



## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВОДООХЛАЖДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА БАШЕННОГО ТИПА В ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД ГОДА ДЛЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

Бальзамов<sup>1</sup> Д.С., Бронская<sup>1,2</sup> В.В.

<sup>1</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

<sup>2</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет,  
г. Казань, Россия

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ. Актуальность исследования обусловлена возрастающими требованиями к энергоэффективности промышленных предприятий в условиях изменения климата. Башенные градирни являются ключевыми элементами систем оборотного водоснабжения на предприятиях нефтехимической и энергетической отраслей Республики Татарстан. ЦЕЛЬ. Проанализировать современные подходы к повышению эффективности башенных градирен в теплый период года с учетом климатических условий Татарстана, а также исследовать возможность применения системы испарительного охлаждения воздуха перед воздухозаборными окнами башенной градирней тепловой электрической станции. МЕТОДЫ. Для достижения поставленной цели использовался анализ литературных источников и технической документации действующего объекта, термодинамические расчеты теплообменных процессов испарительного охлаждения циркуляционной воды и влияние ее температуры на работу паротурбинной установки. РЕЗУЛЬТАТЫ. Внедрение системы предварительного охлаждения наружного воздуха представляет собой технологически обоснованное решение для оптимизации работы градирен в условиях повышенных температурных нагрузок. Данная система обеспечивает термодинамическую стабилизацию процесса теплообмена через снижение температуры поступающего воздушного потока. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Реализация данного инженерного решения обеспечивает устойчивую работу системы охлаждения в широком диапазоне метеорологических условий с сохранением технологических параметров в течение всего года. Внедрение технологии предварительного адиабатического охлаждения воздушного потока способствует значительному повышению энергетической эффективности энергоблока, а именно: прирост мощности турбоустановки: 492 кВт; годовая выработка дополнительной энергии: 1,7 ГВт·ч; экономический эффект: 14,67 млн руб./год; срок окупаемости менее 2 лет.

**Ключевые слова:** градирня, испарение, влажность воздуха, энергоэффективность, оборотная вода, водоснабжение, охлаждение.

**Для цитирования:** Бальзамов Д.С., Бронская В.В. Повышение эффективности работы водоохлаждающего устройства башенного типа в теплый период года для климатических условий Республики Татарстан // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 2. С. 215-226. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-2-215-226.

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF A TOWER-TYPE WATER COOLING DEVICE DURING THE WARM SEASON FOR THE CLIMATIC CONDITIONS OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN

Balzamov<sup>1</sup> D. S., Bronskaya<sup>1,2</sup> V. V.

<sup>1</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>2</sup>Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

**Abstract:** RELEVANCE. The relevance of the study is due to the increasing demands for energy efficiency of industrial enterprises in the context of climate change. Cooling towers are key elements of water recycling systems at enterprises in the petrochemical and energy industries of the Republic of Tatarstan. TARGET. To analyze modern approaches to increasing the efficiency of cooling towers in the warm season, taking into account the climatic conditions of Tatarstan, and also to study the possibility of using an evaporative air cooling system in front of the air intake windows of a cooling tower of a thermal power plant. METHODS. To achieve the set goal, an

analysis of literary sources and technical documentation of the operating facility, thermodynamic calculations of heat and mass transfer processes of evaporative cooling of circulating water and the influence of its temperature on the operation of the steam turbine unit were used. **RESULTS.** The implementation of the outdoor air pre-cooling system is a technologically sound solution for optimizing the operation of cooling towers under conditions of increased temperature loads. This system ensures thermodynamic stabilization of the heat exchange process by reducing the temperature of the incoming air flow. **CONCLUSION.** The implementation of this engineering solution ensures the stable operation of the cooling system in a wide range of meteorological conditions while maintaining technological parameters throughout the year. The introduction of pre-adiabatic air flow cooling technology contributes to a significant increase in the energy efficiency of the power unit, namely: turbine power increase: 492 kW; annual additional energy production: 1.7 GWh; economic effect: 14.67 million rubles / year; payback period of less than 2 years.

**Key words:** cooling tower; evaporation; air humidity; energy efficiency; recycled water; water supply; cooling.

**For citation:** Balzamor D. S., Bronskaya V.V. Improving the efficiency of a tower-type water cooling device during the warm season for the climatic conditions of the Republic of Tatarstan. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (2): 215-226. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-2-215-226.

#### **Введение (Introduction)**

Башенные градирни представляют собой высокие сооружения, использующие естественную тягу воздуха для охлаждения воды. Их работа основана на принципе испарительного охлаждения: горячая вода распыляется и стекает по оросителю, а встречный поток воздуха отводит тепло. Ключевые преимущества:

- Энергетическая экономичность (не требуют вентиляторов)
- Высокая производительность для крупных предприятий
- Долговечность железобетонных конструкций

В системе оборотного водоснабжения градирни обеспечивают понижение температуры воды с 40-50°C до 25-30°C, что необходимо для эффективного охлаждения технологического оборудования.

Использование градирен и систем охлаждения играет ключевую роль в снижении экологического воздействия крупных электростанций. Если бы такие системы не существовали, то потребление и возврат воды в реку или озеро происходили бы в гораздо большем объеме, что могло бы иметь значительные негативные последствия для экосистемы. Основные проблемы, связанные с возвратом теплой воды, включают:

1. Повышение температуры водоемов
2. Снижение уровня кислорода
3. Нарушение экосистемы
4. Развитие водорослей
5. Снижение качества воды

Таким образом, градирни и системы охлаждения помогают минимизировать эти негативные эффекты, обеспечивая более устойчивое и экологически безопасное использование водных ресурсов.

Республика Татарстан характеризуется умеренно-континентальным климатом с четко выраженными сезонами. Согласно данным [1], ключевые климатические параметры представлены в таблице 1.

Таблица 1  
Table 1

Климатические характеристики Республики Татарстан  
*Climatic characteristics of the Republic of Tatarstan*

Параметр	Значение	Влияние на работу градирни
Средняя температура июля	+24,8°C	Снижение эффективности теплоотдачи
Количество солнечных дней в году	272	Увеличение испарения воды
Среднегодовое количество осадков	554 мм	Влияние на влажность воздуха
Преобладающие ветра	Западные и юго-западные	Влияние на естественную тягу

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

За последние 10 лет отмечается тенденция к потеплению и повышению влажности, что делает климат Татарстана близким к прибалтийскому типу зимой и средиземноморскому – летом [1]. Эти изменения особенно значимы для работы градирен в теплый период (апрель – сентябрь), когда температура воздуха достигает максимума, а относительная влажность повышается, снижая эффективность испарительного охлаждения.

Факторы, влияющие на эффективность градирен в теплый период условно можно поделить на две группы [2].

Метеорологические факторы:

- температура и влажность воздуха. Высокие значения этих параметров снижают движущую силу процесса испарения – разность между давлением насыщенного пара у поверхности воды и парциальным давлением пара в воздухе.

- скорость и направление ветра. Естественная тяга в башенных градирнях зависит от разности плотностей холодного и нагретого воздуха, но может усиливаться или ослабляться внешними ветровыми потоками.

- атмосферные осадки. Влияют на влажность воздуха и могут временно снижать температуру окружающей среды.

Технологические и конструктивные факторы:

- состояние оросительного устройства. Засорение или повреждение оросителя снижает площадь контакта воды с воздухом.

- распределение воды. Неравномерное распределение горячей воды по поверхности оросителя снижает эффективность теплообмена.

- гидродинамические режимы. Скорость стекания воды и противотока воздуха должны быть оптимальными для данного типа градирни.

Эффективность работы градирни напрямую влияет на [3,4]:

- производительность технологического оборудования. Если вода недостаточно охлаждена, оборудование может работать менее эффективно или перегреваться;

- себестоимость вырабатываемой энергии. Более эффективное охлаждение снижает потребность в дополнительных ресурсах, что может снизить общие затраты на производство энергии;

- удельный расход топлива. При лучшем охлаждении оборудование может работать более эффективно, что может снизить потребность в топливе для генерации той же энергии;

- удельный расход воды. Эффективная градирня помогает минимизировать потери воды, так как она позволяет использовать воду в замкнутом цикле охлаждения;

В энергетике наибольшее распространение получили градирни башенного типа, реже вентиляторные, от эффективности работы которых зависит производительность тепломеханического оборудования и станций в целом [5,6].

Невозможность обеспечить в летний период необходимую степень охлаждения оборотной воды является актуальной проблемой для всех градирен, так как повышение температуры оборотной воды ведет к снижению выработки электрической энергии на станциях.

#### *Литературный обзор (Literature Review)*

В настоящее время можно встретить научно-инженерные работы по внедрению эжекционных градирен в водооборотные циклы различных предприятий в качестве альтернативы вентиляторным градирням, а также перевод работы башенных градирен в эжекционный режим, что подтверждает проведенный патентный поиск [7,8].

Современные подходы к повышению эффективности градирен приведены на рисунке 1.

В таблице 2 представлены результаты сравнительного анализа методов повышения эффективности градирен.

Современные исследования в области повышения эффективности градирен ведутся в следующих направлениях [9,10]:

- численное моделирование процессов тепло- и массообмена в градирнях с учетом реальных климатических данных;

- использование возобновляемых источников энергии (солнечные панели) для привода вспомогательного оборудования;

- вторичное использование тепла, отводимого градирнями, для систем отопления или технологических нужд;

- применение новых материалов с высокой теплопроводностью и коррозионной стойкостью.

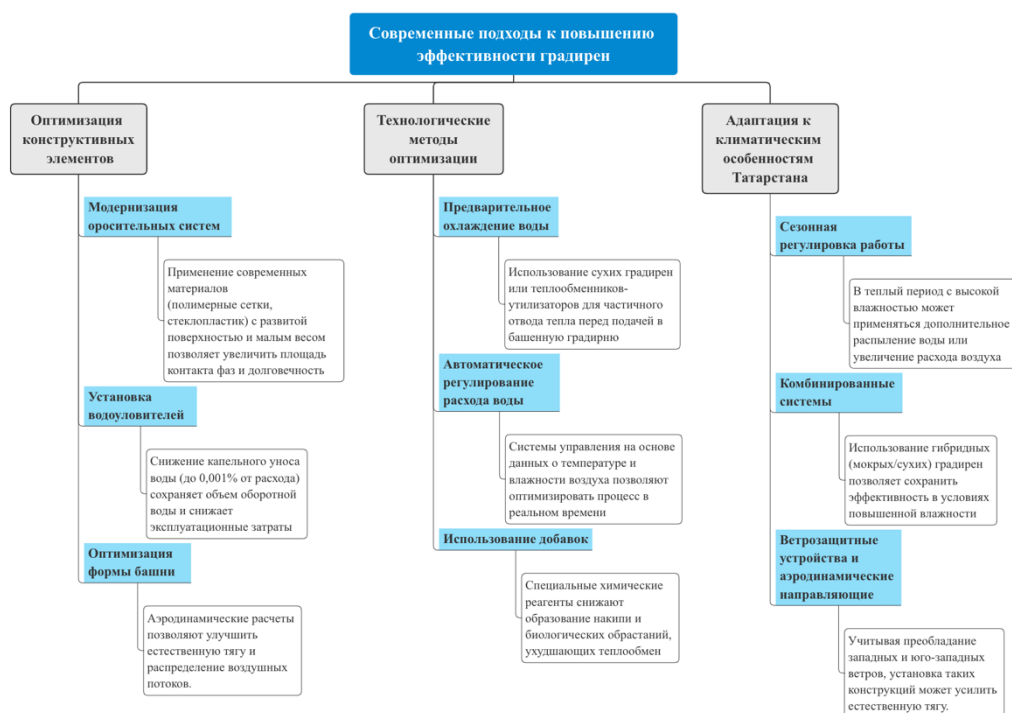


Рис.1. Современные подходы к повышению эффективности градирен для Татарстана  
 \*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 2  
 Table 2

Сравнительный анализ методов повышения эффективности градирен  
 Comparative analysis of cooling tower efficiency improvement methods

Метод	Преимущества	Недостатки	Применимость в Татарстане
Модернизация оросителя	Значительное увеличение площади контакта	Затраты на реконструкцию	Высокая
Установка водоуловителей	Снижение потерь воды	Сопротивление воздушному потоку	Средняя
Автоматическое регулирование	Оптимизация в реальном времени	Высокая стоимость системы	Высокая
Комбинированные системы	Стабильность работы при высокой влажности	Высокие капитальные затраты	Средняя

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Эффективность работы башенных градирен в теплый период года в Республике Татарстан определяется сложным взаимодействием климатических, конструктивных и технологических факторов. На фоне наблюдаемого изменения климата с тенденцией к потеплению и повышению влажности, традиционные методы эксплуатации требуют пересмотра.

Наиболее перспективными направлениями повышения эффективности являются:

- модернизация оросительных систем и применение материалов с улучшенными свойствами.
- внедрение систем автоматического регулирования, адаптированных к климатическим особенностям региона.
- использование комбинированных схем (гибридные градирни) для стабилизации работы в условиях повышенной влажности.
- аэродинамическая оптимизация башенных конструкций с учетом розы ветров Татарстана.

В настоящее время в научно-технической литературе и патентных источниках отмечается тенденция к внедрению эжекционных градирен в системы оборотного водоснабжения промышленных предприятий. Данное решение рассматривается в качестве альтернативы традиционным вентиляторным градирням [11-13]. Кроме того, актуальным

направлением является модернизация существующих башенных градирен с переводом их в эжекционный режим работы, что позволяет повысить энергоэффективность и снизить эксплуатационные затраты. Указанные тенденции подтверждаются результатами проведенного патентного поиска, демонстрирующими растущий интерес к эжекционным технологиям в области охлаждения воды.

#### **Материалы и методы (Materials and methods)**

В данной работе исследуется возможность применения системы испарительного охлаждения воздуха перед воздухозаборными окнами башенной градирней тепловой электрической централи (ТЭЦ), функционирующей в климатических условиях Республики Татарстан [14]. Предполагается, что внедрение технического решения позволит повысить охлаждающую способность градирни и обеспечить требуемое значение глубины вакуума в конденсаторах паровых турбин станции.

На рассматриваемой ТЭЦ обратная система технического водоснабжения обеспечивается работой 6 градирен башенного типа с площадью орошения каждой 2600 м<sup>2</sup> [15]. С целью определения технической возможности применения технологии системы испарительного охлаждения воздуха для ТЭЦ, расположенной в климатической зоне Республики Татарстан были проанализированы фактические температуры наружного воздуха в период с апреля по сентябрь 2024 года. На рис. 2 и 3 представлены графические зависимости распределения температуры наружного воздуха в мае и июле (самые высокие температуры наружного воздуха) [16].

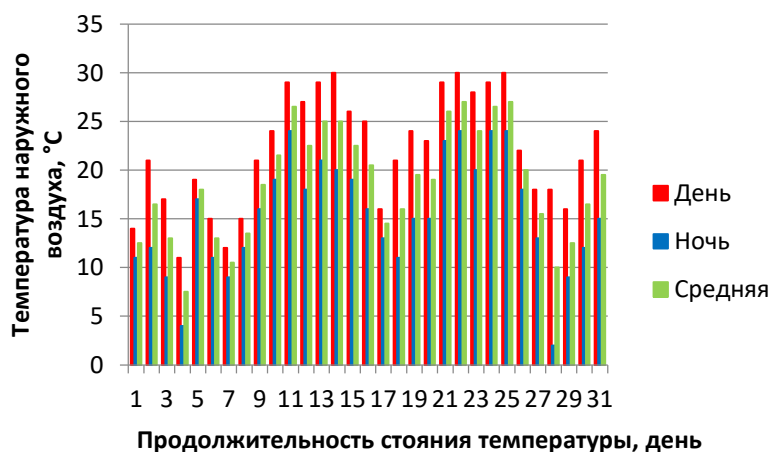


Рис.2. Изменение температуры наружного воздуха в мае 2024г.

Fig.2. Change in outside air temperature in May 2024

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

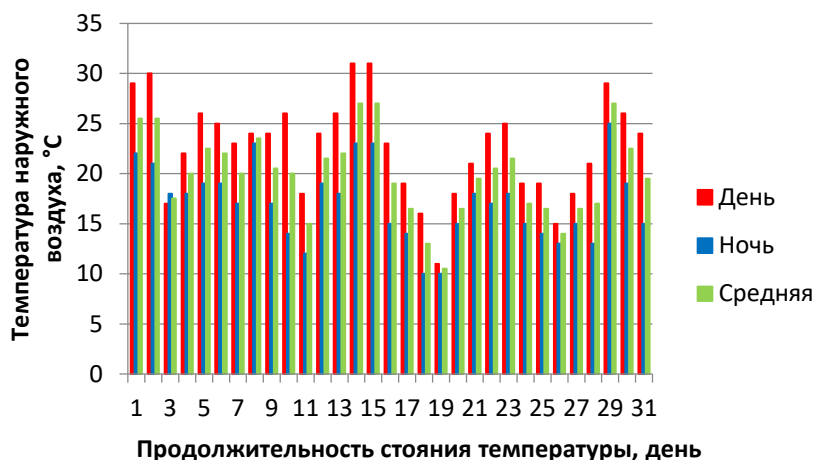


Рис. 3. Изменение температуры наружного воздуха в июле 2024г.

Fig.3. Change in outside air temperature in July 2024

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Анализ изменения температур наружного воздуха в период с июня по август показал, что среднесуточная температура составила 19,45°C. В мае наружная температура воздуха

составила 18,71°C, а в сентябре и вовсе 13,57°C. Значения среднедневных и средненочных температур за самый жаркий период (июль) составили 22,71°C и 17,06°C соответственно. Максимальная температура воздуха за летний период поднималась до отметки 31°C и длилась всего лишь два дня [16,17].

Предлагаемое решение по реконструкции градирни ТЭЦ заключается в следующем. Поступающий в градирню наружный воздух (рис.4), охлаждается, проходя через испарительные панели (рис. 5), установленные за воздухозаборными окнами градирни. Охлаждение воздуха происходит за счет мгновенного испарения «тумана» с поглощением из окружающего пространства так называемой скрытой теплоты испарения.

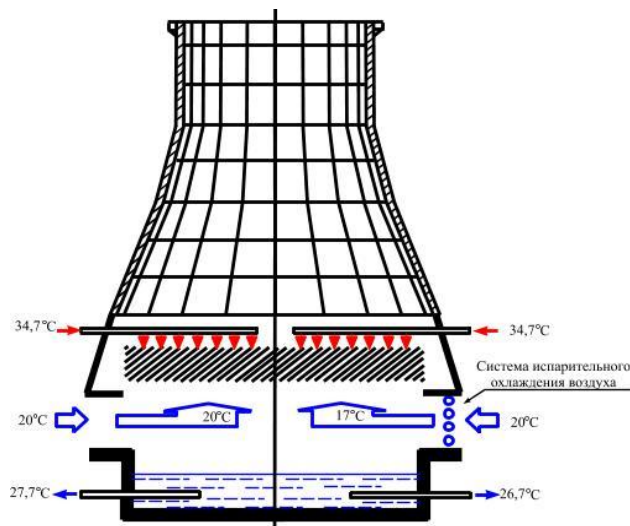


Рис. 4. Схема поступления наружного воздуха в градирню  
Fig.4. Scheme of outside air intake into the cooling tower

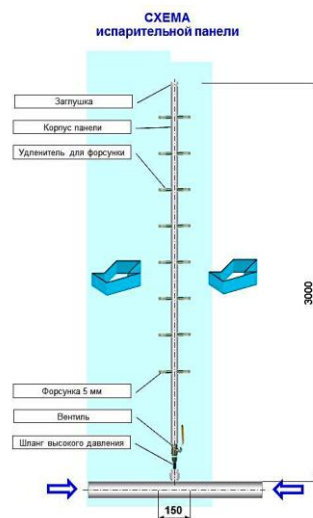


Рис.5. Схема испарительной панели  
Fig.5. Evaporative panel diagram

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Рассматривается работа системы испарительного охлаждения в трех критических погодных условиях:

1% - нарушение технологического процесса производства в целом и, как следствие, значительные убытки.

5% - допускаемое временное нарушение технологического процесса отдельных установок.

10% - снижение эффективности производственного цикла в целом и отдельных его элементов.

Параметры наружного (атмосферного) воздуха для условия 1% обеспеченности в летний период года – температура воздуха по сухому термометру составляет + 28,0 °С, относительная влажность воздуха 55 % [18].

По номограмме на рис. 6 определим температуру охлажденной воды.

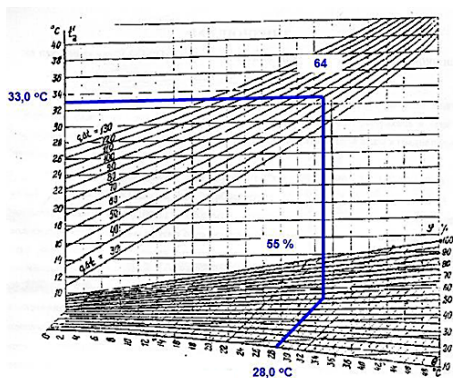


Рис. 6. Процесс охлаждения воды при температуре наружного воздуха +28°C  
Fig.6. The process of cooling water at an outside air temperature of +28°C

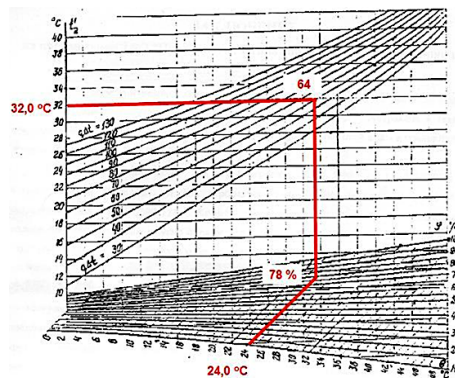


Рис. 7. Температура оборотной воды при использовании предварительного охлаждения воздуха  
Fig.7. Temperature of circulating water when using air pre-cooling

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для заданного критического режима работы, температура охлажденной воды составит 33 °С. Данная температура является критической для работы исследуемой градирни [19].

Рассмотрим данный график при новом условии работы градирни, принудительном охлаждении воздуха методом испарения влаги (рис. 7).

Для эффективной работы градирни ограничение предела насыщения воздуха составит 80-85% (предел испарительного процесса - насыщенный пар.). При данном условии возможно испарить не более 2 граммов воды на 1 м<sup>3</sup> поступающего в градирню воздуха, что позволит получить значение температуры воздуха по сухому термометру +24,0°С и относительной влажности воздуха 78 % [20].

Анализируя рис. 4 и рис. 5, использование предварительной системы охлаждения в "критический" период работы градирни (1% обеспеченность) позволит снизить температуру оборотной воды на 1,0 °С.

Аналогичные расчеты были выполнены для второго и третьего критических режимов работы.

Для получения устойчивой работы градирни при меняющихся параметрах наружного (атмосферного) воздуха в летний период предусматривается испарение 3,0 граммов воды на 1 м<sup>3</sup> воздуха, поступающего в градирню.

Эффективность применения системы возрастает при более высоких значениях температур атмосферного воздуха [21,22].

#### Результаты (Results)

Основанием для проведения экономического анализа работы градирен на ТЭЦ будет служить – сравнение затрат на ТЭЦ в зависимости от наружной температуры воздуха.

Для сравнения затрат на производство принято два дня работы ТЭЦ, которые наглядно демонстрируют средние температуры в осенне-весенний и летний период.

1 день – 21 апреля 2024 г.: температура наружного воздуха +14,1°С, влажность воздуха 60%.

2 день - 17 июля 2024 г.: температура наружного воздуха +25,7°С, влажность воздуха 48%.

Исходя из графика режима охлаждения оборотной воды для охлаждения и конденсации пара от конденсаторов ТЭЦ (рис. 8) видно, что температура охлажденной воды после градирни была: 1 день – 21 апреля 2024 г. +24,3°С; 2 день – 17 июля 2022 г. +30,0°С.

Разница между температурами охлажденной воды составила 5,7 °С.

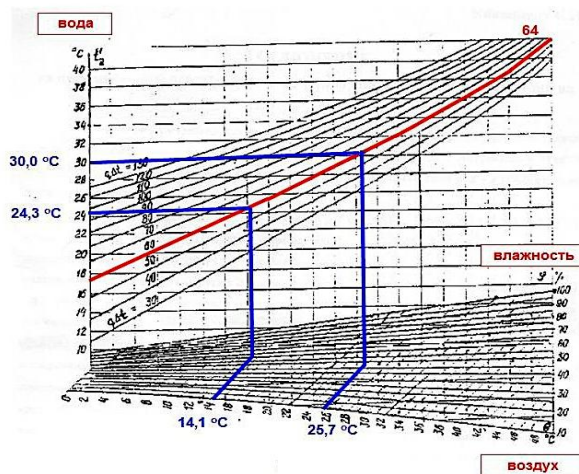


Рис.8. Сравнение процессов охлаждения воды при разных климатических условиях

Fig.8. Comparison of water cooling processes under different climatic conditions

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Расчет экономического эффекта от снижения температуры оборотной воды в конденсаторе на базе турбины ПТ-60-130/13 проводится исходя из максимального расхода оборотной воды на градирне марки БГ-2600-70, равный 20800 м<sup>3</sup>/ч., при этом расход оборотной воды позволяет охлаждать 2 конденсатора марки 50-КЦС-4, расход воды одного конденсатора составляет 8000 м<sup>3</sup>/ч. Расход оборотной воды 2-х конденсаторов марки 50-КЦС-4, будет составлять 16000 м<sup>3</sup>/ч, что позволяет градирне работать в цикле с 2 паровыми турбинами марки ПТ-60-130/13.

Показатели работы турбины марки ПТ-60-130/13 за август 2024 года  
Performance indicators of the PT-60-130/13 turbine for August 2024

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Значение
Средняя электрическая нагрузка	$N_{ср}$	МВт	45,1
Средняя тепловая нагрузка всего	$Q_{ср}$	Гкал/час	47,1
в т.ч. производственного отбора	$Q_{по}$	Гкал/час	35,2
в т.ч. теплофикационного отбора	$Q_{то}$	Гкал/час	11,9
Температура пара у турбин свежего	$t_{офакт}$	°С	557,5
Вакуум нормированный	$V_{норм}$	%	92,35
Вакуум фактический	$V_{факт}$	%	91,54
Температура охлаждающей воды на входе в конденсатор	$T_1$	°С	27,1
на выходе из конденсатора	$T_2$	°С	33,9
Температурный напор в конденсаторе нормированный	$\Delta t_{норм}$	°С	5,0
Температурный напор в конденсаторе фактический	$\Delta t_{факт}$	°С	6,7

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Исходя, из данных таблицы 2 можно рассчитать температуру насыщения ( $T_s$ ).

$$T_s = T_1 + \Delta T + \Delta t_{факт} = 27,1 + 6,8 + 6,7 = 40,6^\circ\text{C}$$

где  $T_1$  – температура на входе в конденсатор;

$\Delta T = T_2 - T_1 = 33,9 - 27,1 = 6,8^\circ\text{C}$  – температура нагрева воды в конденсаторе;

$\Delta t_{факт}$  – фактический температурный напор в конденсаторе (в соответствии с табл. 3  $\Delta t_{факт} = 6,7^\circ\text{C}$ ).

Давление в конденсаторе при температуре насыщения пара  $40,6^\circ\text{C}$  составит 7,623 кПа [23].

При условии уменьшения температуры воды на входе в конденсатор на  $3^\circ\text{C}$ , при постоянном расходе воды в конденсаторе, получим что:

$$T_s = 24,1 + 6,8 + 6,7 = 37,6^\circ\text{C}$$

Воспользовавшись таблицами свойств водяного пара, определим, что температуре насыщения  $37,6^\circ\text{C}$  соответствует значение полноты вакуума 6,48968 кПа (давление насыщения).

Разность давления в конденсаторе при температуре насыщения  $40,6^\circ\text{C}$  и  $37,6^\circ\text{C}$ , составит:

$$\Delta P_k = 7,623 - 6,490 = 1,133 \text{ кПа}$$

Зная температурный напор и вакуум в конденсаторе, определим расход пара по рисунку 9.

В соответствии с рисунком 9 расход пара в конденсаторе составит 118 т/ч. Зная расход пара в конденсаторе, и величины полноты вакуума при температуре насыщения воды  $40,6^\circ\text{C}$  и  $37,6^\circ\text{C}$ , определим поправку к мощности турбоустановки по рисунку 10.

В соответствии с рис. 10 поправка к мощности составила 492 кВт.

Для турбины марки ПТ60-130/13, число часов работы на летний период 2022 года принято 3600 часов. Таким образом, экономический эффект от дополнительной выработки электрической энергии при снижении температуры оборотной воды на входе в конденсатор на  $3^\circ\text{C}$  составит:

$$\Xi = T \cdot \Delta N_p \cdot S = 3600 \cdot 492 \cdot 1,256 \cdot 4,14 = 7332768 \text{ руб.}$$

где  $S$  – стоимость электрической энергии на собственные нужды в 2024 году составляла 4,14 руб./кВтч.

Так как в паре с градирней работает 2 турбины марки ПТ-60-130/13, то экономический эффект составит:

$$\mathcal{E}_{\text{сумм}} = 7332768 \cdot 2 = 14665536 \text{ руб.}$$

При капитальных затратах на внедрение системы испарительного охлаждения воздуха в размере 25 000 000 рублей срок окупаемости составит:

$$T_{\text{ок}} = \frac{25000000}{14665536} = 1,7 \text{ года.}$$

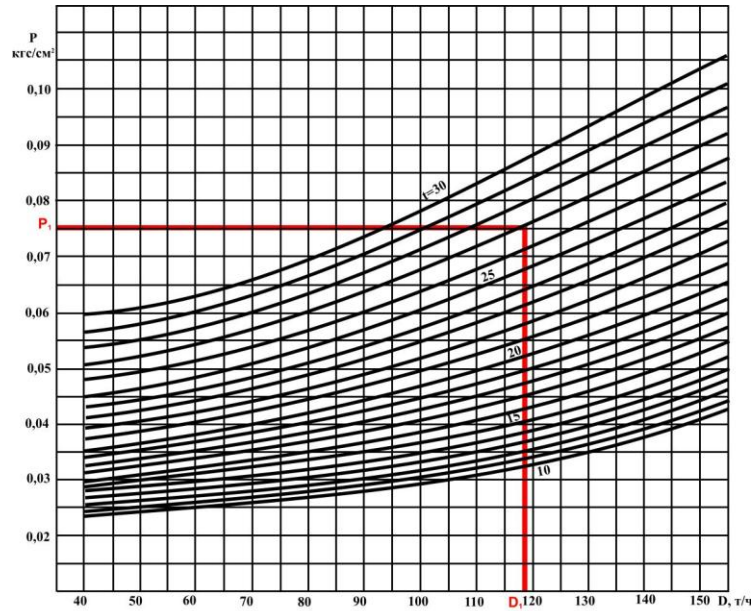


Рисунок 9. Давление отработавшего пара в конденсаторе.

Fig.9. Exhaust steam pressure in the condenser

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

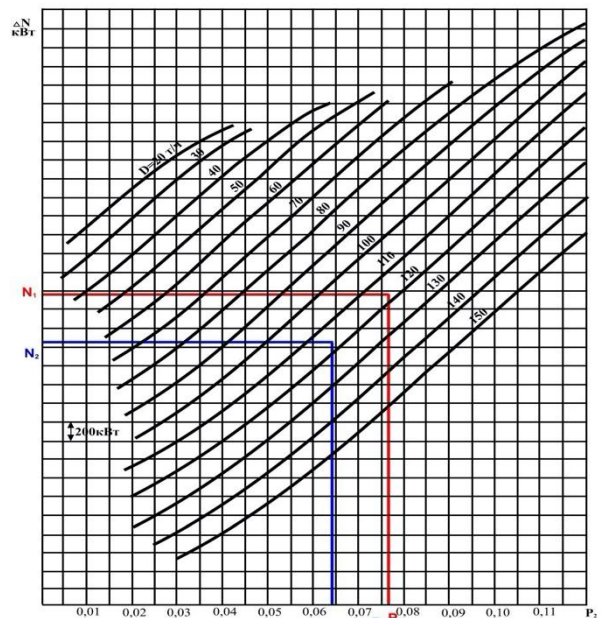


Рисунок 10. Поправка ( $\Delta N_p$ ) к мощности турбоустановки на изменение давления отработавшего пара в конденсаторе

Fig.10. Correction ( $\Delta N_p$ ) to the turbine power for the change in the exhaust steam pressure in the condenser

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

### Заключение

Было отмечено, что градирни являются важнейшим компонентом таких электростанций, как атомные электростанции, а также нефтеперерабатывающих,

нефтехимических и нефтехимических заводов, АЭС, а также нефтеперерабатывающих, нефтехимических и пищевых заводов.

Использование системы предварительного охлаждения наружного воздуха перед градирней башенного типа может значительно улучшить ее работу в критических погодных условиях (экстремальные условия (1%), временные нарушения (5%), умеренные условия (10%);

Система предварительного охлаждения наружного воздуха действительно может сыграть решающую роль в поддержании стабильной работы градирни. Она помогает снизить температуру воздуха, поступающего в градирню, что способствует:

увеличению эффективности теплообмена (Холодный воздух улучшает теплообмен между водой и воздухом, что помогает более эффективно снижать температуру воды);

снижению нагрузки на градирню (Меньшая разница температур между водой и воздухом снижает нагрузку на систему, позволяя ей работать более эффективно и долго);

стабильности работы (Предварительное охлаждение помогает поддерживать стабильную работу градирни в условиях экстремальных температур, предотвращая перегрев и связанные с ним проблемы);

улучшению общего функционирования (В итоге это может привести к снижению затрат на энергию и воду, а также продлить срок службы оборудования).

Такой подход позволяет адаптироваться к различным метеорологическим условиям и обеспечивать надежное функционирование системы охлаждения в любое время года.

Использование технологии предварительного испарительного охлаждения воздуха позволит увеличить мощность турбоустановки на 492 кВт. С учетом времени работы турбоустановки экономический эффект составит 14 665 536 руб. в денежном выражении с сроком окупаемости 1,7 года.

#### Литература

1. Инвестиционный портал Республики Татарстан. URL: <https://invest.tatarstan.ru/ru/about/territory-and-climate/> (дата обращения 09.09.2025)
2. Лаптев А.Г., Лаптева Е.А. Математические модели и расчет коэффициентов тепло- и массоотдачи в насадках вентиляторных градирен // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90. № 3. С. 678-684.
3. Шишацкий Ю.И. и др. Повышение эффективности работы градирен в водооборотном цикле // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2022. Т. 84. № 2. С. 34-38.
4. He W. et al. Optimal thermal management of server cooling system based cooling tower under different ambient temperatures // Applied Thermal Engineering. 2022. V. 207. P. 118176.
5. Pandelidis D. et al. Comparative analysis between traditional and M-Cycle based cooling tower // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. V. 159. P. 120124.
6. Balzamorov D.S., Sabitov L.S., Balzamorova E.Yu., Timershin B.F. Evaluation of the applicability of pre-evaporative cooling of air in front of the cooling tower in the conditions of the third climatic zone of the Russian Federation // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. and Eng. 2018. Vol. 412.
7. Ежов В.С., Захаров А.Е. Инновационный вариант повышения эффективности вентиляторных градирен // Будущее науки-2020. 2020. С. 215-219.
8. Balzamorov D.S., Timershin B.F. Overview of advanced technologies for generating companies // Modern Science. – 2017. – № 2. – P. 26–29.
9. Лаптева Е. А. [и др.] Показатели энергоэффективности градирен // Надежность и безопасность энергетики. 2018. Т. 11. №3. С. 217–221.
10. Xiong, Y., Li, M., Wang, J. Experimental study on the thermal performance of a cross-flow cooling tower with different packing configurations // Applied Thermal Engineering. – 2015. – Vol. 87. – P. 10-18.
11. Патент РФ № RU2752683C1. Всепогодная башенная градирня. Заявитель: Попов А.И., Щеклеин С.Е. Оpubл. 29.07.2021. Бюл. №22
12. Патент РФ № RU193374U1. Башенная градирня. Заявитель: Давлетшин Ф.М.; Оpubл. 28.10.2019. Бюл. № 31.
13. Хайбуллина А.И., Хайруллин А.Р., Сафиуллина Н.И. [и др.]. Экспериментальное исследование теплообмена в пучке труб при пульсациях потока // Инженерный вестник Дона, 2018. № 11(83). С. 125-131.
14. Бальзамов Д. С., Зиганшина А.Р. Повышение эффективности работы теплоисточников // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи : материалы IV российской молодежной научной школы-конференции: в 2 томах,

Томск, 01–03 ноября 2016 года / Томский политехнический университет. Том 2. – Томск: ООО «ЦРУ», 2016. – С. 36-38.

15. Ядутов, В.В., Петров Т.И., Зацаринная Ю.Н. Воздействие ТЭС на окружающую среду // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. №19. С. 78-79.

16. Бальзамов Д. С., Тимершин Б.Ф. Анализ целесообразности применения системы испарительного охлаждения воздуха перед градирней в условиях климатической зоны республики Татарстан // Энергетика и энергосбережение: теория и практика : материалы III Всероссийской научно-практической конференции, Кемерово, 13–15 декабря 2017 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2017. – С. 107.

17. Бальзамов Д.С., Конахина И.А. Система энерготехнологического комбинирования высокотемпературного участка дегидрирования изоамиленов в изопрен // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2010. №1 (4). С. 16-25.

18. Хайбуллина А.И., Зиннатуллин Н.Х., Ильин В.К. Повышение эффективности работы теплообменного оборудования использованием пульсационных методов очистки // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 1. С. 59-67.

19. Lemouari, M., Boumaza, M. Experimental analysis of the thermal performance of a cooling tower // Energy Conversion and Management. – 2010. – Vol. 51. – P. 2418-2424.

20. Sun, X., Zhang, B., Liu, X. Environmental impact analysis of cooling towers // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 237. – P. 117-125.

21. Kelly, N.W. The Cooling Tower: Principles and Practice. – 3rd ed. – Brick Tower Press, 2009. – 352 p.

22. Heidarinejad, G., Karami, M., Delfani, S. Performance analysis of a hybrid wet and dry cooling system // Energy and Buildings. – 2015. – Vol. 108. – P. 49-58.

23. Local Heat Transfer Dynamics in the In-Line Tube Bundle under Asymmetrical Pulsating Flow / A. Haibullina, A. Khairullin, D. Balzamor [et al.] // Energies. – 2022. – Vol. 15, No. 15. – P. 5571.

#### Авторы публикации

**Бальзамов Денис Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений», Казанский государственный энергетический университет. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3877-7643>. E-mail: [dbalzamor@mail.ru](mailto:dbalzamor@mail.ru).

**Бронская Вероника Владимировна** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Процессов и аппаратов химической технологии», Казанский национальный исследовательский технологический университет; доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений», Казанский государственный энергетический университет. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2611-2679>. E-mail: [dweronika@mail.ru](mailto:dweronika@mail.ru).

#### References

1. Investment portal of the Republic of Tatarstan. URL: <https://invest.tatarstan.ru/ru/about/territory-and-climate/> (дата обращения 09.09.2025)

2. Laptev A.G., Lapteva E.A. Mathematical models and calculation of heat and mass transfer coefficients in fan cooling tower nozzles // Engineering and Physics Journal. 2017. Vol. 90. № 3. pp. 678-684.

3. Shishatsky Yu.I. and others. Improving the efficiency of cooling towers in the water cycle // Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2022. Vol. 84. № 2. pp. 34-38.

4. He W. et al. Optimal thermal management of server cooling system based cooling tower under different ambient temperatures // Applied Thermal Engineering. 2022. V. 207. P. 118176.

5. Pandelidis D. et al. Comparative analysis between traditional and M-Cycle based cooling tower // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. V. 159. P. 120124.

6. Balzamor D.S., Sabitov L.S., Balzamova E.Yu., Timershin B.F. Evaluation of the applicability of pre-evaporative cooling of air in front of the cooling tower in the conditions of the third climatic zone of the Russian Federation // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. and Eng. 2018. Vol. 412.

7. Yezhov V.S., Zakharov A.E. An innovative option for increasing the efficiency of fan cooling towers // The future of science-2020. 2020. pp. 215-219.

8. Balzamor D.S., Timershin B.F. Overview of advanced technologies for generating companies // Modern Science. – 2017. – № 2. – P. 26–29.
9. Lapteva E. A. et al. Indicators of energy efficiency of cooling towers // Reliability and safety of energy. 2018. Vol. 11. №. 3. pp. 217-221.
10. Xiong, Y., Li, M., Wang, J. Experimental study on the thermal performance of a cross-flow cooling tower with different packing configurations // Applied Thermal Engineering. – 2015. – Vol. 87. – P. 10-18.
11. Patent of the Russian Federation No. RU2752683C1. All-weather cooling tower. Applicant: Popov A.I., Shcheklein S.E. Publ. 07/29/2021. Bul. №. 22
12. Patent of the Russian Federation No. RU193374U1. Tower cooling tower. Applicant: Davletshin F.M.; Published on 28.10.2019. Byul. No. 31.
13. Khaibullina A.I., Khairullin A.R., Safiullina N.I. et al. Experimental study of heat transfer in a bundle of pipes during flow pulsations // Engineering Bulletin of the Don, 2018. No. 11(83). pp. 125-131.
14. Balzamor D. S., Ziganshina A.R. Improving the efficiency of heat sources // Energy engineering, electromechanics and energy-efficient technologies through the eyes of youth : proceedings of the IV Russian Youth Scientific school-conference: in 2 volumes, Tomsk, November 01-03, 2016 / Tomsk Polytechnic University. Volume 2. Tomsk: LLC "CIA", 2016. pp. 36-38.
15. Yadutov, V.V., Petrov T.I., Zatsarinnaya Yu.N. The impact of thermal power plants on the environment // Bulletin of Kazan Technological University. 2013. Vol. 16. No. 19. pp. 78-79.
16. Balzamor D. S., Timershin B.F. Analysis of the feasibility of using an evaporative air cooling system in front of a cooling tower in the climatic zone of the Republic of Tatarstan // Energy and energy conservation: theory and practice : proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Conference, Kemerovo, December 13-15, 2017. Kemerovo: Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 2017, p. 107.
17. Balzamor D.S., Konakhina I.A. The system of energy-technological combination of a high-temperature isoamylene dehydrogenation site in isoprene // Bulletin of Kazan State Power Engineering University. 2010. No. 1 (4). pp. 16-25.
18. Khaibullina A.I., Zinnatullin N.Kh., Ilyin V.K. Improving the efficiency of heat exchange equipment using pulsation cleaning methods // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Energy problems. 2021. Vol. 23. No. 1. pp. 59-67.
19. Lemouari, M., Boumaza, M. Experimental analysis of the thermal performance of a cooling tower // Energy Conversion and Management. – 2010. – Vol. 51. – P. 2418-2424.
20. Sun, X., Zhang, B., Liu, X. Environmental impact analysis of cooling towers // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 237. – P. 117-125.
21. Kelly, N.W. The Cooling Tower: Principles and Practice. – 3rd ed. – Brick Tower Press, 2009. – 352 p.
22. Heidarinejad, G., Karami, M., Delfani, S. Performance analysis of a hybrid wet and dry cooling system // Energy and Buildings. – 2015. – Vol. 108. – P. 49-58.
23. Local Heat Transfer Dynamics in the In-Line Tube Bundle under Asymmetrical Pulsating Flow / A. Khaibullina, A. Khairullin, D. Balzamor [et al.] // Energies. – 2022. – Vol. 15, No. 15. – P. 5571.

#### **Authors of the publication**

**Denis S. Balzamor** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Veronika V. Bronskaya** – Kazan National Research Technological University, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника*

**Получено** **08.10.2025 г.**

**Отредактировано** **05.11.2025 г.**

**Принято** **25.11.2025 г.**