

УДК 621.311.22:628.17

DOI 10.62595/1819-5245-2026-2-78-86

АНАЛИЗ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СХЕМЫ И ВЫЯВЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ТЭЦ (НА ПРИМЕРЕ ГОМЕЛЬСКОЙ ТЭЦ-2)

**А. В. ОВСЯННИК¹, Е. Н. МАКЕЕВА¹, В. П. КЛЮЧИНСКИЙ²,
Н. А. ВАЛЬЧЕНКО¹, Т. Н. НИКУЛИНА¹**

¹*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

²*Республиканское унитарное предприятие
электроэнергетики «Гомельэнерго»,
Республика Беларусь*

Выполнен анализ систем оборотного водоснабжения (СОВ) тепловых электростанций. Рассмотрены типы охладителей, их достоинства и недостатки. На примере Гомельской ТЭЦ-2 проанализирована гидравлическая схема, технические характеристики градирен, циркуляционных насосов и конденсаторов. На основе эксплуатационных данных за январь–декабрь 2025 г. выявлены факторы, снижающие эффективность СОВ: неадаптивное управление насосами, сезонная неравномерность тепловой нагрузки, влияние климатических параметров. Сформулирована задача оптимизации режимов работы СОВ с целью снижения удельного расхода электроэнергии на собственные нужды.

Ключевые слова: система оборотного водоснабжения, ТЭЦ, градирня, циркуляционный насос, гидравлическое сопротивление, вакуум в конденсаторе, частотно-регулируемый привод, Гомельская ТЭЦ-2.

Для цитирования. Анализ гидравлической схемы и выявление факторов, определяющих эффективность системы оборотного водоснабжения ТЭЦ (на примере Гомельской ТЭЦ-2) / А. В. Овсянник, Е. Н. Макеева, В. П. Ключинский [и др.] // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2026. – № 3 (106). – С. 78–86. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2026-3-78-86>

ANALYSIS OF THE HYDRAULIC CIRCUIT AND IDENTIFICATION OF FACTORS DETERMINING THE EFFICIENCY OF THE CIRCULATING WATER SUPPLY SYSTEM AT A CHPP PLANT (GOMEL CHPP-2 CASE STUDY)

**A. V. OVSYANNIK¹, E. N. MAKEEVA¹, V. P. KLYUCHINSKY²,
N. A. VALCHENKO¹, T. N. NIKULINA¹**

¹*Sukhoi State Technical University of Gomel,
the Republic of Belarus*

²*Gomel Republican Unitary Electric Power Enterprise
“Gomelenergo”, the Republic of Belarus*

An analysis of the recirculating water supply systems of thermal power plants was conducted. Various types of cooling units, along with their advantages and disadvantages, were examined. The hydraulic layout and technical specifications of the cooling towers, circulating pumps, and condensers were analyzed using the Gomel CHPP-2 as a case study. Based on operational data from January to December 2025, factors

reducing the efficiency of the recirculating water supply system were identified: non-adaptive pump control, seasonal fluctuations in thermal load, and the impact of climatic conditions. A task was formulated to optimize the system's operating modes with the aim of reducing specific electricity consumption for auxiliary needs.

Keywords: recirculating water supply system, CHPP, cooling tower, circulation pump, hydraulic resistance, condenser vacuum, variable-frequency drive, Gomel CHPP-2.

For citation. Ovsyannik V., Makeeva E. N., Klyuchinsky V. P., Valchenko N. A., Nikulina T. N. Analysis of the hydraulic circuit and identification of factors determining the efficiency of the circulating water supply system at a CHPP plant (Gomel CHPP-2 case study). *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2026, no. 3 (106), pp. 78–86 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2026-3-78-86>

Введение

Эффективность работы тепловых электростанций (ТЭЦ) в значительной мере определяется надежностью и экономичностью системы оборотного водоснабжения (СОВ). Эта система обеспечивает отвод тепла от конденсаторов турбин и вспомогательного теплообменного оборудования, формируя вакуум в паровом пространстве конденсаторов и влияя на удельный расход топлива [1, 2]. Как показано в работах [3, 4], повышение температуры охлаждающей воды на 1 °С приводит к снижению вакуума на 0,5–1,0 %, что эквивалентно падению мощности турбины на 0,4–0,7 %. Поэтому анализ гидравлической схемы и выявление факторов, определяющих эффективность СОВ, является актуальной научно-практической задачей. В данной работе на основе технических отчетов [5–7] и эксплуатационных данных Гомельской ТЭЦ-2 за 2025 г. проведен системный анализ СОВ, предложены пути оптимизации.

Целью данного исследования является комплексный анализ системы оборотного водоснабжения на примере Гомельской ТЭЦ-2 для выявления ключевых зависимостей и «узких мест» в работе СОВ, формирования доказательной базы для последующего моделирования и разработки практических рекомендаций по оптимизации эксплуатационных режимов.

Основная часть

В мировой практике системы технического водоснабжения ТЭС подразделяются на прямоточные, оборотные и смешанные [1]. Прямоточные системы требуют больших водозаборов и накладывают жесткие экологические ограничения, поэтому для крупных ТЭЦ преимущественно используются оборотные системы с искусственными охладителями – прудами-охладителями, брызгальными бассейнами или градирнями [2]. Сравнительная оценка (см. таблицу) показывает, что градирни обладают минимальной удельной орошаемой площадью на единицу электрической мощности (0,025–0,2 м²/кВт), что делает их предпочтительными при дефиците свободных территорий.

Сравнительная оценка охладителей в оборотных системах ТЭС [4]

Характеристика	Пруд-охладитель	Брызгальный бассейн	Градирни
Удельный расход воды на единицу орошаемой площади, м ³ /(м ² · ч)	0,025–0,05	1–1,5	2–14
Удельный расход теплоты на единицу орошаемой площади, МДж/(м ² · ч)	0,8–1,6	30–50	65–450
Удельная орошаемая площадь на единицу электрической мощности, отпускаемой ТЭС, м ² /кВт	7–14	0,2–0,35	0,025–0,2

В энергетике наиболее распространены башенные испарительные градирни с естественной тягой. В Республике Беларусь преобладают именно они, что обусловлено относительной простотой и меньшими эксплуатационными затратами [6]. Однако такие градирни имеют недостатки: зависимость охлаждающей способности от метеоусловий, риск обледенения, снижение эффективности из-за зарастания оросителя [5, 9]. Кроме того, рост гидравлического сопротивления водоводов из-за коррозии и отложений ведет к перерасходу электроэнергии на насосах [8, 9].

Эффективность СОВ определяется двумя противоречивыми факторами: увеличение расхода циркуляционной воды улучшает вакуум, но требует больших затрат электроэнергии. Оптимальный режим соответствует минимуму суммы потерь от снижения вакуума и затрат на перекачку [9]. Внедрение частотно-регулируемых приводов (ЧРП) позволяет плавно изменять производительность насосов [7], но для корректного управления необходима математическая модель, учитывающая гидравлические характеристики сети, тепловые нагрузки и климат.

Произведем анализ СОВ Гомельской ТЭЦ-2, оснащенной тремя турбоагрегатами Т-180/210-130-1 с конденсаторами 180-КЦС-1. Система охлаждения – оборотная, с двумя башенными градирнями (проект «Атомэнергопроект»). В 2013 и 2023 гг. проведена реконструкция градирен с заменой оросителя на полипропиленовый сетчатый (тип NC-20, Hewitech) и установкой низконапорных сопел [5, 6]. В результате температура циркуляционной воды снижена на 3,5–4 °С. В 2023 г. на циркуляционном насосе ЦН-1 установлен частотно-регулируемый электропривод [7]. Принципиальная гидравлическая схема показана на рис. 1.

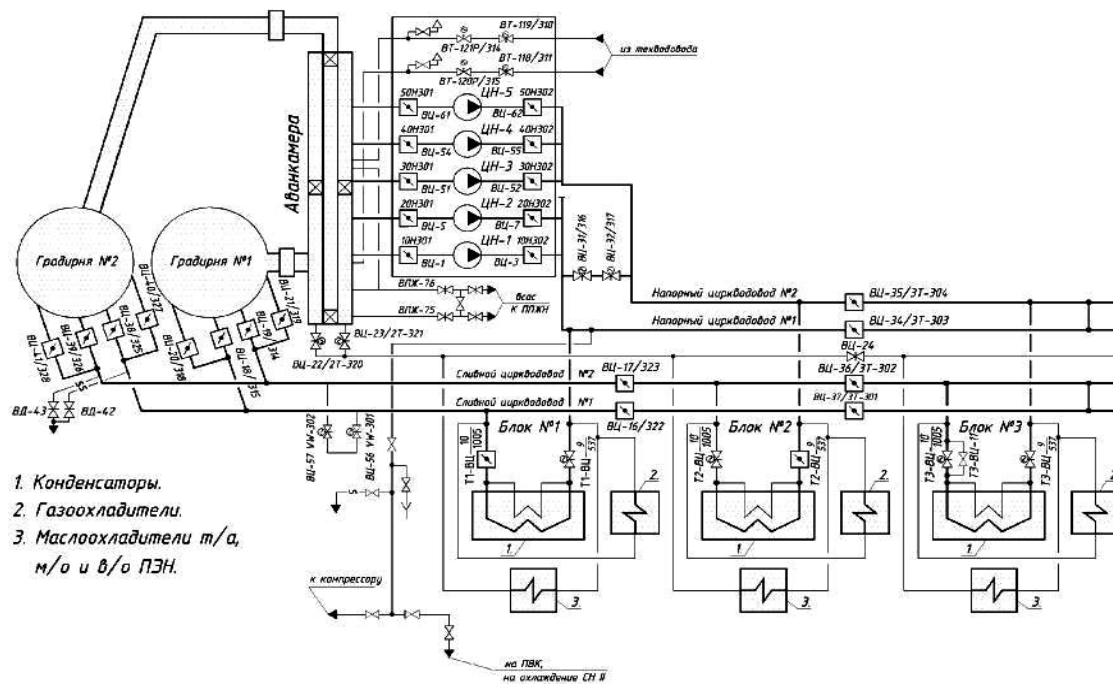
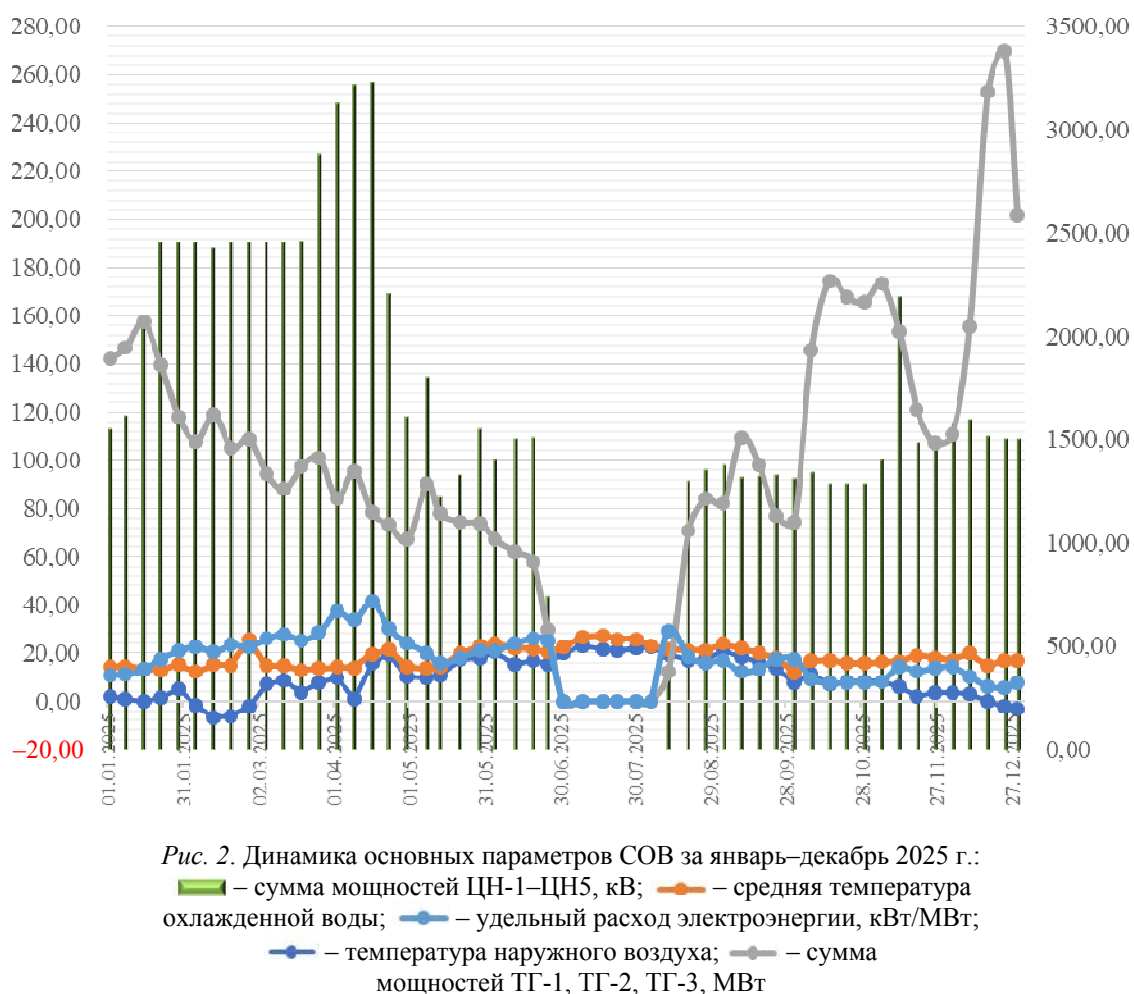


Рис. 1. Принципиальная схема СОВ Гомельской ТЭЦ-2

От объединенной насосной станции (ОНС) с пятью насосами Д-12500-24 вода подается по двум напорным водоводам Ду 2200 к конденсаторам ТГ-1, ТГ-2, ТГ-3, затем сливные водоводы направляют нагретую воду в градирни, а охлажденная вода самотеком возвращается в аванкамеру.

На основе статистических данных системы диспетчеризации и мониторинга СИМП ЛАЙТ по работе системы оборотного водоснабжения за январь–декабрь 2025 г. был произведен анализ системы оборотного водоснабжения, который позволил выявить закономерности работы СОВ и определить факторы, ограничивающие ее эффективность.

Анализ экспериментальных данных показывает выраженную сезонную неравномерность режимов работы. Для комплексной оценки взаимосвязи параметров представлена динамика основных показателей СОВ за январь–декабрь 2025 г. (рис. 2).



В зимний период при максимальной нагрузке турбин (до 140–158 МВт) система работает наиболее эффективно: низкая температура наружного воздуха обеспечивает благоприятные условия охлаждения, что позволяет поддерживать минимальные значения удельных энергозатрат. В весенний переходный период линия нагрузки идет вниз, а мощность насосов остается высокой (апрельский максимум – 3225 кВт), что вызывает резкий всплеск удельного расхода до 40–45 кВт/МВт. В летний период снижение мощности турбин сопровождается сохранением значительных затрат на циркуляцию воды, что обусловлено ухудшением условий теплообмена при повышенной температуре наружного воздуха. Несмотря на уменьшение тепловой нагрузки, мощность циркуляционных насосов снижается непропорционально, вследствие чего система продолжает работать с повышенными собственными энергозатратами. В осенне-зимний период рост мощности турбин сопровождается снижени-

ем мощности циркуляционных насосов и улучшением условий охлаждения. В результате в декабре удельный расход электроэнергии снижается до минимальных значений (5,6–6,0 кВт/МВт) при мощности турбогенераторов 250–270 МВт.

Таким образом, анализ годового режима работы показывает, что энергетическая эффективность системы оборотного водоснабжения определяется согласованностью производительности циркуляционных насосов с фактической нагрузкой турбогенераторов и условиями охлаждения. Наибольшее снижение эффективности наблюдается в переходные периоды, когда мощность насосного оборудования остается высокой при уменьшении тепловой нагрузки энергоблоков, что приводит к росту удельного расхода электроэнергии.

Повышение эффективности СОВ требует внедрения алгоритмов адаптивного управления циркуляционными насосами, учитывающих фактическую тепловую нагрузку, температуру наружного воздуха и требуемый вакуум в конденсаторах. Выделение характерных режимов эксплуатации (зимний, весенний переходный, летний, остановочный, осенний переходный) создает основу для разработки математической модели и последующей оптимизации гидравлических режимов СОВ.

Среднемесячный теплоотвод градирен Гомельской ТЭЦ-2 (рис. 3) за исследуемый период демонстрирует сезонную неравномерность: зимой (январь) он достигает 152,7 МВт при высокой мощности турбогенераторов (141,6 МВт), весной снижается до 60–62 МВт вследствие уменьшения тепловой нагрузки, а летом (июнь-июль) вновь возрастает до 106,9–120,3 МВт, несмотря на падение активной мощности. Это обусловлено ухудшением тепло- и массообмена при высоких температуре (18–22 °С) и влажности (80–88 %) воздуха. В осенний период по мере снижения температуры наружного воздуха теплоотвод градирен уменьшается до 50–71 МВт при одновременном увеличении мощности турбогенераторов до 138–153 МВт, что свидетельствует о повышении эффективности охлаждения.

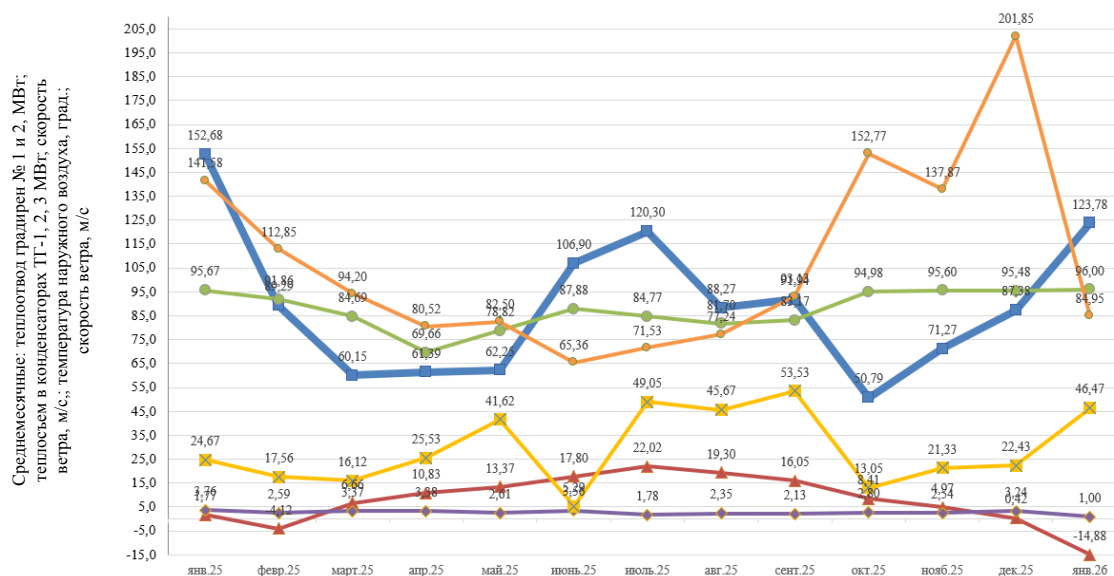


Рис. 3. График распределения за 12 месяцев 2025 г.:

- среднемесячный теплоотвод градирен № 1, 2, МВт; — среднемесячная относительная влажность, %; — среднемесячный теплоотвод в конденсаторах ТГ-1, ТГ-2, ТГ-3, МВт; — среднемесячная температура, град.;
- среднемесячная скорость ветра, м/с; — среднемесячная активная мощность ТГ-1, 2, 3 (сгл), МВт

Превышение теплоотвода градирен над теплосъемом в конденсаторах, особенно заметное зимой и летом, указывает на наличие дополнительных тепловых потерь и особенности распределения тепловых потоков в системе обратного водоснабжения. В летний период при снижении электрической нагрузки теплоотвод остается высоким, отражая возрастание роли климатических факторов в обеспечении требуемого режима охлаждения. Полученные закономерности подтверждают необходимость адаптивного управления системой обратного водоснабжения с учетом тепловой нагрузки энергоблоков и метеорологических условий, что создает основу для последующего математического моделирования и оптимизации режимов работы СОВ.

Существенным результатом анализа является выявление несоответствия между тепловой нагрузкой конденсаторов и фактическим теплоотводом системы. Это расхождение указывает на наличие дополнительных тепловых потоков от вспомогательного оборудования (маслоохладители, охлаждение генераторов и др.). На рис. 4 (на примере марта 2025 г.) видно, что тепловая нагрузка градирен устойчиво превышает нагрузку конденсаторов, причем кривая теплоотвода имеет более крутой характер. Это подтверждает значительный вклад вспомогательных систем, тепловыделение которых растет с мощностью энергоблока. Следовательно, активная мощность энергоблока выступает ключевым, но не единственным фактором, определяющим режим работы системы обратного водоснабжения.

В целом анализ графической зависимости позволяет сделать вывод о необходимости учета всех источников тепловыделения и применения комплексного подхода при моделировании и оптимизации работы системы.

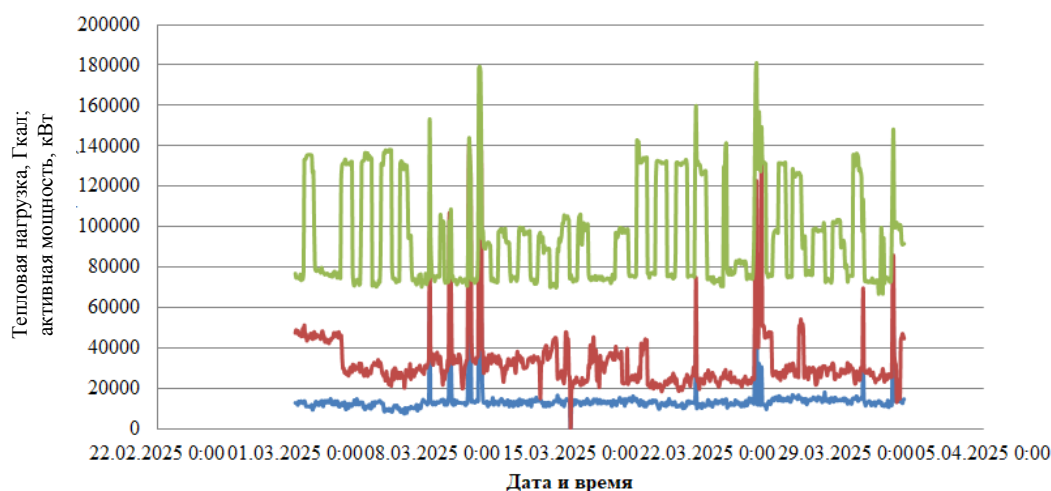


Рис. 4. Изменение суммарной тепловой нагрузки конденсаторов, градирен и активной мощности энергоблока за март 2025 г.:

— тепловая нагрузка конденсаторов энергоблока; — тепловая нагрузка градирен; — активная мощность энергоблока

Детальный анализ влияния параметров на вакуум в конденсаторе (рис. 5) показал выраженную обратную зависимость от температуры охлаждающей воды, а также комплексное воздействие активной мощности энергоблока. Рост мощности не только увеличивает массовый поток пара в конденсатор, но и, главное, повышает температуру воды на выходе, ухудшая температурный напор и снижая эффективность теплообмена. Таким образом, конечное давление в конденсаторе определяется взаимозависимыми переменными, где мощность выступает и самостоятельным фактором, и модификатором температурного режима.

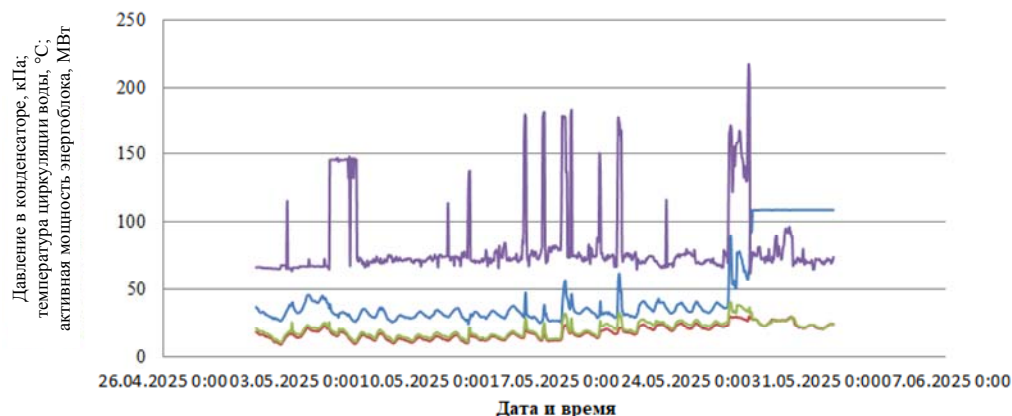


Рис. 5. Изменение давления в конденсаторе, температуры циркуляционной воды и активной мощности энергоблока за май 2025 г.:

— давление в конденсаторе; — температура циркуляции воды на входе в конденсатор; — температура циркуляции воды на выходе из конденсатора; — активная мощность энергоблока

Анализ метеорологических факторов (рис. 6) подтвердил, что доминирующим внешним параметром, определяющим температуру охлажденной воды, является температура наружного воздуха (сильная прямая линейная зависимость). Влажность воздуха выступает ключевым корректирующим фактором: при высокой влажности потенциал охлаждения градирни резко снижается. Влияние скорости ветра оказалось неоднозначным и в пределах погрешности измерений не выделяется как значимое.

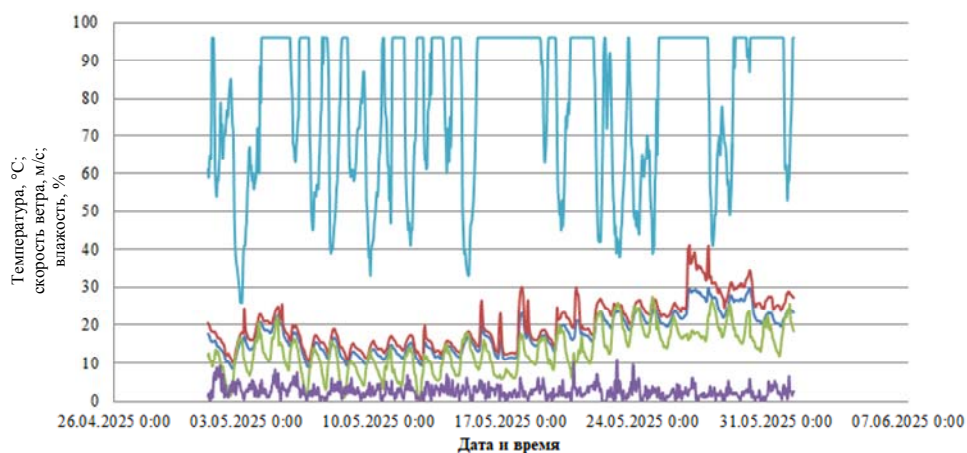


Рис. 6. Зависимость температуры охлажденной воды от температуры наружного воздуха (по данным за май 2025 г.):

— температура циркуляции воды на выходе из градирни;
— температура циркуляции воды на входе в градирню;
— температура наружного воздуха; — скорость ветра;
— влажность

Как показали испытания [5, 6], реконструкция градирен позволила снизить температуру охлажденной воды на 3,5–4 °C, что дало прирост мощности турбин. Однако потенциал экономии электроэнергии на приводе насосов остается нереализованным. Выделено пять характерных режимов работы СОВ: зимний максимальной нагрузки, весенний переходный (наиболее проблемный), летний с неустойчивой нагрузкой, летний остановочный и осенний переходный. Для каждого целесообразно рассчитать оптимальную производительность насосов.

Заключение

В результате работы выполнен комплексный анализ системы оборотного водоснабжения на примере Гомельской ТЭЦ-2. Система оборотного водоснабжения – это сложный динамический объект, эффективность которого определяется совместным действием технологических, режимных и климатических параметров. Установлено, что формирование точных математических моделей на основе только эксплуатационных данных затруднено из-за больших погрешностей измерений (особенно при малых температурных перепадах). Для достоверной идентификации вклада вспомогательных систем и верификации моделей необходимы специальные активные экспериментальные исследования в контролируемых условиях. Полученные результаты создают основу для последующей оптимизации режимов работы СОВ.

Литература

1. Волков, А. В. Проблемы эксплуатации башенных градирен в системах оборотного водоснабжения ТЭЦ и пути их решения / А. В. Волков, А. В. Наумов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. – 2010. – Т. 2. – С. 482–483.
2. Наумов, А. В. Разработка методов совершенствования систем оборотного водоснабжения с башенными градирнями электростанций для увеличения выработки электроэнергии : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Наумов Андрей Вадимович. – М., 2015. – 22 с.
3. Пономаренко, В. С. Градирни промышленных и энергетических предприятий / В. С. Пономаренко, Ю. И. Арёфьев. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 376 с.
4. Власова, Е. Р. Системы охлаждения и технического водоснабжения на ТЭЦ / Е. Р. Власова, Н. В. Комарова, Е. О. Реховская // Молодой ученый. – 2016. – № 24. – С. 135–136.
5. Гарантийные испытания градирни № 1 и определение ограничений электрической мощности Гомельской ТЭЦ-2 после реконструкции градирни № 1 : техн. отчет № 13.09.92-01 / ЧАО «ТЕХЭНЕРГО». – Львов, 2013–2018. – 55 с.
6. Гарантийные испытания башенной градирни № 2 Гомельской ТЭЦ-2 после реконструкции ее водораспределительной системы : техн. отчет / ОАО «Белэнергоремналадка». – Минск, 2023. – 41 с.
7. Установка регулируемых электроприводов на циркуляционных насосах водооборотного водоснабжения Гомельской ТЭЦ-2 : предпроект. документация / РУП «БЕЛНИПИЭНЕРГОПРОМ». – Минск, 2020. – 92 с.
8. Калатузов, В. А. Влияние систем технического водоснабжения с градирнями на технико-экономические показатели тепловых электростанций / В. А. Калатузов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2009. – № 6. – С. 12–18.
9. Ведьгаева, И. А. Математическое моделирование, исследование и повышение эффективности работы промышленных градирен с сетчатой насадкой : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.04 / Ведьгаева Ирина Александровна ; Казан. гос. энергет. ун-т. – Казань, 2003. – 20 с.

References

1. Volkov A. V., Naumov A. V. Problems of operation of cooling towers in the circulating water supply systems of thermal power plants and the ways of their solution. *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika = Radioelectronics, electrical engineering and power engineering*, 2010, vol. 2, pp. 482–483 (in Russian).
2. Naumov A. V. *Development of methods for improving circulating water supply systems with cooling towers of power plants to increase electricity generation*. Moscow, 2015. 22 p. (in Russian).
3. Ponomarenko V. S. *Cooling towers of industrial and energy enterprises*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1998, 376 p. (in Russian).

4. Vlasova E. R., Komarova N. V., Rekhovskaya E. O. Cooling and technical water supply systems at CHPPs. *Molodoi uchenyi = Young Scientist*, 2016, no. 24, pp. 135–136 (in Russian).
5. Technical report № 13.09.92-01. *Warranty tests of cooling tower no. 1 and determination of electric power limits of Gomel CHPP-2 after reconstruction of cooling tower no. 1*. L'vov, TEKhENERGO, 2013–2018. 55 p. (in Russian).
6. Technical report. *Warranty tests of cooling tower no. 2 at Gomel CHPP-2 after reconstruction of its water distribution system*. Minsk, Belenergoremnaladka, 2023. 41 p. (in Russian).
7. *Installation of adjustable electric drives on circulation pumps of the Gomel CHPP-2 water recirculation system* [pre-design documentation]. Minsk, RUP “BELNIPIENERGOPROM”, 2020. 92 p. (in Russian).
8. Kalatuzov V. A. Influence of technical water supply systems with cooling towers on the technical and economic performance of thermal power plants. *Energoberezhenie i vodopodgotovka = Energy Saving and water treatment*, 2009, no. 6, pp. 12–18 (in Russian).
9. Ved'gaeva I. A. Mathematical modeling, research and improvement of the efficiency of industrial cooling towers with mesh packing. Kiev, 2003. 20 p. (in Russian).

Поступила 13.07.2026 г.