

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-05>

EDN MKMHKV

Оригинальная статья / Original paper



Опыт проведения реагентной очистки оросителя для повышения охлаждающей способности и эффективности работы башенной испарительной градирни

В.П. Поваров  , **В.В. Бакулин, Н.В. Карандеева**

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»

г. Нововоронеж, Воронежская область, Российская Федерация

 *PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru*

Аннотация: Описан уникальный опыт по очистке оросителя башенной испарительной градирни на энергоблоке №1 НВАЭС-2 для повышения ее охлаждающей способности. Проведена оценка эффективности реагентной очистки оросителя от карбонатных отложений в ремонтную кампанию 2025 г. в сравнении с механическими способами, опробованными ранее. Описан процесс взаимодействия реагента с загрязнениями. Рассмотрено влияние рабочего раствора на конструкционные элементы градирни. Особое внимание уделено технологии проведения очистки с акцентом на безопасность, технику и качество выполнения работ с достижением критериев успешности процесса. Представлены результаты лабораторных испытаний по определению химического состава отложений и конечных продуктов очистки. Предложены способы утилизации промывных вод с минимизацией экологической нагрузки. В статье проанализировано влияние факторов проведения процесса на его эффективность: состава, концентрации реагента, времени экспозиции промывочного раствора и степени загрязнения участков оросителя. На основании полученных данных по изменению охлаждающей способности градирни после ППР-2025 рассчитан экономический эффект и срок окупаемости представленного метода.

Ключевые слова: башенные испарительные градирни, ороситель, внутрикорпусные устройства, солеотложения, водно-химический режим, ингибиторы, реагентная очистка, планово-предупредительный ремонт.

Для цитирования: Поваров В.П., Бакулин В.В., Карандеева Н.В. Опыт проведения реагентной очистки оросителя для повышения охлаждающей способности и эффективности работы башенной испарительной градирни. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(3):43–56. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-05>

For citation: Povarov V.P., Bakulin V.V., Karandeeva N.V. Sprinkler reagent cleaning experience to improve cooling capacity and evaporative cooling tower efficiency. *Nuclear Safety*. 2025;15(3):43–56. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-05>

Sprinkler reagent cleaning experience to improve cooling capacity and evaporative cooling tower efficiency

Vladimir P. Povarov  , **Vladimir V. Bakulin, Natalya V. Karandeeva**

Novovoronezh Nuclear Power Plant – a branch of Rosenergoatom Concern JSC

Novovoronezh, Novovoronezh, Russian Federation

 *PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru*

Abstract. This paper describes a unique experience in cleaning the sprinkler of the evaporative cooling tower at power unit No. 1 of the Novovoronezh NPP-2 to increase its cooling capacity. The effectiveness of reagent cleaning of the sprinkler from carbonate deposits during the 2025 repair campaign was evaluated in comparison with mechanical methods tested earlier. The process of reagent interaction with contaminants is described. The influence of the working solution on the structural elements of the cooling tower is considered. Particular attention is paid to the cleaning

technology with an emphasis on safety, technique, and quality of work with the achievement of process success criteria. The results of laboratory tests to determine the chemical composition of deposits and final cleaning products are presented. Methods for the disposal of wash water with minimal environmental impact are proposed. The article analyses the influence of process factors on its effectiveness: composition, reagent concentration, exposure time of the washing solution, and the degree of contamination of the sprinkler areas. The economic effect and payback period of the presented method are calculated based on the data obtained on the change in the cooling capacity of the cooling tower after SPM-2025.

Ключевые слова: Evaporative cooling towers, sprinkler, internal devices, salt deposits, water chemistry, inhibitors, reagent cleaning, scheduled preventive maintenance.

Введение

Башенные испарительные градирни (БИГ) являются ключевыми элементами системы основной охлаждающей воды и обеспечивают отвод тепла к конечному потребителю – атмосфере. Своего рода – это третий контур охлаждения, эффективность работы которого влияет на выработку электроэнергии и напрямую зависит от чистоты теплообменной поверхности оборудования, в том числе внутрикорпусных устройств градирни. Для обеспечения эффективной работы БИГ и другого оборудования системы основной охлаждающей воды важно поддерживать оптимальный водно-химический режим, гарантирующий минимизацию образования отложений и коррозионных повреждений оборудования в системе [1]. Однако в условиях упаривания избежать полного отсутствия отложений в системе, работающей на воде гидрокарбонатного класса с пограничным индексом Ризнера¹ и склонной к образованию накипи, невозможно [2]. Наиболее подвержены заносу солеотложениями тупиковые зоны, участки с недостаточно эффективным водораспределением, а также развитая поверхность оросительного устройства, которая является границей раздела фаз жидкость-пар. Чем более развита поверхность, тем более интенсивно происходит процесс испарения. Начальное образование отложений повышает развитость поверхности за счет кристаллов накипи, имеющих игольчатую структуру и, соответственно, не приво-

дят к снижению эффективности оросителя. Постепенно увеличиваясь в размерах, кристаллические отложения сливаются в единый конгломерат, что приводит к частичному или полному нарушению проходного сечения сетки оросителя, заметно снижая пропускную способность оросителя, что в конечном итоге ухудшает глубину охлаждения воды. Со временем отложения создают механическое напряжение на материалах оросителя, что может привести к деформации или растрескиванию, особенно если он изготовлен из полимеров. Кроме того, во влажном состоянии отложения значительно утяжеляют рабочие слои оросителя, создавая дополнительную нагрузку на опорные балки, что представляет опасность обрушения конструктивных элементов градирни [3].

В связи с внедрением стабилизационного водно-химического режима (ВХР), предусматривающего введение ингибиторов солеотложений в оборотную воду градирни, при условии ограничения упаривания (с поддержанием соответствующих объемов подпитки и продувки для эффективного водообмена), введен нормативный показатель «Транспорт кальция, не менее 90%»¹. Это означает, что допустимый уровень остаточной концентрации кальция в оборотной воде, вызывающего образование карбонатных отложений, должен быть не более 10% [4]. Но даже это количество кальция (в среднем 140 мг/дм³) при циркуляции упаренной донской воды способно вызвать образование отложений карбоната кальция порядка

¹ СТО 1.1.1.02.006.1550-2018. Коррекционная обработка охлаждающей воды башенных испарительных градирен атомных станций. – Москва: АО «Концерн Росэнергоатом», 2019. – Режим доступа: в локальной сети организации.

600 т/год². Как следствие, в системе значительно ухудшается теплосъем, падает охлаждающая способность градирни, что приводит к недовыработке электроэнергии.

Для восстановления теплопередающих свойств металлической поверхности оборудования широко применяется химическая промывка трубок и пластин в теплообменниках с использованием щадящих кислот, таких, как лимонная, сульфаминовая, фосфорная [5]. Учитывая хорошую растворимость карбонатных отложений в кислой среде, возникла идея проведения реагентной очистки от карбонатных отложений полимерного оросителя, устойчивого к агрессивным свойствам кислот [6]. Во избежание разрушения бетона, необходимо также предусмотреть защиту бетонных конструкций градирни от негативного воздействия промывочного раствора. Для соблюдения этого важного условия на базе Томского государственного архитектурно-строительного университета совместно со специалистами ООО «Новохим» были разработаны отечественный реагент «Антиржавин» и технология очистки оросителя, предусматривающая экранирование внутрикорпусных бетонных конструкций тентовым легко монтируемым изделием из поливинилхлорида, стойкого к кислотам.

В период планово-предупредительного ремонта (ППР) 2023 г. на энергоблоке №1 НВАЭС-2 специалистами ООО «Новохим» проведены пробные испытания технологии реагентной очистки оросителя на одном из выделенных секторов центральной зоны площадью 50 м² для последующей реализации мероприятий по восстановлению охлаждающей способности градирни в ППР-2025. Следует отметить, что работы проводились осенью при температуре наружного воздуха от +5°C до +7°C. Результаты выполненных работ следующие: ороситель, достигший критерия очистки

(80 кг/м³), в среднем отмыт на 93,5%; ороситель, достигший критерия замены (200 кг/м³), отмыт на 75 %, что вывело его в состояние, не требующее замены. В условиях оптимизации сроков проведения планового ремонта блоков снижение трудозатрат и времени выполнения работ по ремонту БИГ с применением технологии реагентной очистки оросителя ООО «Новохим» представляются весьма перспективными и позволят выполнять очистку оросителя в установленные сроки. Периодическая очистка оросителя приведет к увеличению интервалов его замены.

В статье рассмотрены новаторский опыт, эффективность и возможность тиражирования технологии очистки оросителя любого типа от карбонатно-кальциевых отложений на примере БИГ-1 Нововоронежской АЭС-2.

Материалы, методы исследования и обсуждение результатов

В градирнях обратная вода снижает температуру за счет испарения подогретой в теплообменном оборудовании воды и конвективного теплообмена при контакте с воздухом, затем уже охлажденная, она вновь подается в теплообменники и конденсаторы. Градирни должны обеспечивать эффективность охлаждения и связанную с ней тепловую экономичность электростанции. На АЭС применяют башенные градирни, в которых система раздачи охлаждаемой воды расположена внутри башни. Схема работы башенной испарительной градирни изображена на рисунке 1.

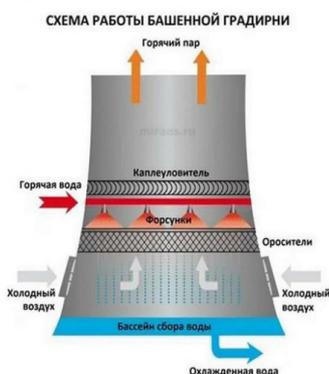


Рисунок 1. Схема работы башенной испарительной градирни
Figure 1. Operating scheme of the tower evaporative cooling tower

² Отчет «Анализ используемых и новых технологий повышения эффективности эксплуатации ТМО технических схем АЭС. Разработка предложений и рекомендаций для повышения эффективности эксплуатации ТМО». Москва 2017, с. 212. – Режим доступа: в локальной сети организации.

Для организованного водоснабжения горячая вода поступает в градирню через два подводящих канала. Далее вода подается через четыре вертикальные подъемные шахты к распределительному уровню. Горизонтальные распределительные трубопроводы соединены с верхней частью вертикальных водоподъемных каналов. Затем вода под давлением 15–20 кПа поступает в оросительное устройство, расположенное на высоте 10–20 м, через боковые распределительные

трубы, соединенные с водораспределительными каналами. Рабочие трубопроводы, выполненные из стеклопластика, примыкают к боковым поверхностям водораспределительных каналов. Каплеуловительное устройство (в виде гофрированных листов из ПВХ) предназначено для снижения капельного уноса из градирен. На рисунке 2 изображена технологическая часть градирни энергоблока НВАЭС-2.

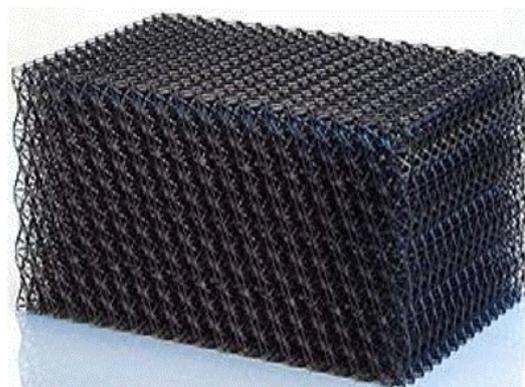
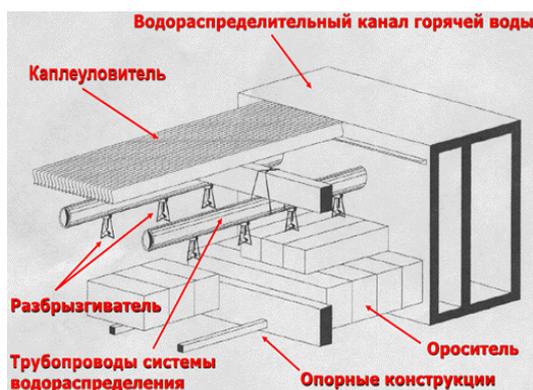


Рисунок 2. Технологическая часть градирни энергоблока НВАЭС-2 с оросителем
Figure 2. The technological part of the cooling tower of the NVNPP-2 power unit with a sprinkler

Вода, поступающая с оросителя, накапливается в бассейне градирни и попадает в главный бассейн насоса охлаждающей воды через отводящий канал градирни.

Оросительное устройство является основным рабочим элементом градирни, в котором вода разделяется на капли, струи или пленки и стекает вниз навстречу воздуху, поступающему через боковые отверстия внизу вытяжной башни. В результате взаимодействия с воздухом вода охлаждается за счет конвективного теплообмена и испарения. Нагретый и насыщенный водяными парами воздух отводится вверх через вытяжную башню.

При разбрызгивании воды в градирнях, вследствие распада гидрокарбонатов и потери свободной углекислоты, происходит увеличение концентрации карбонатов, при взаимодействии которых с кальцием образуются нерастворимые кристаллы накипи карбоната кальция. Процесс образования отложений описывается уравнениями химических реакций: $2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{CO}_2 \uparrow + \text{H}_2\text{O}$ и $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{CaCO}_3 \downarrow$.

Стоит отметить, что на энергоблоках № 1,2 НВАЭС-2 в системе основной охлаждающей воды проектом предусмотрен стабилизационный ВХР. Данный ВХР достаточно рискован с точки зрения вероятности образования отложений в силу высокой карбонатной жесткости охлаждающей воды. В центральной, наиболее теплонапряженной зоне БИГ, работа системы водораспределения обеспечивает высокие скорости потока циркуляционной воды, тем самым способствует смыву рыхлых солевых отложений с поверхности внутрикорпусных устройств (ВКУ). В силу конструктивных особенностей оросителя, имеющего решетчатую структуру и развитую поверхность, он наиболее подвержен заносу отложениями. Кроме того, из-за интенсификации процесса испарения на границе раздела фаз, занос оросительных элементов градирни карбонатом кальция неизбежен.

По результатам ежегодного мониторинга установлено, что слои оросителя загрязнены неравномерно, а именно, первый (нижний) слой, контактирующий с атмосферой, наиболее загрязнен. Кроме того, он испыты-

вает фильтрационную нагрузку, задерживая на своей поверхности взвешенные вещества (ил), биологические загрязнения и соли. Встала задача восстановления проходимости сечений сетки оросителя эффективным, быстрым (укладывающимся в установленные сроки ППР), безопасным способом с учетом наличия бетонных конструкций и послойной неравномерности загрязнений. Из-за опасения воздействия на бетон агрессивных реагентов, способных растворить отложения, специалистами Нововоронежской АЭС были выполнены и оценены безреагентные (механические) методы очистки оросителя. Суть методов и достигнутые результаты описаны ниже.

1. Метод вибрационного воздействия с последующим удалением отложений гидроструйной очисткой аэродинамическим способом аппаратом высокого давления. Метод с частичным демонтажом. Первый слой не демонтируется, второй и третий слои снимаются для вибрационного воздействия в горизонтальной плоскости с частотой 3000 колебаний в минуту, вынуждающей силой от 5,6 кН до 11,3 кН, статическим моментом от 5,7 кг/см² до 11,4 кг/см². Метод очистки блоков оросителя при помощи виброплощадок и продувки сжатым воздухом оказался не достаточно эффективным. Виброплощадка с планируемой частой вибрацией, вынуждающей силой и статическим моментом ожидаемых воздействий на сильно загрязненные блоки оросителя не дала. Дальнейшее увеличение вынуждающей силы и статического момента не производилось, так как не было данных по разрешенной нагрузке на опорную конструкцию градирни. Эффективность механического метода очистки – 30%. Преимущество – безопасность для бетонных конструкций градирни. Недостатки – большие трудозатраты и частичное повреждение оросителя при демонтаже – монтаже. При наличии резервного запаса оросителя можно произвести частичную замену, сократить время работ по восстановлению проектных характеристик градирни, а очистку демонтированных участков проводить при работе энергоблока.

2. Криогенный бластинг. Использованное оборудование – бластер Triventeki, парамет-

ры сжатого воздуха 0,7 МПа. Эффект очистки блока оросителя с использованием технологии «криогенный бластинг» не превышает 13%. Преимущество – безопасность для бетонных конструкций градирни. Недостатки – малоэффективен, так как струя подаваемого сжатым воздухом «сухого льда» не проходит весь слой оросителя 1,35 м, поэтому очистка блока оросителя БИГ-1 с использованием данной технологии требует разборки оросителя БИГ.

3. Гидромеханическая очистка с помощью пневмопушки на мощности. Данный метод подходит для очистки внутренней и наружной периферийных зон градирни. На этапе, проводимом «на режиме», производится удаление большей части (до 60%) минеральных отложений с применением «пневмопушки». Установка поочередно заезжает в каждую секцию с внешней стороны градирни и постепенно простреливает струей сжатого воздуха и воды ороситель на удалении 12 метров от внешнего контура башни. Воздействие сжатого воздуха и воды, а также возникшие колебания приводят к осыпанию отложений на дно бассейна градирни, а непрерывный поток воды сверху смывает застрявшие остатки минеральных солей. Преимущество – безопасность для бетонных конструкций градирни, возможность производить очистку в период топливной кампании. Недостатки – не эффективен, так как отсутствует возможность очищать ороситель центральной зоны при работе на мощности.

4. Очистка оросителя пневмо-импульсным способом. Выполняется без демонтажа оросителя мелкодисперсными двухфазными импульсами сжатого воздуха с каплями воды (размер капель не более 5 мкм). Сжатый воздух из ресиверов пневмопушек при мгновенном (0,003 сек.) открытии быстрого клапана формирует фронт воздушной ударной волны, кинетической энергией которой производится выбивание отложений из каркасной решетки оросителя, а схлопывание кавитационных пузырьков, которые формируются в момент выстрела из поданной к стволам пушки порций воды, усиливает эффект. Очистка производится с помощью залповой системы, состоящей из четырех пневмопушек, смонтированных на раме.

Преимущество – безопасность для бетонных конструкций градирни, не требует демонтажа оросителя. Недостатки – эффективность очистки не превышает 50%.

Поскольку результаты удаления отложенных механическими методами не превысили 50% от исходного веса загрязнений, перспектива выбора встала за химическим способом очистки оросителя градирни. Для предварительной оценки эффективности применяемой химии были выполнены стендовые испытания с подбором типа реагента, концентрации и температуры промывочного раствора³.

Материалами исследования являются не только отложения, поскольку их характер заранее известен, а технология проведения работ, включающая способ доставки промывочного раствора к очищаемым поверхностям, поддержание рабочей концентрации реагента, время экспозиции, критерий срабатывания раствора, процесс удаления остаточных рыхлых отложений, эффективность очистки и, главное, – защита бетонных конструкций градирни. Методы исследования включают осмотр, взвешивание отдельных участков оросителя до и после промывки, хронометраж процесса, расход реагента, определение химического состава отложений и промывочного раствора, визуальная и расчетная оценка эффективности проведения промывки.

В период ППР-2024 выполнен анализ состояния оросителя, по результатам которого было принято решение о замене периферийной зоны и отмывке центральной части градирни. Зафиксировано наличие плотно сцепленных с материалом оросителя отложений темно-серого цвета ломаной кристаллической структуры. Распределение отложений по полю оросителя неравномерное, особенно сильно загрязнены периферийные участки, контактирующие с атмосферой (нижние слои). Отложения отличаются плотностью,

твердостью и гигроскопичностью. Состав отложений следующий: CaCO_3 – 83%; SiO_2 – 11%; биологические загрязнения – 6%⁴ [6].

На основании анализа состава отложений и предварительных стендовых испытаний образцов оросителя с разной степенью загрязненности определялись тип реагента, его концентрация и температура, а также способ подачи раствора к загрязненным участкам оросителя. Технологические параметры и технические характеристики оборудования для очистки подбираются индивидуально, в зависимости от конструктивных особенностей градирен (тип опорной и опорно-подвесной системы с учетом высоты расположения оросителя и конструкции водосбросного бассейна). Скорость подачи раствора реагента и давление определяются исходя из типа выбранного оборудования.

Для очистки оросительных устройств в БИГ-1 НВАЭС-2 использовалось средство «Антиржавин», которое представляет собой водный концентрат органических и минеральных кислот, комплексонов, ингибиторов коррозии и функциональных добавок.

По заключению Томского государственного архитектурно-строительного университета определены степени воздействия реагента «Антиржавин» на бетонные образцы типа: В45, F500, W16, – по классу прочности аналогичных бетону строительных конструкций БИГ НВАЭС-2. Результаты проведенных испытаний по оценке воздействия раствора на бетон показали, что данное воздействие не оказывает влияние на габариты и прочность образцов бетона. Применение средства «Антиржавин» подтверждено АО «ВНИИАЭС» и вошло в перечень реагентов, разрешенных к применению в соответствии с методическими рекомендациями³. Факт минимального воздействия реагента «Антиржавин» на бетон исключает какое-либо разрушающее влияние на пла-

³ МР 1.1.4.04.2210-2023 Выбор технологии химической и механической очистки внутрикорпусных устройств и оросителей башенных испарительных градирен. Методические рекомендации. – Москва: АО «Концерн Росэнергоатом», 2023. – Режим доступа: в локальной сети организации.

⁴ РД ЭО 1.1.2.09.0824-2010 Лабораторный анализ отложений с теплообменного оборудования атомных электростанций с водо-водяным энергетическим реактором. Методики выполнения измерений. – Москва: АО «Концерн Росэнергоатом», 2010. – Режим доступа: в локальной сети организации.

стиковый каркас оросителя в долгосрочной перспективе применения.

Механизм взаимодействия реагента с загрязнениями основан на первоначальном разрушении структуры комплексных отложений с последующим переводом их части в растворенное состояние и удалением остаточных отложений с поверхности оросителя совместно с циркуляционным раствором. Протекание процесса сопровождается характерным бурным выделением углекислотной пены. Химизм основан на реакциях перевода карбонатов в растворимые гидрокарбонаты и углекислоту, который описывается уравнениями (процесс, обратный образованию CaCO_3): $\text{CaCO}_3 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^-$ и $\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \uparrow\text{CO}_2$, итоговое уравнение реакции растворения отложений: $\text{CaCO}_3 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{H}_2\text{O} + \uparrow\text{CO}_2$.

Работы по очистке оросителя должны предусматриваться на остановленной градирне в ППР, проведение которого выпало в 2025 г. на теплое время года, поэтому нагрев промывочного раствора не требовался.

По результатам испытания метода химической очистки оросителя на экспериментальном стенде была составлена технологическая карта процесса выполнения очистки блоков оросителя для градирни энергоблока №1 НВАЭС-2. Для обеспечения высокого качества и безопасности работ в установленные сроки осуществлялась подготовка к проведению работ, которая включала в себя разработку и выполнение комплекса организационных и технических мероприятий.

Гидрохимическая очистка оросительного устройства БИГ производилась без его демонтажа, на основании проекта производства работ, в соответствии с рабочей документацией и действующими инструкциями. Последовательность выполнения работ по очистке блоков оросителя указывалась в технологической карте процесса.

В состав работ по химической очистке блоков оросителя входило:

1) монтаж системы подачи и сбора химического раствора реагента;

2) контрольное взвешивание на платформенных весах выбранных блоков образца загрязненного оросителя градирни;

3) проведение гидрохимической очистки оросительного устройства градирни;

4) сбор отработавшего средства в накопительные емкости для отработанного раствора;

5) контрольное взвешивание на платформенных весах очищенных блоков оросителя градирни;

6) демонтаж системы подачи и сбора химического раствора реагента.

Перед началом работ по химической очистке оросителя БИГ персонал ООО «Новохим» (производителя работ) выполнил:

1) подготовку оборудования и реагента в достаточном количестве для очистки оросителя, емкости, инструменты, материалы в соответствии с ведомостями работ;

2) подготовку временных рабочих мест и определение точек подключения электрооборудования;

3) установку временного сигнального ограждения зоны проведения работ;

4) организацию сбора образовавшегося отработанного раствора;

5) мероприятия по защите опорных строительных конструкций и оборудования БИГ.

Под промываемым участком был предусмотрен специальный водосборный зонт в виде конуса для организованного сбора циркуляционного раствора, который исключал попадание раствора на внутренние конструкции градирни.

Зонт, расположенный под промываемым участком оросителя, представлен на рисунке 3.



Рисунок 3. Исполнение защитного водосборного зонта

Figure 3. The design of the protective drainage device

Одновременно промывались пять сегментов, с установкой пяти таких конусов, которые перемещались по стальным леерам, смонтированным в центральной зоне градирни. Такая схема позволяет сократить время на перестановку конусов на следующий участок и охватить всю площадь оросителя промываемой зоны. Размер стандартного оросителя типа Р-1 составляет 900х600х450 мм, объемом 0,24 м³. В 1 м³ оросителя четыре таких сегмента. Картограмма проведения работ в центральной зоне градирни со схемой размещения оборудования показана на рисунке 4.

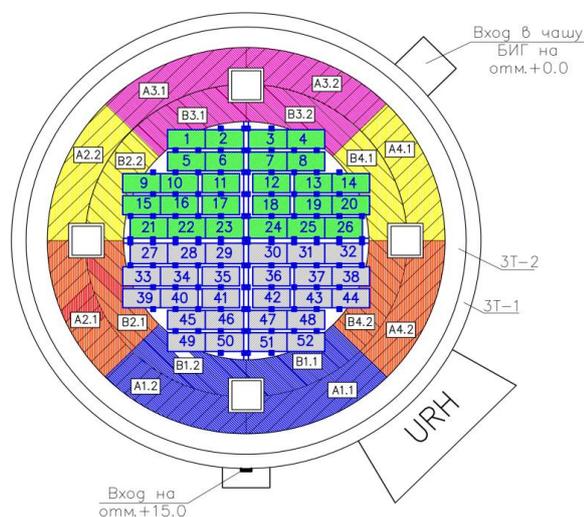


Рисунок 4. Картограмма выполнения работ и схема размещения оборудования при реагентной очистке оросителя БИГ

Figure 4. Cartogram of the work performed and the layout of the equipment during reagent cleaning

Порядковыми номерами обозначены сегменты оросителя градирни, подвергшиеся очистке. Наиболее загрязнена серая зона оросителя (участки № 27-52).

Объем химического контроля процесса промывки оросительного устройства включал периодические (не реже раз в час) измерения значения водородного показателя pH рабочего раствора жидкости и его оперативную корректировку для поддержания на уровне от 1 до 3.

Промывочный раствор реагента на артезианской воде подавался на высоту до 16 м насосами из промежуточных емкостей, установленных в чаше градирни, по временным трубопроводам вверх к оросительному

устройству и наносился методом орошения на очищаемую поверхность верхнего слоя. Непрерывная подача рабочего раствора обеспечивала его проникновение к наиболее загрязненным нижним слоям. По мере срабатывания раствора, он укреплялся свежими порциями концентрата «Антиржавин». Очистка сопровождалась бурным выделением пены, состоящей из углекислоты, поэтому в раствор добавлялся пеногаситель органического типа, содержащий поверхностно-активные вещества. В процессе циркуляции раствор срабатывался, унося с собой нерастворимые примеси в виде песка на дно емкости. Отработавший раствор содержал около 20% взвеси, был пересыщен кальцием, концентрация которого составляла от 130 до 150 г/дм³. Время контакта с одним сектором центральной зоны градирни до завершения очистки занимало около 6–8 часов, в зависимости от степени загрязнения. По завершении химической очистки участок оросителя промывался артезианской водой до нейтрального pH.

Технологический контроль заключался в фиксации не меняющегося во времени значения водородного показателя pH рабочего раствора (окончание эффективной стадии процесса промывки). Рассчитывались результаты эффективности проведения очистки каждого яруса установленного оросителя по изменению веса до и после очистки. В соответствии с рекомендациями³ эффективность химической очистки должна составлять не менее 50%. По результатам оценки эффективности выполненной очистки корректировалось количество реагента и определялось среднее время промывки оросителя.

По окончании очистки оросителя при ее эффективности не менее нормативной, фиксировалось время промывки, количество израсходованного раствора реагента, вес контрольных образцов блоков оросителя. Общее время очистки центральной зоны градирни составило 21 день, за это время удалось очистить порядка 6000 м³ оросителя БИГ без его демонтажа. Результаты очистки до и после с эффективностью порядка 86% продемонстрированы на рисунке 5.

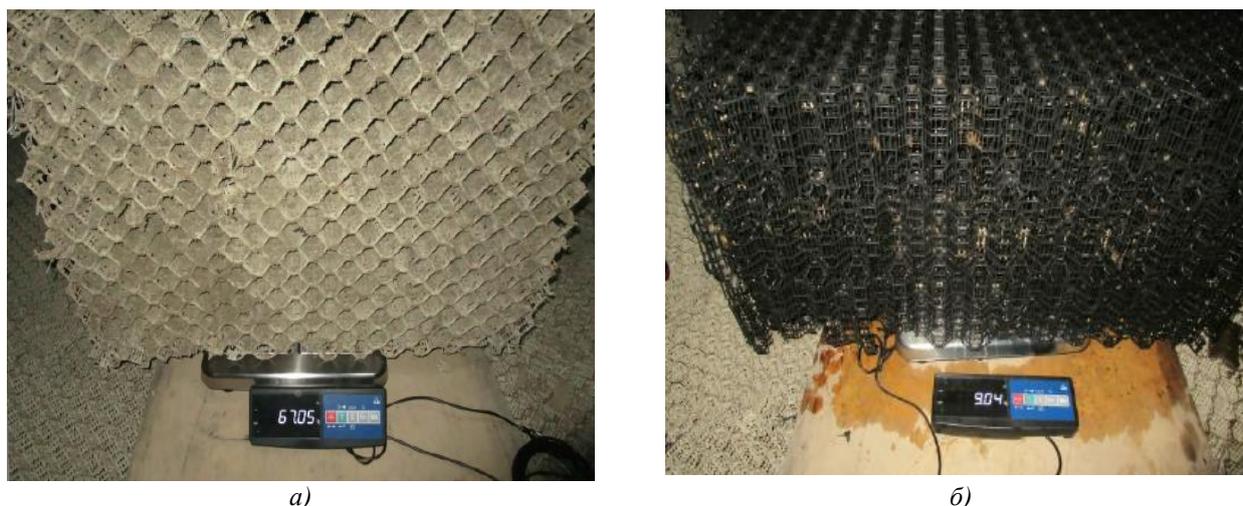


Рисунок 5. Результаты очистки оросителя градирни: а – до очистки; б – после очистки
Figure 5. Results of cleaning the cooling tower sprinkler: a – before cleaning; b – after cleaning

Ориентировочную потребность в реагенте можно было определить заранее по расчетным данным загрязненности системы в количестве 600 т. Для перевода отложений в растворимую гидрокарбонатную форму при загрязнении оросителя 100 кг/м^3 ($1000 \text{ моль/м}^3 \text{ CaCO}_3$) требуется $36,6 \text{ кг}$ (1000 моль/м^3) HCl , в пересчете на товарный продукт – $101,3 \text{ кг}$ соляной кислоты. В пере-

счете на 36%-ную товарную соляную кислоту это составило бы 608 т отложений. В процессе очистки БИГ-1 суммарно израсходовано 532 м^3 реагента «Антиржавин».

На рисунке 6 представлена зависимость расхода реагента в зависимости от веса очищаемого оросителя (степени загрязнения).

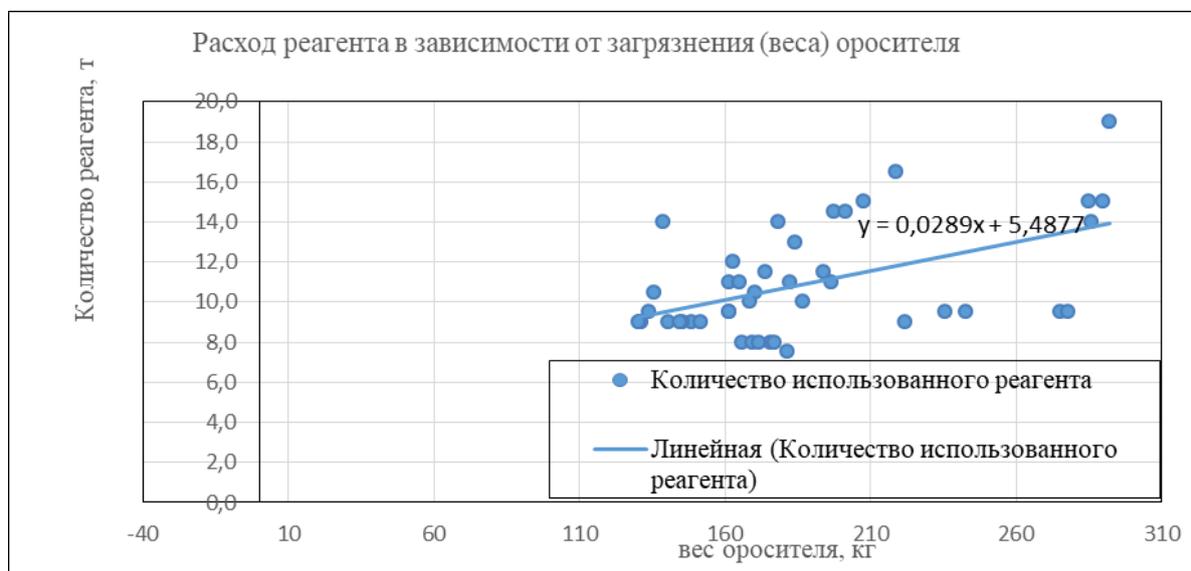


Рисунок 6. Количество использованного реагента в зависимости от степени загрязнения
Figure 6. The amount of reagent used depends on the degree of contamination

Зависимость построена исключительно на полученных фактических данных, поэтому наблюдается широкий разброс точек линейной возрастающей регрессии.

На рисунке 7 представлена диаграмма, показывающая расход реагента на различных участках зоны проведения работ по очистке.



Рисунок 7. Расход реагента для очистки центральной зоны оросителя
Figure 7. Reagent consumption for cleaning the central area of the sprinkler

По данным диаграммы видно, что более загрязненным участкам № 25, 27–29, 34–35, 37–41, 45–47 соответствует больший расход реагента. Максимальный расход реагента составил 28,5 т на участке № 47.

Отходы, образующиеся после взаимодействия моющего реагента с отложениями на оросительном устройстве, относятся к IV классу опасности (малоопасные отходы), представляющие собой нейтрализованные водные среды, содержащие соли кальция: гидрокарбонаты, фосфонаты, хлориды и сульфаты. Отработанные после промывки водные среды размещались на карте шламоотвала, оборудованного искусственным водонепроницаемым и химически стойким покрытием, что исключает контакт с окружающей средой. Таким образом, негативное влияние отходов отсутствует независимо от времени нахождения на шламоотвале (твердая фаза после испарения воды изолирована от контакта с почвой).

Результаты очистки оросителя представлены в виде диаграммы на рисунке 8 с информацией о массе слоев оросителя до и после очистки, а также эффективности проведения процесса. В среднем эффективность очистки оросителя составила 72%,

критерий очистки по весу достигнут и составляет 54 кг/м^3 . При этом надо учитывать и тот факт, что порядка 80% очищаемого оросителя имела критерий загрязнения его замены.

Загрязненность оросителя влияет на эффективность очистки, которая находится в диапазоне 60–80%. Зависимость эффективности очистки оросителя от его массы представлена на рисунке 9.

Зависимость эффективности очистки от веса загрязненного оросителя описывается линейной убывающей регрессией и определяется по разнице веса до и после отмывки отдельных участков оросителя по формуле (1):

$$\text{Эффективность, \%} = \left(\frac{\text{Вес}_{\text{после отм.}}}{\text{Вес}_{\text{до отм.}}} \right) * 100 \quad (1)$$

Разброс точек на графике зависимости достаточно широк из-за усредненных фактических данных по весу загрязненного и очищенного оросителя, включая вес ПВХ-каркаса. Следует отметить, что участки с сильной загрязненностью (до 200 кг) претерпели высокую степень очистки с эффективностью на уровне 75–80%.



Рисунок 8. Диаграмма с оценкой эффективности очистки
Figure 8. A diagram with an assessment of cleaning efficiency

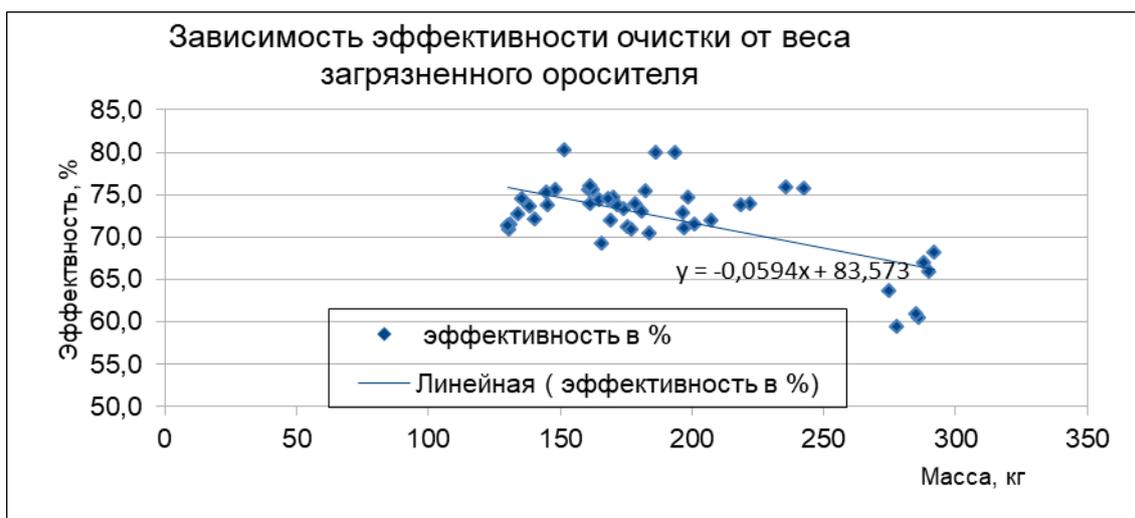


Рисунок 9. Зависимость эффективности очистки от массы загрязненного оросителя
Figure 9. Dependence of the cleaning efficiency on the mass of the polluted sprinkler

Эффективность очистки оросительного устройства подтверждена результатами применения технологии гидрохимической очистки средством «Антиржавин» на отдельном сегменте оросителя в ППР-2023 и оросителе центральной зоны градири в ППР-2025.

Для непрерывного мониторинга за динамикой изменения веса влажного оросителя произведен монтаж автоматизированной системы взвешивания в центральной и периферийной зонах орошения градири. Фиксация результатов, превышающих установ-

ленные критерии очистки и замены, необходима для планирования соответствующих мероприятий по очистке или замене оросителей в ближайший ППР.

Представленный уникальный способ реагентной очистки оросителя не требует демонтажа и последующей установки элементов оросителя, исключает механические повреждения, связанные с монтажными работами. По трудоемкости значительно ниже процесса замены оросителя, эффективен при условии соблюдения требований безопасности и защиты бетонных конструкций, может

применяться в качестве альтернативной меры другим (механическим) способам очистки и замене дорогостоящего оросителя БИГ в условиях сжатых сроков ППР.

Гидрохимический метод очистки оросителя позволяет выполнить работы по восстановлению безопасной и эффективной эксплуатации градирни в короткие сроки. Работы по замене оросителя по материальным затратам примерно сопоставимы с хи-

мической очисткой, но не могут конкурировать с представленным методом по срокам выполнения работ и трудозатратам (человеко-часы).

Таким образом, на НВАЭС опробованы пять способов очистки оросителя градирни. Полученные результаты приведены в таблице 1. Преимущества реагентного (гидрохимического) метода очевидны.

Таблица 1. Способы очистки оросителя градирни и результаты их применения на испытуемых образцах НВАЭС

Table 1. Methods of cleaning the cooling tower sprinkler and the results of their application on the tested samples of NVNPP

Метод	Эффективность	Преимущества	Недостатки
1. Вибрационного воздействия	30%	Безопасность для бетонных конструкций градирни	1. Большие трудозатраты 2. Частичное повреждение оросителя при демонтаже - монтаже. 3. Низкая эффективность 4. Выполняется на неработающей градирне
2. Криогенный бластинг	13%		1. Требуется разбор оросителя из-за неполного прохождения струи воздуха по высоте оросителя 2. Низкая эффективность
3. Гидромеханическая очистка	60%	1. Безопасность для бетонных конструкций градирни 2. Возможность производить очистку на работающей градирне	Отсутствует возможность очищать ороситель центральной зоны при работе на мощности
4. Пневмоимпульсный	50%	3. Демонтаж не требуется	Недостаточная эффективность
5. Гидрохимический	Более 70%	1. Демонтаж не требуется 2. Высокая эффективность 3. Возможность обработки труднодоступных зон 4. Укладывается в сроки ППР 5. Короткий срок окупаемости	1. Влияние на бетон. Требуется дополнительные мероприятия по защите бетона 2. Выполняется на неработающей градирне

Экономическая эффективность

Экономическая целесообразность выражается в снижении потерь выработки электроэнергии и определяется глубиной охлаждения градирни (температурой охлаждающей воды до и после ремонта). Приведение технического состояния градирни к фактическим номограммам ее охлаждающей способности – это основная цель ремонта, что в конечном итоге обеспечивает безопасную и экономичную работу [7].

В жаркий период года потери выработки электроэнергии на 1°C циркуляционной воды составляют 8–10 МВт. Температура

охлаждающей воды напрямую связана с КПД-циклом, следовательно, влияет на экономию топлива [8]. В результате проведения комплекса выполненных работ охлаждающая способность градирни после ремонта улучшилась, как минимум, на 4°C. При этом снижение потерь выработки (экономический эффект) составит 234 тыс. рублей/час (5,6 млн. рублей/сутки, 168 млн. рублей/месяц). Таким образом, срок окупаемости реагентного метода очистки оросителя не более 1,5 месяца.

Выполнение регулярной очистки оросителя при достижении установленных крите-

риев (80 кг/м^3) позволит снизить материальные затраты и значительно продлить срок его эксплуатации до замены. Примененный реагентный метод обеспечит соблюдение установленных сроков ППР, снизив риски задержки пуска энергоблока после ремонта.

Полнота мероприятий по организации ремонта и определение адекватного объема

ремонтных работ, выбор технологии очистки оросителя и обеспечение оптимального ВХР являются гарантией поддержания фактической, определенной балансовыми испытаниями охлаждающей способности градирни, и выработки электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Карандеева Н.В., Кузнецова Е.Г. Выбор оптимального водно-химического режима систем охлаждения АЭС с учетом природных свойств исходной воды. Расчет индексов стабильности исходной воды для АЭС при оценке склонности к накипеобразованию и коррозии. *Молодой ученый*. 2025;19(570):41–45. EDN DMRAXE. Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/570/124811/> (дата обращения: 16.06.2025).

Karandeeva N.V., Kuznetsova E.G. Selection of the optimal water chemistry mode of NPP cooling systems taking into account the natural properties of the source water. Calculation of stability indices of source water for NPPs when assessing the tendency to scale formation and corrosion. *Young scientist*. 2025;19 (570):41–45. (in Russ). EDN DMRAXE. Available at: <https://moluch.ru/archive/570/124811/> (accessed: 16.06.2025). EDN DMRAXE.

2. Галанин А.В., Карандеева Н.В., Васильева С.Ю. Применение ингибиторов для предотвращения солеотложений в системах охлаждения АЭС. Выбор оптимального водно-химического режима с помощью установки моделирования. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2025;(1):96–112. EDN LOLZNP. <https://doi.org/10.26583/npe.2025.1.07>

Galanin A.V., Karandeeva N.V., Vasilyeva S.Y. Use of inhibitors to prevent oxidation in cooling systems of Nuclear power plants. Selection of the optimal water chemistry regime using a model unit. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;(1):96–112. (in Russ). EDN LOLZNP. <https://doi.org/10.26583/npe.2025.1.07>

3. Галанин А.В., Галанин А.В., Воробьев С.А., Карандеева Н.В. Проблемные вопросы ведения водно-химического режима системы основной охлаждающей воды на энергоблоках ВВЭР-1200. 55 лет безопасной эксплуатации АЭС с ВВЭР в России и за рубежом: Сборник докладов Международной научно-практической конференции, Воронеж, Нововоронежская АЭС, 23–27 сентября 2019 года. Воронеж: Научная книга, 2019. С. 201–206. EDN JYWOSW. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42505943&pff=1> (дата обращения: 16.06.2025).

Galanin A.V., Galanin A.V., Vorobyov S.A., Karandeeva N.V. Problematic issues of maintaining the water chemistry regime of the main cooling water system at WVER-1200 power units. 55 years of safe operation of NPPs with WVER in Russia and abroad: Collection of reports of the International scientific and practical conference, Voronezh, Novovoronezh NPP, September 23-27, 2019. Voronezh: Nauchnaya kniga, 2019. P. 201–206. (in Russ). EDN JYWOSW. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42505943&pff=1> (accessed 16.06.2025).

4. Галанин А.В., Воробьев С.А., Карандеева Н.В. Исследование ингибиторов солеотложений для ведения водно-химического режима системы основной охлаждающей воды с башенными испарительными градирнями. *Ядерная и радиационная безопасность*. 2019;(S1):80–84. EDN MZFQMY. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_42880984_35608804.pdf (дата обращения: 16.06.2025).

Galanin A.V., Vorobev S.A., Karandeeva N.V. Investigation of scale inhibitors for a water-chemical mode of the main cooling water system with evaporative cooling towers. 2019;(S1):80–84. (in Russ). EDN MZFQMY. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_42880984_35608804.pdf (accessed: 16.06.2025).

5. Поваров В.П., Витковский С.Л., Гончаров И.А., Галанин А.В. [и др.]. Химическая очистка теплообменного оборудования препаратом Biorenex. *Энергетик*. 2015;14–15. EDN TWVZBV. Режим доступа: <http://www.energetik.energy-journals.ru/index.php/EN/article/view/328> (дата обращения: 16.06.2025).

Povarov V. P., Vitkovsky S. L., Goncharov I. A., Galanin A.V. [et al.]. Chemical cleaning of heat exchange equipment with Biorenex preparation. (in Russ). Available at: <http://www.energetik.energy-journals.ru/index.php/EN/article/view/328> (accessed: 16.06.2025).

6. Нифталиев С.И., Клоков Г.В., Кузнецова Е.Г., Карандеева Н.В. Опыт применения модельной градирни для испытания эффективности ингибиторов накипеобразования и коррозии. *Безопасность ядерной энергетики*: Сборник тезисов по материалам докладов XX Международной научно-практической конференции, Волгоград, 19–20 сентября 2024 года. Волгоград: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2024. С. 41–43. EDN YA1YOO. Режим доступа: <https://openrepository.mephi.ru/server/api/core/bitstreams/97cffa0-2faf-4aad-ba7e-31c756d477ad/content> (дата обращения: 16.06.2025).

Niftaliev S.I., Klokov G.V., Kuznetsova E.G., Karandeeva N.V. The experience of using a model cooling tower to test the effectiveness of scale formation and corrosion inhibitors. *Nuclear energy safety: a collection of abstracts based on the reports of the XX International Scientific and Practical Conference, Volgograd, September 19-20, 2024*. Vol-

godonsk: National Research Nuclear University «MEPhI», 2024. P. 41–43. (in Russ). EDN YAIYOO. Available at: <https://openrepository.mephi.ru/server/api/core/bitstreams/97cfl1a0-2faf-4aad-ba7e-31c756d477ad/content> (accessed: 16.06.2025).

7. Шарифуллин В.Н., Бадриев А.И. Аэродинамические характеристики башенной градирни в условиях неравномерности распределения потоков воды и воздуха. Теплоэнергетика. 2019;(8):46–52. EDN ASVBWS. <https://doi.org/10.1134/S0040363619080083> (accessed: 16.06.2025).

Sharifullina V.N., Badriev A.I. Aerodynamic characteristics of the cooling tower under the nonuniform distribution of the water and air flows. Thermal Engineering. 2019;(8):46–52. (in Russ). EDN ASVBWS. <https://doi.org/10.1134/S0040363619080083>

8. Татарникова Н.А., Такташев Р.Н., Ондар А.Б. [и др.] Повышение энергоэффективности работы систем охлаждения ТЭС с башенными испарительными градирнями. Энергосбережение – теория и практика : Труды Одиннадцатой Всероссийской конференции с Международным участием, Москва, 10–14 октября 2022 года. Москва: Радуга, 2022. С. 26–29. EDN XCLTHZ. Режим доступа: <https://elibrary.ru/xclthz?ysclid=mfkvuu5jeo886824865> (дата обращения: 16.06.2025).

Tatarnikova N.A., Taktashev R.N., Ondar A.B. [et al.] Improving the energy efficiency of thermal power plant cooling systems with Tower Evaporative Cooling towers. energy saving – Theory and Practice: Proceedings of the Eleventh All-Russian Conference with International Participation, Moscow, October 10–14, 2022. Moscow: Raduga, 2022, pp. 26–29. (in Russ). EDN XCLTHZ. Available at: <https://elibrary.ru/xclthz?ysclid=mfkvuu5jeo886824865> (accessed: 16.06.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Поваров В.П. – формулировка и развитие ключевых целей и задач повышения эффективности работы башенной испарительной градирни, принятие ответственности за все аспекты работы;

Бакулин В.В. – идея проведения исследований методов очистки градирни, планирование и организация работ, сбор, систематизация, анализ данных, обобщение результатов, проведение сравнительного анализа эффективности различных методов очистки, формулировка выводов;

Карандеева Н.В. – химический контроль процесса очистки оросителя, анализ отложений и реагентов, интерпретация результатов исследования, написание и редактирование текста статьи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Владимир Петрович Поваров, доктор технических наук, директор НВАЭС, Нововоронеж, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-9092-9160>

e-mail: PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Владимир Викторович Бакулин, ведущий инженер по эксплуатации гидротехнических сооружений ТЦ-6 Нововоронеж, Российская Федерация.

e-mail: BakulinVV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Наталья Владимировна Карандеева, ведущий инженер по эксплуатации оборудования ХЦ, Нововоронеж, Российская Федерация.

e-mail: KarandeevaNV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Povarov V.P. – formulation and development of key purposes and objectives to improve the efficiency of the evaporative cooling tower taking responsibility for all aspects of the work;

Bakulin V.V. – the idea of conducting researches on cooling tower cleaning methods, planning and organization of works, collection, systematization, data analysis, generalization of results, comparative analysis of the effectiveness of various cleaning methods, formulation of conclusions;

Karandeeva N.V. – chemical monitoring of the cleaning process, sediment and reagent analysis, interpretation of research results, writing and editing the text of the article.

FUNDING:

The work is carried out without using external sources of financing

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Vladimir P. Povarov, Dr. Sci. (Engin.), Head of NVNPP, Novovoronezh, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-9092-9160>

e-mail: PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Vladimir V. Bakulin, Senior engineer of hydraulic structure operation of power unit №6 turbine department, Novovoronezh, Russian Federation.

e-mail: BakulinVV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Natalya V. Karandeeva, Senior engineer of chemical department equipment operation, Novovoronezh, Russian Federation.

e-mail: KarandeevaNV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Поступила в редакцию / Received 15.05.2025

После доработки / Revision 24.07.2025

Принята к публикации / Accepted 29.07.2025