.] // *Water Conservation Science and Engineering*. – Vol. 10. – N 2. – P. 1–16.
11. Коломыцева, И. А. Прогнозирование электропотребления насосной станции с использованием регрессионного анализа / И. А. Коломыцева, Е. С. Котов // *Вестник Торайгыров университета. Энергетическая серия*. – 2024. – № 2. – С. 198–212. – DOI 10.48081/ipwq8799
12. Data-driven predictive energy optimization in a wastewater pumping station / J. Filipe, R. J. Bessa, M. Reis [et al.] // *Applied Energy*. – 2019. – Vol. 252. – P. 113423.
13. Multiple linear regression modelling of on-farm direct water and electricity consumption on pasture based dairy farms / P. Shine, T. Scully, J. Upton, M. D. Murphy // *Computers and electronics in agriculture*. – 2018. – Vol. 148. – P. 337–346.

References

1. Świątochowska M., Bartkowska I. Optimization of energy consumption in the pumping station supplying two zones of the water supply system. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 1, p. 310. <https://doi.org/10.3390/en15010310>
2. Gruntovich N. V., Kapanskiy A. A. Forecasting the specific electric energy consumption under changing technological water flows in urban water supply systems. *Vestnik Gomelskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2016, no. 3, pp. 37–45 (in Russian).
3. Yi S., Kondolf G. M., Sandoval-Solis S., Dale L. Application of machine learning-based energy use forecasting for inter-basin water transfer project. *Water Resources Management*, 2022, vol. 36, no. 14, pp. 5675–5694. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03326-7>
4. Dobschinski J., Bessa R., Du P., Geisler K., Haupt S. E., Lange M., De La Torre Rodriguez M. Uncertainty forecasting in a nutshell: Prediction models designed to prevent significant errors. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2017, vol. 15, no. 6, pp. 40–49. <https://doi.org/10.1109/MPE.2017.2729100>
5. Alekseev A. V. Study of the forecasting problem of energy consumption of water pumping station. *E3S Web of Conferences Irkutsk, 16–22 June 2019*. Irkutsk. EDP Sciences, 2019, vol. 102, art. 03001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910203001>

6. Electricity supply rules. Utverzhdeno postanovleniem Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 17 okt. 2011 g. № 1394, v redaktsii postanovlenii ot 25.05.2020 g. № 309. *Natsional'nyi reestr pravovykh aktov Respubliki Belarus'*, 2011, no. 5/34630 (in Russian).
7. Kapanskiy A. A. Methods for solving the problems of assessing and forecasting energy efficiency. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2019, vol. 11, no. 2 (42), pp. 103–115 (in Russian).
8. Kapanskiy A. A. Climatic factors and their role in managing energy and water consumption in an urban water supply system. *Nauka i tekhnika = Science and Technique*, 2025, vol. 24, no. 1, pp. 72–82 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-72-82>
9. Kapanskiy A. A., Fedorov O. V. Socio-economic aspects of forming energy regimes of urban water supply. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы = Electrotechnical Systems and Complexes*, 2024, no. 4 (65), pp. 4–13 (in Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2024-4\(65\)-4-13](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2024-4(65)-4-13)
10. Kapanski A., Hruntovich N. V., Klyuev R. V., Brigida, V. Identification of easily accessible urban water consumption factors for energy-efficient management of pumping stations. *Water Conservation Science and Engineering*, 2025, vol. 10, no. 2, pp. 1–16.
11. Kolomytseva I. A., Kotov E. S. Forecasting the power consumption of a pumping station using regression analysis. *Vestnik Toraigrov Universiteta. Energeticheskaya seriya*, 2024, vol. 2, pp. 198–212 (in Russian). <https://doi.org/10.48081/ipwq8799>
12. Filipe J., Bessa R. J., Reis M. Data-driven predictive energy optimization in a wastewater pumping station. *Applied Energy*, 2019, vol. 252, art. 113423.
13. Shine P., Scully T., Uhton J., Murphy M. D. Multiple linear regression modelling of on-farm direct water and electricity consumption on pasture-based dairy farms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, vol. 148, pp. 337–346.

Поступила 01.12.2025 г.