

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-72-82>

620.9:621.65:681.5:628.1/.2:504.06

## Климатические факторы и их роль в управлении энерго- и водопотреблением городской системы водоснабжения

Канд. техн. наук, доц. А. А. Капанский<sup>1)</sup>

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

**Реферат.** В статье рассматривается влияние климатических факторов на энерго- и водопотребление городской системы водоснабжения. Цель исследования – выявить взаимосвязи между температурой наружного воздуха, осадками и нагрузкой на систему водоснабжения для обоснования факторов, необходимых для создания сезонных моделей водопотребления и повышения энергоэффективности водозаборов. Задача научной работы заключалась в проверке выдвинутой гипотезы, согласно которой повышение температуры воздуха приводит к увеличению водопотребления и, как следствие, к росту энергозатрат на работу насосных станций и систем водоочистки. Одновременно предполагалось, что атмосферные осадки будут оказывать противоположное влияние, снижая водопотребление в периоды интенсивных дождей. В работе использован корреляционный анализ для оценки силы и направления связей между температурой воздуха, осадками и параметрами энерго- и водопотребления. Для количественной оценки влияния климатических факторов был применен регрессионный анализ. Метод скользящего среднего использован для сглаживания данных и уменьшения разброса случайных колебаний. Также применялись методы фильтрации и отсекаания данных, которые позволили разделить их по температурным порогам и провести отдельные исследования для различных диапазонов. Полученные результаты демонстрируют, что рост энергопотребления тесно связан с увеличением спроса на воду, который возрастает с каждым градусом наружного воздуха. Это объясняется ожидаемым ростом водопотребления на поливы и бытовые нужды в теплые периоды. Температурный фактор выше 25 °С определял 15,8 % водопотребления, что также совпадало с ростом этого вклада и в электропотребление системы (15,6 %). Однако при анализе данных в области отрицательных температур явной связи между температурой и потребностью в воде не наблюдалось. Вместе с тем была выявлена корреляция между температурой и расходом электроэнергии, что связано с дополнительными затратами на поддержание системы водоснабжения в условиях холодного климата. Сделаны выводы о необходимости дальнейшего исследования дополнительных переменных, таких как типы дней недели (рабочие, выходные, праздничные), сезоны года, а также другие социально-экономические факторы, влияющие на водопотребление и энергозатраты. Комплексные результаты работы могут быть использованы для планирования работы водоканалов, управления энергоресурсами и разработки стратегий повышения энергоэффективности в системах водоснабжения.

**Ключевые слова:** энергопотребление, водопотребление, температура окружающей среды, атмосферные осадки, водоснабжение, энергоэффективность, насосные станции, корреляционный анализ, регрессионный анализ, скользящее среднее, сезонные модели

**Для цитирования:** 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. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-72-82>

---

### Адрес для переписки

Капанский Алексей Александрович  
Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого  
просп. Октября, 48,  
246029, г. Гомель, Республика Беларусь  
Тел.: +375 23 220-48-83  
[kapanski@mail.ru](mailto:kapanski@mail.ru)

### Address for correspondence

Kapanski Aliaksey A.  
Sukhoi State Technical  
University of Gomel  
48, Oktyabrya Ave.,  
246029, Gomel, Republic of Belarus,  
Tel.: +375 23 220-48-83  
[kapanski@mail.ru](mailto:kapanski@mail.ru)

## Climatic Factors and Their Role in Energy Management and Water Consumption in the Urban Water Supply System

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

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

**Abstract.** The article considers the influence of climatic factors on energy and water consumption of the urban water supply system. The purpose of the study is to identify the relationships between outdoor air temperature, precipitation and load on the water supply system to substantiate the factors necessary for creating seasonal models of water consumption and increasing the energy efficiency of water intakes. The objective of the scientific work was to test the hypothesis, according to which an increase in air temperature leads to an increase in water consumption and, as a consequence, to an increase in energy costs for the operation of pumping stations and water treatment systems. At the same time, it was assumed that precipitation would have the opposite effect, reducing water consumption during periods of intense rainfall. The work used correlation analysis to assess the strength and direction of the relationships between air temperature, precipitation and energy and water consumption parameters. Regression analysis was used to quantitatively assess the impact of climatic factors. The moving average method was used to smooth the data and reduce the spread of random fluctuations. Data filtering and cutting methods were also used, which made it possible to divide them by temperature thresholds and conduct separate studies for different ranges. The obtained results demonstrate that the growth of energy consumption is closely related to the increase in water demand, which increases with each degree of outside air temperature. This is explained by the expected increase in water consumption for irrigation and household needs during warm periods. Above 25 °C, the temperature factor determined 15.8 % of water consumption, which also coincided with the growth of this contribution to the electricity consumption of the system (15.6 %). However, when analyzing data in the area of negative temperatures, no obvious relationship was observed between temperature and water demand. At the same time, a correlation was found between temperature and electricity consumption, which is associated with additional costs for maintaining the water supply system in cold climates. Conclusions are made about the need for further study of additional variables, such as types of weekdays (working days, weekends, holidays), seasons of the year, as well as other socio-economic factors affecting water consumption and energy costs. The comprehensive results of the work can be used for planning the work of water utilities, managing energy resources and developing strategies to improve energy efficiency in water supply systems.

**Keywords:** energy consumption, water consumption, ambient temperature, precipitation, water supply, energy efficiency, pumping stations, correlation analysis, regression analysis, moving average, k-seasonal models

**For citation:** Kapanski A. A. (2025) Climatic Factors and Their Role in Energy Management and Water Consumption in the Urban Water Supply System. *Science and Technique*. 24 (1), 72–82. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-72-82> (in Russian)

### Введение

Городская система водоснабжения представляет собой сложный механизм, включающий в себя множество взаимосвязанных элементов, таких как насосные станции, водозаборные сооружения, распределительные сети и системы водоочистки. Для эффективного управления этой системой и оптимизации потребления электроэнергии необходимо глубинное понимание особенностей водопотребления. Одной из главных задач в этой области является поиск факторов, которые на первый взгляд могут показаться незначительными, но в действительности оказывают серьезное влияние на общую загрузку всей системы. Учет этих факторов позволяет строить точные модели водопотребления, что способствует более рациональному планированию работы насосных станций и эффективному распределению

энергетических ресурсов, обеспечивая надежность и энергоэффективность всей водоснабжающей инфраструктуры города.

Мировой опыт исследования водопотребления и его влияния на энергетическую эффективность показывает, что различные экзогенные факторы оказывают значительное воздействие на работу систем водоснабжения и их энергопотребление. В научных работах часто выделяется, что одним из значимых факторов выступает температура окружающей среды. Исследования [1] показывают, что в периоды высоких температур значительно возрастает спрос на воду. В исследовании отмечается, что в жарких регионах, таких как южные штаты США, динамика водопотребления подвержена значительным сезонным колебаниям. В регионах с засушливым климатом, где вода является дефицитным ресурсом, электроэнергетическая нагрузка в системе водоснабжения значитель-

но выше из-за необходимости транспортировки воды на большие расстояния или использования энергоемких технологий опреснения. Это повышает общий энергетический уровень потребления в системе водоснабжения, что требует более тщательного планирования ресурсов и учета температурных и климатических факторов.

Продолжая анализ мирового опыта, стоит отметить, что влияние температуры на водопотребление было выявлено и в ряде других исследований. Например, в [2] подчеркивается, что именно температура воздуха является ключевым фактором, определяющим водопотребление в жилых районах крупных городов. Отмечается, что повышение температуры в летние месяцы приводит к увеличению спроса на воду для бытовых нужд и обеспечения комфортных условий в жаркую погоду. Этот эффект особенно заметен в городской среде, где водопотребление может резко возрастать в периоды экстремальных температур, когда требуются дополнительные энергетические затраты на подъем, подачу и очистку воды для поддержания водоснабжения на установленном уровне [3].

Не менее важным фактором является влияние температуры на сельскохозяйственное водопотребление. В [4] отмечается, что в периоды высокой температуры потребление воды для орошения значительно возрастает. В этих условиях обеспечение требуемых объемов воды играет ключевую роль в поддержании роста сельскохозяйственных культур. Это приводит к увеличению как нагрузки на водные ресурсы, особенно в засушливых регионах, где доступ к воде и так ограничен, так и росту энергозатрат на транспортировку и подачу воды на поля. В условиях глобального потепления и учащающихся температурных пиков подобные тенденции могут стать еще более выраженными.

Отечественные исследования также подтверждают значимость температурного фактора в водо- и энергопотреблении систем водоснабжения. Так, в [5] на примере водоканалов Республики Беларусь было установлено, что повышение температуры окружающей среды напрямую влияет на снижение удельного рас-

хода электроэнергии, связанного с уменьшением гидравлического сопротивления в трубопроводах. Это снижение происходит вследствие уменьшения потерь напора в условиях повышения температуры и положительно сказывается на энергоэффективности системы водоснабжения. Однако в жаркие периоды с увеличением водоразбора и подключением дополнительных насосных агрегатов энергозатраты вновь возрастают. Этот эффект особенно заметен в водоканалах городов с протяженными сетями, где температурные колебания оказывают заметное влияние на энергетический баланс систем водоснабжения.

Цель данного исследования – развитие существующих научных работ в области анализа влияния внешних факторов на энергоэффективность водоснабжения в условиях изменения климатических факторов Республики Беларусь. Практическая значимость работы заключается в разработке основ для подбора факторов, необходимых для построения сезонных моделей водопотребления, которые будут использоваться для оптимизации работы насосных станций, что позволит более точно планировать их включение и сократить затраты, связанные с оплатой электроэнергии в неэффективных тарифных зонах. Разработка таких моделей станет важным инструментом в повышении энергоэффективности системы водоснабжения, особенно в условиях изменяющегося тренда водопотребления и растущих температурных колебаний. Научная значимость работы заключается в обосновании ключевых факторов, влияющих на водопотребление, с применением современных методов дисперсионного и корреляционного анализа на основе данных суточного водопотребления Гомеля за длительный период (7 лет).

#### **Источники данных и ключевые показатели системы водоснабжения**

Водоснабжение г. Гомеля представляет собой сложную многоуровневую структуру, состоящую из отдельных подсистем, формирующих общую энергоэффективность. Проведенный в статье [6] анализ современных ис-

следований и практик в области водоснабжения позволяет отметить, что для повышения эффективности и надежности системы на различных уровнях подачи воды требуется интеграция передовых технологий и методик, основанных на принципах интенсивного энергосбережения [7]. Использование продвинутых математических моделей и поиск ключевых влияющих факторов в водоснабжении позволяют более точно прогнозировать и управлять ресурсами [8]. Это не только способствует оптимальному планированию пиковых мощностей водозаборов, но и помогает решать задачи энергосбережения, эффективного распределения ресурсов и загрузки насосных станций, особенно в условиях непрерывной работы водозаборных систем [9]. Такой подход дает возможность минимизировать затраты электроэнергии и увеличить устойчивость системы, обеспечивая надежное водоснабжение даже в условиях непрерывного изменения экзогенных факторов.

Для детального анализа работы городского водоснабжения важно понять его структуру

и особенности функционирования. Необходимо также определить ключевые источники статистических данных, которые помогут исследовать специфику водопотребления и энергетические затраты системы. Исследуемая система водоснабжения г. Гомеля состоит из пяти основных водозаборов: «Сож», «Ипуть», «Кореневский», «Юго-Западный» и «Центральный». Эти водозаборы играют ключевую роль в обеспечении водными ресурсами как населения, так и промышленных объектов. Источники водоснабжения функционируют в единой гидравлической системе, поддерживая необходимое давление и объемы подачи воды в город. Уникальные характеристики каждого водозабора, такие как географическое расположение, уровень давления и производительность, создают особые режимы для работы насосных станций и распределительных сетей. На представленной на рис. 1 карте выделены местоположения пяти основных водозаборных сооружений Гомеля.

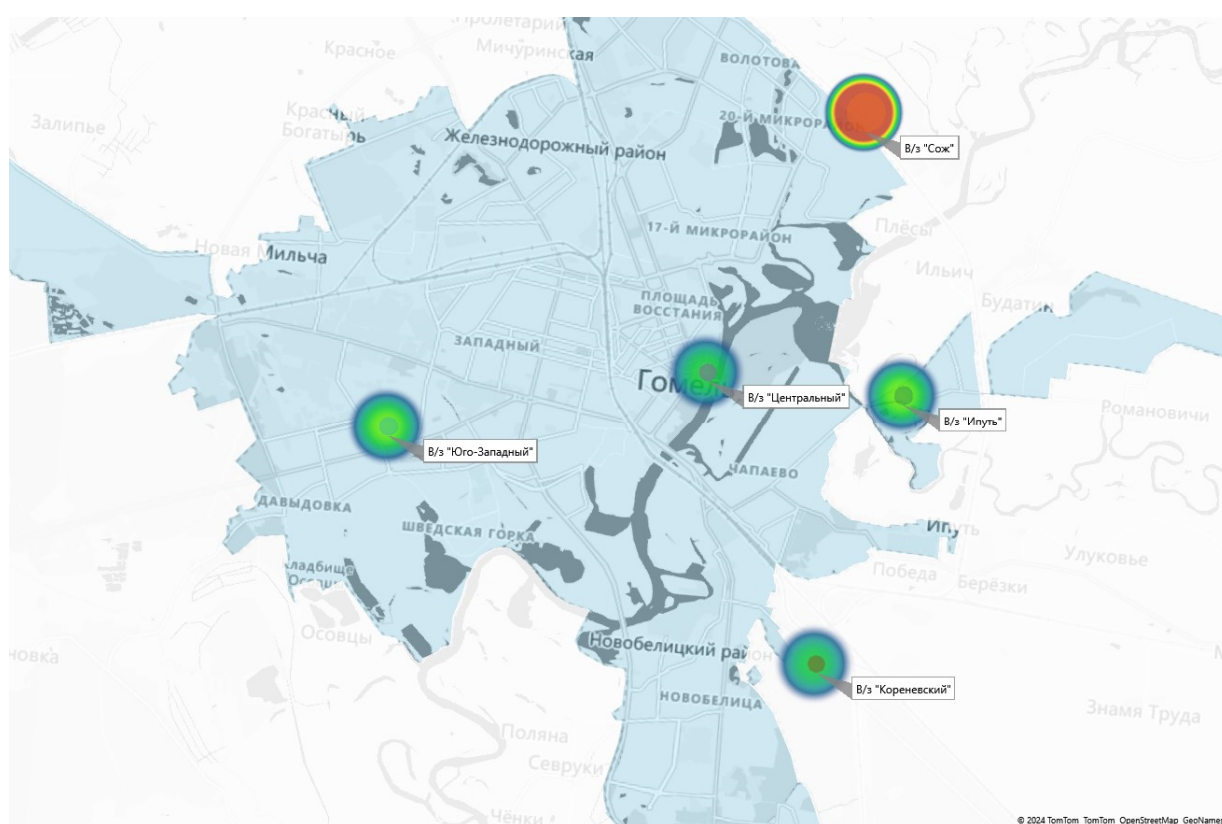


Рис. 1. Расположение водозаборов г. Гомеля с маркировкой производительности подачи воды

Fig. 1. Location of water intakes in Gomel with water supply capacity markings

Каждый водозабор имеет значимые различия в объемах подачи воды, что видно по степени интенсивности их отображения на карте. Водозабор «Сож» с проектной производительностью 88 тыс. м<sup>3</sup>/сут. значительно превосходит другие объекты, что подчеркивает его первостепенную роль в водоснабжении города. Следующий по размеру водозабор «Ипать» имеет производительность, в три раза меньшую в/з «Сож», – 24,8 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Водозаборы «Корневский», «Центральный» и «Юго-Западный» с проектными производительностями 22, 15,4 и 12,5 тыс. м<sup>3</sup>/сут. соответственно имеют значительно меньшую мощность добычи воды. Различия в объемах подачи воды у этих водозаборов накладывают свои особенности на режимы работы всей системы водоснабжения. На рис. 2 представлены изменения объемов подаваемой воды по суткам для каждого из рассмотренных водозаборов. Для построения временной диаграммы данные были сглажены методом скользящей средней, что позволило уменьшить влияние краткосрочных колебаний и лучше отразить основные тенденции в динамике водоснабжения при визуальном анализе. Однако визуальный анализ не дает четкой картины сезонных колебаний, что указывает на необходимость более детального исследования влияющих факторов с применением современных аналитических инструментов.

С учетом этих данных информационная база для исследования формировалась на основе

часовой статистики журналов насосных станций второго подъема по каждому из водозаборов и получасовых данных автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ). В зависимости от целей анализа данные были агрегированы и просуммированы, что позволило учесть как краткосрочные, так и долгосрочные колебания водопотребления. Эта информация была дополнена климатическими показателями, предоставленными Гомельским гидрометеорологическим центром [10], что позволило интегрировать основную технологическую статистику с климатическими факторами, такими как температура наружного воздуха и атмосферные осадки.

### Влияние климатических факторов на ресурсообеспечение

Из проведенного литературного обзора была выдвинута гипотеза, что климатические факторы оказывают значительное влияние на динамику водопотребления и соответственно на затраты электроэнергии в системе водоснабжения. Рост температуры, как показывают мировые исследования, способствует увеличению потребления воды для бытовых нужд, полива и орошения. Следовательно, можно ожидать, что с повышением температуры загрузка системы водоснабжения будет возрастать.

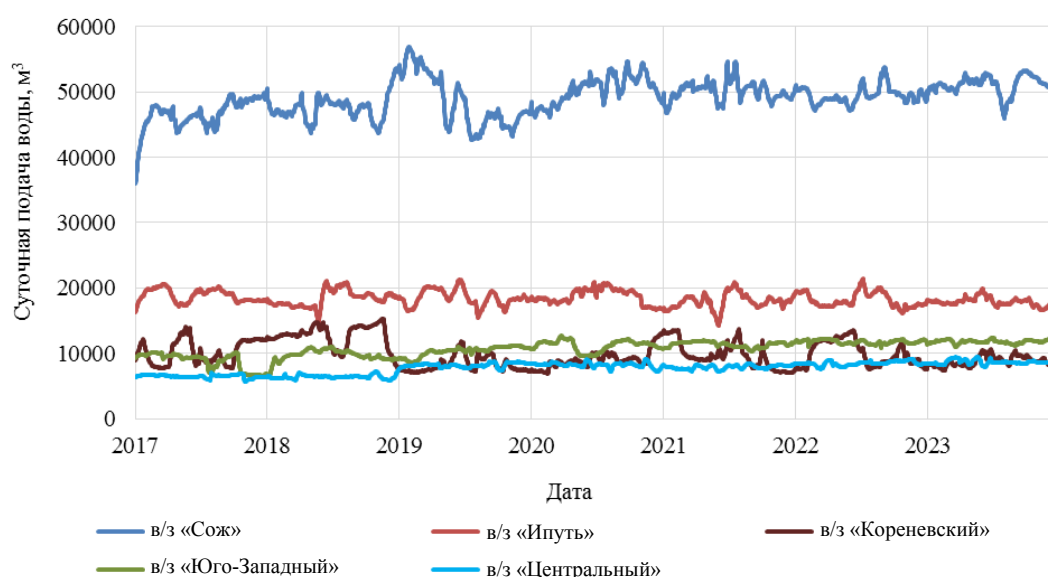


Рис. 2. Тенденции суточной подачи воды по водозаборам с 2017 по 2023 г.

Fig. 2 Trends in daily water supply at water intakes from 2017 to 2023

Это вызовет необходимость увеличения электроэнергетических затрат для поддержания нормальной работы насосных станций и системы водоочистки. Кроме того, предполагается, что атмосферные осадки окажут противоположное влияние на водопотребление, снижая его в периоды обильных дождей. Рост влажности в течение суток может уменьшить потребность в поливе и общее использование воды. Таким образом, анализ зависимости водопотребления от количества осадков поможет определить, насколько эти климатические факторы могут компенсировать рост энергозатрат в жаркие периоды, снижая нагрузку на систему водоснабжения.

Для проверки научной гипотезы предварительно проведен анализ влияния климатических факторов на водо- и электропотребление на основе суточной статистики, охватывавшей период с 2017 по 2023 г. На начальном этапе исследования применена корреляционная оценка для определения силы и направления взаимосвязей между ключевыми показателями.

В табл. 1 приведены результаты расчета коэффициента корреляции Пирсона.

Первичный анализ корреляции показал, что наибольшая взаимосвязь наблюдается между объемом подаваемой воды и потреблением электроэнергии (0,59), что подтверждает зависимость энергозатрат от нагрузки на систему водоснабжения. Влияние климатических факторов, таких как температура и осадки, оказалось слабовыраженным, о чем свидетельствуют низкие коэффициенты корреляции. Однако важно отметить, что направление корреляции как в случае с осадками (отрицательная корреляция), так и с температурой (положительная корреляция) соответствует выдвинутой гипотезе. Это указывает на наличие определенных тенденций, при которых увеличение температуры способствует росту водопотребления, а обильные осадки могут его снижать. На рис. 3 приведен график корреляции электропотребления и объемов, подаваемых в городскую сеть, от атмосферных осадков.

Таблица 1

Коэффициента корреляции Пирсона исследуемых статистических параметров

Pearson correlation coefficient of the studied statistical parameters

Статистические параметры	Электроэнергия, кВт·ч	Объем подаваемой воды, м <sup>3</sup>	Температура наружного воздуха, °С	Количество атмосферных осадков, мм
Электроэнергия, кВт·ч	1,00	0,59	-0,19	-0,12
Объем подаваемой воды, м <sup>3</sup>	0,59	1,00	0,15	-0,11
Температура наружного воздуха, °С	-0,19	0,15	1,00	0,04
Количество атмосферных осадков, мм	-0,12	-0,11	0,04	1,00

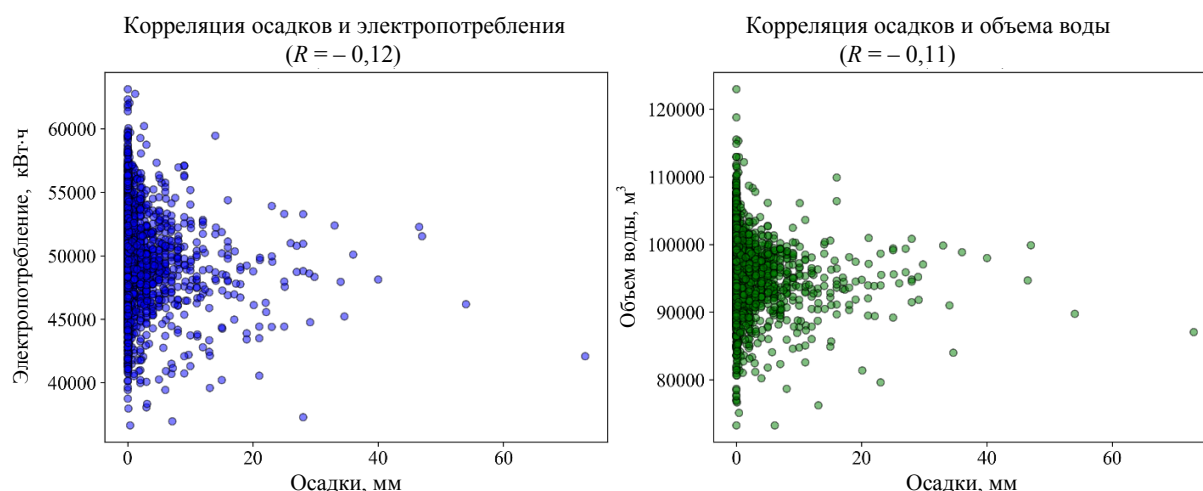


Рис. 3. Корреляция осадков электропотреблением и объемом подачи воды

Fig. 3. Correlation of precipitation with electricity consumption and water supply volume

Визуальный анализ графиков показывает, что значительных трендов между осадками и исследуемыми параметрами – электропотреблением и объемом подаваемой воды – не наблюдается. Данные разбросаны и не демонстрируют четкую зависимость, а их распределение больше напоминает нормальное с колоколообразной формой. Это подтверждается низкими значениями коэффициентов корреляции ( $-0,12$  и  $-0,11$ ), что указывает на слабое влияние осадков на исследуемые зависимые параметры. Следовательно, в рамках моделирования режимов работы насосных станций учет осадков может быть признан нецелесообразным, так как влияние этого показателя на работу системы незначительно и может не внести существенных улучшений в модели.

Учитывая высокую дисперсию данных и возможные нелинейные зависимости, целесообразно провести дальнейший анализ корреляционного поля для более точной оценки влияния этих факторов. Для этой цели построена многомерная структура данных, представленная на рис. 4, которая позволяет увидеть направление связей между температурой, подачей воды и энергопотреблением. На графике отчетливо виден положительный тренд между объемом подаваемой воды и энергозатратами,

что подтверждает результаты расчета коэффициента корреляции Пирсона. Важно отметить, что при повышении температуры появляется заметный «хвост» данных, который демонстрирует изменение характерных взаимосвязей. Это может указывать на наличие нелинейных эффектов при достижении определенных температурных значений, где рост температуры начинает существенно влиять на водопотребление и соответственно на затраты электроэнергии в системе.

На основе представленной многомерной структуры данных заметно, что при достижении определенных значений температуры связь между параметрами становится менее линейной, что требует дополнительного исследования. Для лучшего понимания на рис. 5 приводится анализ корреляции данных, разделенных по температурному порогу в  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 5a видно, что при температурах ниже  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  наблюдается практически нулевая корреляция между температурой воздуха и объемом подаваемой воды. Это подтверждает, что при более низких температурах водопотребление остается относительно стабильным. Рис. 5b свидетельствует о том, что при температурах выше  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  коэффициент корреляции Пирсона заметно усиливается ( $R = 0,46$ ).

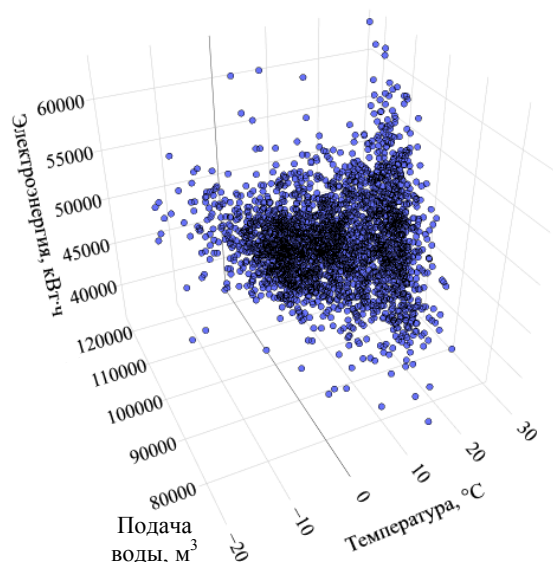
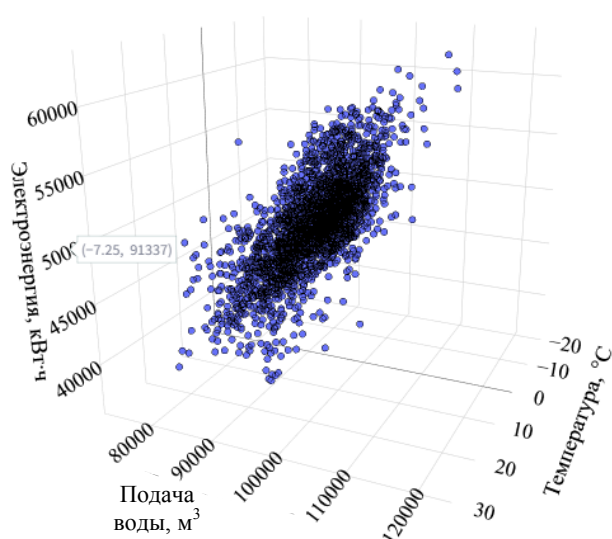


Рис. 4. Многомерное корреляционное поле между суточными данными подачи воды, энергопотребления и температурой наружного воздуха

Fig. 4. Multivariate correlation field between daily water supply data, energy consumption and outdoor temperature

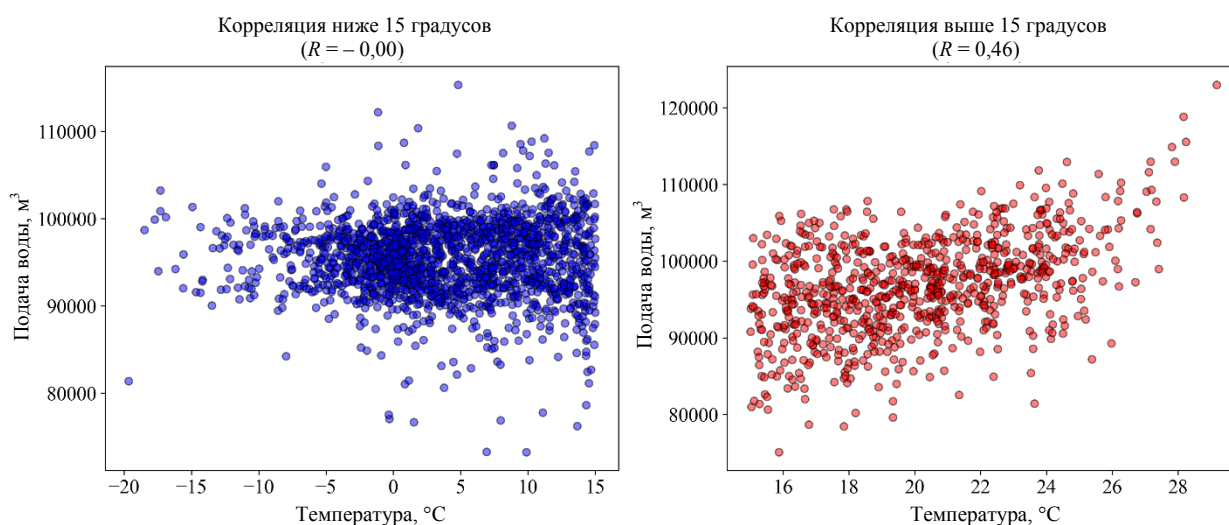


Рис. 5. Корреляция между подачей воды и температурой воздуха ниже и выше порога в 15 °С

Fig. 5. Correlation between water supply and air temperature below and above the 15 °C threshold

Дальнейшее исследование включало разделение данных на два диапазона – до и после порога, начиная с 10 °С, с поэтапным увеличением шага температуры разделения данных. Для каждого из этих диапазонов рассчитаны коэффициенты корреляции как для подачи воды, так и для электропотребления в зависимости от температуры. На рис. 6 пунктирные линии демонстрируют положительный тренд для исследуемых параметров, отражающий усиление корреляции по мере повышения температуры с каждым градусом. Этот тренд подчеркивает нарастающую взаимосвязь между температурой, подачей воды и электропотреблением, что важно учитывать при моделировании и планировании ресурсов в условиях климатических изменений.

Анализ результатов табл. 2 демонстрирует, что корреляция подачи воды при низких температурах остается практически нулевой, что указывает на малую значимость этого фактора в более холодные периоды года.

В то же время, для электроэнергии наблюдается изменение характера корреляции: при низких температурах она отрицательная. Это подтверждает наблюдения о повышении энергозатрат в зимний период в системе водоснабжения, связанных с ростом гидравлических потерь при пониженных температурах, а также с необходимостью увеличения затрат на обслуживание скважин (например, отопление насосных станций, освещение и другие общепроизводственные нужды водозаборов) [5].

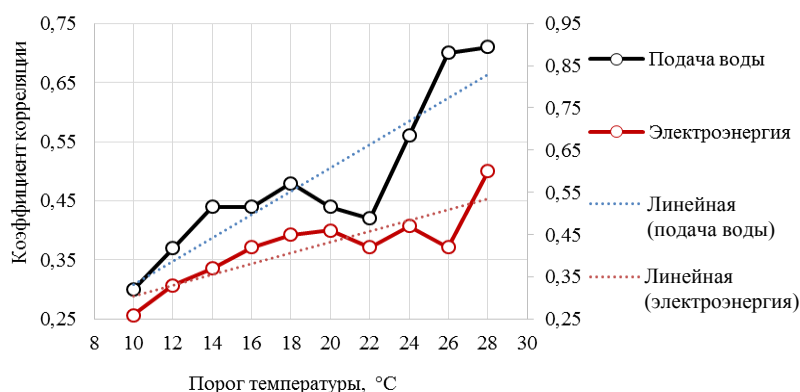


Рис. 6. Изменение коэффициента корреляции между подачей воды, энергопотреблением и температурой при различных пороговых значениях

Fig. 6. Change in the correlation coefficient between water supply, energy consumption and temperature at different threshold values



Результаты анализа изменения корреляции при разделении температурных данных  
Results of analysis of correlation changes when dividing temperature data

Порог температуры, °С	Электроэнергия		Подача воды		Количество данных ниже порога	Количество данных выше порога
	Корреляция ниже порога	Корреляция выше порога	Корреляция ниже порога	Корреляция выше порога		
10	-0,36	0,26	0	0,3	1372	1184
14	-0,38	0,37	0,02	0,44	1662	894
18	-0,39	0,45	-0,05	0,48	1984	572
22	-0,35	0,42	0	0,42	2321	235
26	-0,23	0,42	0,11	0,7	2531	25

Таким образом, отрицательная корреляция для энергопотребления при низких температурах указывает на рост специфических затрат, которые не связаны напрямую с водопотреблением, но требуют дополнительных ресурсов для поддержания работоспособности всей системы в холодное время года.

Для количественной оценки влияния температуры на изменения показателей исследуемой системы выполнен регрессионный анализ при разных температурных порогах отсечения статистики. В рамках данного анализа строились две модели линейной регрессии с температурой в качестве предиктора и с подачей воды и энергопотреблением в качестве зависимых переменных (регрессоров):

$$\widehat{W}_в = b_1 t_{нар} + b_0; \widehat{Q}_{пч} = b_1 t_{нар} + b_0,$$

где  $\widehat{W}_в$ ,  $\widehat{Q}_{пч}$  – предсказанные значения энергопотребления системы (кВт·ч) и объема подаваемой воды (м<sup>3</sup>) соответственно;  $b_1$  – коэффициент наклона, который характеризует влияние температуры на изменение как энергопотребления, так и подачи воды;  $t_{нар}$  – средне-суточная температура наружного воздуха, °С;  $b_0$  – свободный член (константа), который описывает энергопотребление и подачу воды при температуре  $t_{нар} = 0$ .

В табл. 3 приведена количественная оценка вклада температуры воздуха в электро- и водопотребление. Анализ регрессионных моделей показал, что при порогах выше 25 °С температура начинает оказывать значительное влия-

ние на систему водоснабжения. Вклад температуры в изменение энергопотребления составляет 15,6 %, а в изменение объема подаваемой воды – 15,8 %. Для исследуемой системы это означает, что с повышением температуры на каждый градус выше 25 °С энергопотребление увеличивается на 2597,1 кВт·ч, а объем подаваемой воды возрастает на 4951,5 м<sup>3</sup> в сутки.

Несмотря на значительный вклад температуры, сравнительно низкие значения коэффициента детерминации ( $R$ -квадрат), особенно для энергопотребления, указывают на наличие других (неучтенных) факторов, которые могут существенно влиять на работу системы водоснабжения и не рассматривались в рамках данного анализа. Это подчеркивает необходимость дальнейшего исследования дополнительных экзогенных факторов, таких как типы дней недели (рабочие, выходные, праздничные), сезоны года и другие социально-экономические показатели.

Эти параметры можно формализовать и включить в базу данных для последующего анализа, что позволит точнее оценивать влияние различных условий на водопотребление и энергозатраты системы водоснабжения. В дальнейшем при планировании водопотребления и оптимизации включения режимов работы насосных станций можно использовать сезонные модели, такие как рекуррентные нейронные сети, SARIMA, ARIMA, модели Хольта-Уинтерса и другие [11–14]. Эти модели позволяют более точно прогнозировать водопотребление с учетом выявленных взаимосвязей.

Оценка количественного вклада температуры воздуха в электро- и водопотребление  
Assessment of the quantitative contribution of air temperature to electricity and water consumption

Порог температуры, °С	Направление отсечения данных	Электроэнергия				Подача воды			
		Коэффициент наклона $b_1$	Константа $b_0$	R-квадрат	Процентный вклад температуры, %	Коэффициент наклона $b_1$	Константа $b_0$	R-квадрат	Процентный вклад температуры, %
0	Ниже порога	-332,6	50 140	0,2	<b>0,65</b>	-64,1	95 097	0,00	<b>0,07</b>
	Выше порога	3,1	49 438	0,0	<b>0,01</b>	132,9	94 348	0,00	<b>0,14</b>
10	Ниже порога	-199,9	50 751	0,133	<b>0,39</b>	2,1	95 414	0,00	<b>0,22</b>
	Выше порога	235,4	45 031	0,0	<b>0,52</b>	398,5	89 296	0,09	<b>0,44</b>
25	Ниже порога	-89,9	50 575	0,0599	<b>0,18</b>	54,8	95 223	0,01	<b>0,06</b>
	Выше порога	2597,1	-14 002	0,3	<b>15,6</b>	4951,5	-26 210	0,49	<b>15,80</b>

## ВЫВОДЫ

1. Результаты исследования показывают, что энергопотребление тесно связано с изменениями в водопотреблении, которое увеличивается по мере роста температуры наружного воздуха. При температуре свыше 25 °С положительная корреляция между температурой и водопотреблением достигала 15,8 %, что совпадало с аналогичным увеличением энергозатрат на 15,6 %. В условиях отрицательных температур значимой взаимосвязи между температурой и водопотреблением не наблюдалось, однако была зафиксирована отрицательная корреляция с энергопотреблением. Это объясняется дополнительными затратами на поддержание работы системы в холодное время года (обогрев насосных станций и увеличение гидравлических потерь).

2. Полученные результаты создают основу для разработки моделей водопотребления, которые будут служить ключевыми входными параметрами для оптимизации работы водозаборов и более точного планирования включения насосных станций в периоды, когда стоимость электроэнергии минимальна.

## ЛИТЕРАТУРА

- Twomey, K. M. Evaluating the Energy Intensity of the US Public Water System / K. M. Twomey, M. E. Webber // Energy Sustainability. 2011. Vol. 54686. P. 1735–1748. <https://doi.org/10.1115/ES2011-54165>.
- Zapata, O. More Water Please, It's Getting Hot! The Effect of Climate on Residential Water Demand / O. Zapata // Water Economics and Policy. 2015. Vol. 1. No 03. P. 1550007. <https://doi.org/10.1142/S2382624X15500071>.
- О питьевом водоснабжении: Закон Респ. Беларусь от 24 июня 1999 г. № 271-3; с изм. и доп. от 9 января 2019 г. № 166-3 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=H11900166>.
- Bezerra, B. G. Crop Evapotranspiration and Water Use Efficiency / B. G. Bezerra, T. S. Lee // Irrigation Systems and Practices in Challenging Environments. 2012. Vol. 9. P. 57–76. <https://doi.org/10.5772/29777>.
- Грунтович, Н. В. Исследование влияния факторов на формирование удельных и общих расходов электрической энергии в технологической системе водоснабжения / Н. В. Грунтович, А. А. Капанский, О. В. Федоров // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 3 (32). С. 54–59. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2016-3\(32\)-54-59](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2016-3(32)-54-59).
- Капанский, А. А. Ключевые направления и мировые практики повышения эффективности и надежности водоснабжения / А. А. Капанский // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2024. № 1(96). С. 82–98. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-82-98>.
- Романюк, В. Н. Интенсивное энергосбережение в промышленных теплотехнологиях / В. Н. Романюк, А. А. Бобич, Т. В. Бубырь // Энергия и Менеджмент. 2013. № 6. С. 8–12.
- 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.
- Седнин, В. А. Возможность использования энергетических комплексов промышленных предприятий для покрытия пиковых электрических нагрузок / В. А. Сед-

- нин, А. В. Седнин, М. Л. Богданович // Энергия и Менеджмент. 2009. № 1. С. 6–10.
10. Гомельский областной центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды: [сайт]. URL: <https://gomel.belgidromet.by/> (дата обращения: 28.06.2023).
  11. Семененко, М. Г. Модель Хольта–Уинтерса: математические аспекты и компьютерная реализация / М. Г. Семененко, Л. А. Унтилова // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. Сер. Экономика и управление. 2016. № 3. С. 64–67.
  12. Вильданова, И. И. Сравнительный анализ моделей Тейла–Вейджа и Хольта–Уинтерса в краткосрочном прогнозировании / И. И. Вильданова, А. М. Азнабаев // Математические методы и модели в исследовании актуальных проблем экономики России: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., Уфа, 30–31 мая 2016 г. / ред. Р. Р. Ахунов. Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Аэтерна», 2016. Ч. 2. С. 42–44.
  13. An Exploration of Dropout with LSTMs / G. Cheng, V. Peddinti, D. Povey [et al.] // Interspeech 2017, August 20–24, 2017, Stockholm, Sweden. С. 1586–1590. <https://doi.org/10.21437/interspeech.2017-129>.
  14. Li, X. Constructing Long Short-Term Memory Based Deep Recur-Rent Neural Networks For Large Vocabulary Speech Re/\*-cognition / X. Li, X. Wu // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2015. С. 4520–4524. <https://doi.org/10.1109/icassp.2015.7178826>
- Поступила 17.09.2024  
Подписана в печать 22.11.2024  
Опубликована онлайн 31.01.2025
- REFERENCES
1. Twomey K. M., Webber M. E. (2011) Evaluating the Energy Intensity of the US Public Water System. *Energy Sustainability*, 54686, 1735–1748. <https://doi.org/10.1115/ES2011-54165>.
  2. Zapata O. (2015) More Water Please, It's Getting Hot! The effect of climate on residential water demand. *Water Economics and Policy*, 1 (03), 1550007. <https://doi.org/10.1142/S2382624X15500071>.
  3. About Drinking Water Supply: Law of the Republic of Belarus Dated June 24, 1999. No. 271-3: with Changes and Additions From January 9, 2019. No. 166-3. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=H11900166> (in Russian).
  4. Bezerra B. G., Lee T. S. (2012) Crop Evapotranspiration and Water Use Efficiency. *Irrigation Systems and Practices in Challenging Environments*, 9, 57–76. <https://doi.org/10.5772/29777>.
  5. Gruntovich N. V. B., Kapanskiy A. A., Fedorov O. V. (2016) Study of the Influence of Factors on the Formation of Specific and Total Electrical Energy Consumption in the Technological Water Supply System. *Elektrotekhni-cheskiye Sistemy i Kompleksy = Electrical Systems and Complexes*, (3), 54–59. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2016-3\(32\)-54-59](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2016-3(32)-54-59) (in Russian).
  6. Kapanskiy A. A. (2024) Key Directions and Global Practices for Increasing the Efficiency and Reliability of Water Supply. *Vestnik Gomelskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. P. O. Sukhogo = Bulletin Sukhoi State Technical University of Gomel*, (1), 82–98. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-82-98> (in Russian).
  7. Romanyuk V. N., Bobich A. A., Bubyр T. V. (2013) Intensive Energy Saving in Industrial Heat Technologies. *Energiya i Menedzhment [Energy and Management]*, (6), 8–12 (in Russian).
  8. Kapanskiy A. A. (2019) Methods for Solving Problems of Assessing and Forecasting Energy Efficiency. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta = Kazan State Power Engineering University Bulletin*, 11 (2), 103–115 (in Russian).
  9. Sednin V. A., Sednin A. V., Bogdanovich M. L. (2009) Possibility of Using Energy Complexes of Industrial Enterprises to Cover Peak Electrical Loads. *Energiya i Menedzhment [Energy and Management]*, (1), 6–10 (in Russian).
  10. *Gomel Regional Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring*. Available at: <https://gomel.belgidromet.by/> (accessed 28 June 2023) (in Russian).
  11. Semenenko M. G., Untilova L. A. (2016) Holt-Winters Model: Mathematical Aspects and Computer Implementation. *Vektor Nauki Tolyattinskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Ser. Ekonomika i Upravlenie [Science Vector of Togliatti State University]*. Series: Economics and Management], (3), 64–67 (in Russian).
  12. Vildanova I. I., Aznabaev A. M. (2016) Comparative Analysis of the Theil-Wage and Holt-Winters Models in Short-Term Forecasting. *Matematicheskiye Metody i Modeli v Issledovanii Aktualnykh Problem Ekonomiki Rossii: sb. materialov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Ufa, 30–31 maya 2016 g. Ch 2. [Mathematical Methods and Models in the Study of Current Problems of the Russian Economy. Collection of Materials of the International Scientific and Practical Conference, Ufa, May 30–31, 2016. Part 2]*. Ufa, Aeterna, 42–44 (in Russian).
  13. Cheng G., Peddinti V., Povey D., Manohar V., Khudanpur S., Yan Y. (2017) An Exploration of Dropout with LSTMs. *Interspeech 2017*, August 20–24, 2017, Stockholm, Sweden, 1586–1590. <https://doi.org/10.21437/interspeech.2017-129>.
  14. Li X., Wu X. (2015) Constructing Long Short-Term Memory Based Deep Recurrent Neural Networks for Large Vocabulary Speech Recognition. 2015 *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 4520–4524. <https://doi.org/10.1109/icassp.2015.7178826>.

Received: 17.09.2024

Accepted: 22.11.2024

Published online: 31.01.2025