
ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.039-78

**МЕТОДЫ БОРЬБЫ С КАРБОНАТНЫМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ НА
ТЕПЛООБМЕННОМ ОБОРУДОВАНИИ В АТОМНОЙ
ЭНЕРГЕТИКЕ**

© 2020 М.Н. Галанова, Е.Р. Бартель, Н.В. Богуш

*Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция», Волгодонск,
Ростовская обл., Россия*

Всё теплообменное оборудование атомных станций подвержено карбонатным отложениям, а особенно сильно то, в котором циркулирует вода из пруда-охладителя. Появление загрязнений на поверхности теплообмена приводит к различным последствиям от небольшого ухудшения теплопередачи до преждевременного износа оборудования. Увеличение толщины загрязнений в теплообменниках на атомных станциях приводит и к потерям электрической мощности, а это уже прямые экономические убытки. Вследствие чего проблема борьбы с карбонатными отложениями является очень актуальной и не имеющей универсального решения в настоящее время. В работе показано, как за один месяц ухудшается теплообмен, если не предпринимать никаких мер. При этом существующие методы очистки не дают 100% результата и имеют свои недостатки. Данная работа освещает используемые методы очистки отложений, рассматривает способы по увеличению их эффективности, и представляет новые идеи, не использованные ранее на атомных станциях (в том числе и на Ростовской АЭС). В их число входит увеличение эффективности системы шарикоочистки, уменьшение солесодержания водоёма-охладителя, ультразвуковая очистка, и последнее это намагничивание воды. Достоинствами их перед имеющимися, является то, что очистка проводится во время работы, нет больших отходов для утилизации, нет вероятности повреждения трубок, и они выполнимы силами персонала атомной станции, а это меньше затрат по времени и финансам. Предлагаемые пути совершенно разные, но работают на одну конечную цель, то есть на снижение загрязнений, уменьшение недовыработки электроэнергии и исключение упущенной прибыли.

Ключевые слова: карбонатные отложения, теплообменная поверхность, недовыработка, инжектор, система шарикоочистки, система газоохлаждения турбогенератора, ультразвуковая очистка, намагничивание воды, атомная электростанция.

Поступила в редакцию 03.04.2020
После доработки 26.08.2020
Принята к печати 01.09.2020

Наличие карбонатных отложений на теплообменном оборудовании обуславливает ухудшение теплопередачи, локальные перегревы металла, износ оборудования вследствие невозможности уменьшения температуры до нормируемых пределов, в итоге, требуется снижение нагрузки или вовсе отключение оборудования, что, в свою очередь, увеличивает потери электрической мощности и экономические убытки. По этой причине проблема борьбы с карбонатными отложениями очень актуально во всём мире.

Карбонатным отложениям подвержено оборудование, в котором циркулирует вода из пруда-охладителя (которая очищается только от механических загрязнений на сетках грубой очистки, вращающихся сетках, механическом фильтре): конденсаторы турбин, конденсаторы ТПН, система газоохлаждения турбогенераторов, маслоохладители системы смазки турбины, трансформаторов, системы уплотнения

вала генератора, охладители вентустановки токопроводов, система охлаждения электродвигателя ГЦН и др.

Примеры карбонатных отложений, изъятых из теплообменников Ростовской АЭС, приведены на рисунках 1-2.



Рисунок 1 – Карбонатные отложения из конденсатора 13Б энергоблока №2, извлечённые во время ППР-2020 [Carbonate deposits from condenser 13B of power unit 2 recovered during PPM-2020]



Рисунок 2 – Карбонаты (ППР-2020) из трубопровода, соединяющего конденсаторы энергоблока №2 и эжекторы циркуляционной системы [Carbonates (PPM-2020) from the pipeline connecting the condensers of power unit No. 2 and the ejectors of the circulation system]

Проиллюстрируем потери электрической мощности на примере системы газоохлаждения турбогенератора. Система газоохлаждения турбогенератора включает в себя теплообменники, в которых водород охлаждается дистиллятом, а последний охлаждается циркуляционной водой пруда. Недоохлаждение дистиллята приведёт к повышению температуры холодного газа (водорода), который охлаждает обмотку и вал ротора, сердечник статора. В связи с таким развитием событий должна быть снижена электрическая мощность генератора согласно таблице 1 [1, 2], чтобы не допустить перегрев оборудования. При невозможности снизить температуру водорода до 55⁰С в течение 5 минут, необходимо останавливать турбоагрегат.

Таблица 1 – Зависимость допустимой электрической мощности от температуры холодного газа [Dependence of the permissible electrical power on the cold gas temperature]

Температура холодного газа, ⁰ С	40	45	50	55
Допустимая активная мощность, в % от номинальной/ МВт	100/ 1000	92,5/ 922	82,5/ 823	67,5/ 675

Используя математическую интерполяцию для данного ряда данных, можно рассчитать, сколько принесёт экономических убытков отклонение температуры

холодного газа на 1°C в заданном диапазоне, зная стоимость 1 МВт. И это значительные числа, поэтому так важно поддерживать оборудование в исходно-чистом состоянии.

Посмотрим, как ухудшается теплообмен из-за роста отложений на теплообменнике ОГЦ за месяц наблюдений. Для этого выберем за время (29.01.2020-21.02.2020) замеров температур такой период, когда температура на входе в теплообменник была одинаковая (выбираем 8°C) и определим изменение коэффициента теплопередачи, используя уравнения (1) и (2) теплового баланса и теплопередачи [3, 4]:

$$\begin{cases} Q = G \times c_p \times \Delta t, \\ Q = k \times F \times \delta t, \end{cases} \quad \begin{matrix} (1) \\ (2) \end{matrix}$$

где F – площадь поверхности теплообмена, равная 663 м^2 ;

G – массовый расход, кг/с;

c_p – удельная теплоёмкость среды, Дж/кг $\times^{\circ}\text{C}$;

Δt – разница температур среды, $^{\circ}\text{C}$;

Q – тепловой поток, Вт;

k – коэффициент теплопередачи, Вт/м $^2 \times \text{K}$;

δt – температурный напор, $^{\circ}\text{C}$.

Итого, примерно за месяц коэффициент теплопередачи уменьшился на $89,3 \text{ Вт/м}^2 \times \text{K}$ (с $811,9 \text{ Вт/м}^2 \times \text{K}$ до $722,6 \text{ Вт/м}^2 \times \text{K}$), а количество передаваемого тепла уменьшилось на $0,1 \text{ МВт}$ (с $6,7 \text{ МВт}$ до $6,6 \text{ МВт}$). Данные расчёты показывают, как необходимо не просто производить чистку отложений, а осуществлять непрерывный процесс по предотвращению загрязнений.

В настоящее время, применяющиеся методы борьбы с карбонатами недостаточно эффективны, так как не обеспечивают полное удаление и предотвращение последующего возникновения отложений. Самые распространённые методы очистки на атомных станциях сведены в таблице 2 [5, 6] с выделением их слабых сторон.

Таблица 2 – Существующие методы борьбы с отложениями на атомных станциях [Existing methods of dealing with deposits at nuclear power plants]

Метод	Недостатки метода
Химическая отмычка	-дорогостоящие реагенты; -утилизация отходов; -применение только на остановленном оборудовании
Система шарикоочистки	-небольшой срок службы шариков (400-500 часов); -проверка износа шариков калибровочным устройством; -возможность повреждения трубок корундовыми шариками*; -возможно проблемы с циркуляцией шариков; -использование только оригинальных шариков
Механический	-применение только в ППР; -возможность повреждения трубок*
Термический	-применение только в ППР; -возможность повреждения трубок в процессе деформаций*

* Для справки: толщина трубок конденсатора $\approx 0,5 \div 0,7 \text{ мм}$

Из указанных используемых методов, можно отметить, что система шарикоочистки применяется повсеместно в разных технологических системах. Это отдельная система, которая врежется в тракт охлаждающей воды перед (подаются эластичные шарики) и после теплообменника (улавливаются шарики специальной сеткой и поддаются в напорный патрубок, замыкая круг циркуляции). В ней используются пористые резиновые шарики, диаметр которых больше диаметра трубки на $1 \div 2 \text{ мм}$ [7].

Одно из предложений этой работы состоит в повышении эффективности работы системы шарикоочистки путём увеличения циркуляции шариков. Это можно достигнуть изменением гидравлического сопротивления в трубках с помощью приведения арматуры в такое положение, которое обеспечивает перепад давления в трубках по паспорту, и добавление в схему работы водоструйного инжектора [8, 9, 10]. Опробование этого способа будет осуществлено на одном теплообменнике системы газоохлаждения турбогенератора после подписания технического решения.

Второй способ уменьшения карбонатов на поверхности теплообмена состоит в уменьшении солесодержания пруда-охладителя. Если уменьшить концентрацию соли в циркулирующей воде [11], то аналогично уменьшится величина отложений на оборудовании. Чтобы осуществить этот способ, разработаны специальные мероприятия [12] по подпитке-продувке водоёма-охладителя по расчётам уменьшения солесодержания в час.

Для удаления загрязнений и защиты теплообменников во время работы от карбонатных отложений также предлагается использование ультразвуковой очистки. Такая установка состоит из втулок для крепления преобразователя на трубной доске, акустических преобразователей (излучатели звука) и ультразвукового генератора.

Излучатели соединены кабелем с ультразвуковым генератором и непрерывно получают от него электрические импульсы с несущей ультразвуковой частотой от 20 до 40 кГц. Этот электрический сигнал преобразуется магнитострикционным сердечником в механические колебания той же частоты. А поскольку излучатель приварен к защищаемому агрегату, ультразвуковые колебания возбуждаются во всей конструкции теплообменника и распространяются как по всей теплообменной поверхности, так и переизлучаются в воду от поверхности. Таким образом, создаются в металле и воде непрерывные микроколебания с амплитудой в несколько микрон, которые безопасны для сварки и вальцовки, но разрушительны для карбонатных и других отложений, вследствие того, что металлическая трубка эластична, поэтому хорошо переносит колебания при небольшой деформации, в отличие от карбонатных отложений, в которых образуются трещины с последующим их разрушением.

На Ростовской АЭС этот метод впервые проходит апробацию на пилотном энергоблоке на теплообменнике ОГЦ системы газоохлаждения турбогенератора, на других атомных станциях нет опыта его применения. До установки (виден сплошной карбонатный налёт) и после месяца работы ультразвуковой очистки (исчез сплошной налёт, имеются небольшие участки отложений, входные камеры трубок не забиты) производили визуальный осмотр, который представлен на рисунке 3. На данный момент введутся наблюдения, снимаются значения параметров, рассчитывается результативность работы по сравнению с другими теплообменниками, но полный эффект будет оценен через полгода работы, то есть в конце июня 2020 года.

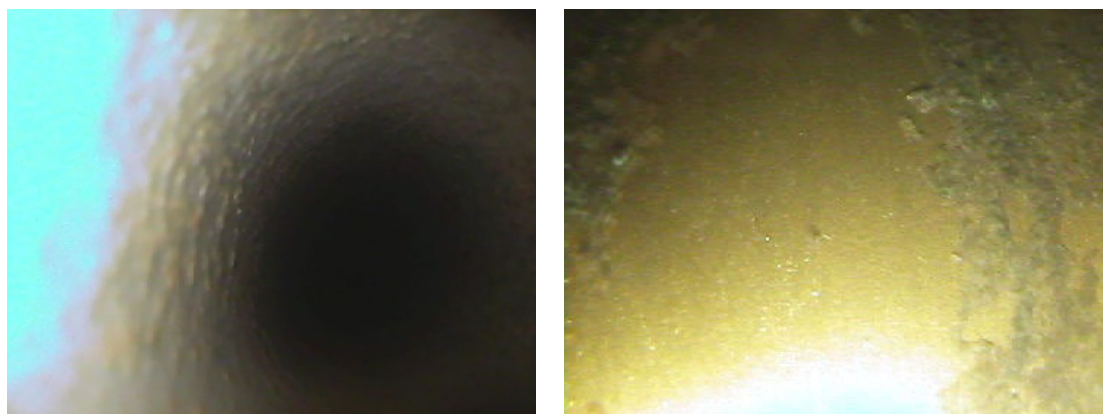


Рисунок 3 – Осмотр теплообменника соответственно до установки УЗО и после месяца работы
[Inspection of the heat exchanger, respectively, before ultrasonic cleaning and after a month of operation]

В перспективе для поддержания внутренних поверхностей нагрева теплообменного оборудования в безнакипном состоянии предлагается использование намагничивания воды. Суть состоит в том, что воду пропускают через межполюсное пространство электромагнитного аппарата и при наличии в примесях воды перенасыщения ферромагнетиками (наночастицы магнетита, гематита или др. материала, содержащего железо) образуются зародыши центров кристаллизации. Под действием магнитного поля, на воду снижаются карбонатные отложения на трубках, вследствие того, что происходит коагуляция ферромагнетиков (слипание мелких частиц в более крупные) за счёт процессов ориентации, приобретая при этом функцию центров кристаллизации, на которых откладывается карбонат кальция, следовательно, выделение нерастворимых солей жесткости происходит не на теплопередающей поверхности, а в объёме воды. Но магнитные свойства такой воды слабы, и теряются примерно через сутки. Поэтому этот метод предполагает создание рециркуляционных систем, куда будет непрерывно направляться не менее 10% циркулирующей воды для подмагничивания. И также этот метод требует создание перенасыщенного раствора (в насыщенном растворе растворённое вещество достигло при данных условиях максимальной концентрации и больше не растворяется) ферромагнетиками, что тоже является не легкой задачей [13]. Данная идея не применяется нигде в промышленности и находится пока на стадии разработки и опытов.

Подводя итог, необходимо отметить, что не существует решения, которое полностью удалит карбонатные отложения и исключит возможность их появления на поверхности теплообмена, но в данной работе приведены эффективные пути решения по уменьшению накипи на теплообменном оборудовании Ростовской АЭС. Это реальные методы по снижению потерь энерговыработки, которые можно осуществить силами персонала атомной станции, в этом и преимущества предложений, что не требуется много времени и финансов на заключение внешних договоров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ИЭ.3.GT.26.03 Инструкция по эксплуатации системы газоохлаждения турбогенератора. Внутренний документ Ростовской АЭС.
2. Министерство РФ по атомной энергии. Концерн «Росэнергоатом». Балаковская атомная станция. Служба подготовки персонала. Системы турбинного отделения. Часть 1. – Москва, 2000 г. – 374 с.
3. Справочник по теплогидравлическим расчётам в ядерной энергетике. Т. 2 : Ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы / П. Л. Кириллов [и др.]. – Москва : ИздАт, 2013. – 685 с.
4. Справочник по теплогидравлическим расчётам в ядерной энергетике. Т. 3 : Теплогидравлические процессы при переходных и нестандартных режимах. Тяжелые аварии. Защитная оболочка. Коды, их возможности, неопределенности. - 2014. - 686 с.
5. СТО 1.1.1.01.999.0466-2018 Основные правила обеспечения охраны окружающей среды на атомных станциях. Внутренний документ Ростовской АЭС.
6. РД 34.22.501-87 Методические указания по предотвращению образования минеральных и органических отложений в конденсаторах турбин и их очистке. Внутренний документ Ростовской АЭС.
7. РД 34.30.403-93 Методические указания по наладке и эксплуатации систем шариковой очистки конденсаторов паровых турбин. Внутренний документ Ростовской АЭС.
8. Кулак, А.П. Приближенный расчёт струйных насосов / А. П. Кулак, А. Б. Шестозуб, В. И. Коробов // Прикладная гидромеханика. – 2011. – Том 13. – № 1. – С. 29-34. – URL : <https://docplayer.ru/41985988-Priblizhenny-raschet-struynyh-nasosov.html> magniya (дата обращения: 01.01.2020).
9. Сазонов, Ю. А. Расчёт и конструирование струйных аппаратов / Ю. А. Сазонов. – Москва : РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2016. – 64 с.
10. Соколов, Е. Я. Струйные аппараты / Е. Я. Соколов, Н. М. Зингер. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.

11. *Кекин, П. А.* Кристаллизация карбонатов кальция в технологических водных системах: автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук / П. А. Кекин. – Москва, 2018. – 18 с. – URL : <https://www.dissercat.com/content/kristallizatsiya-karbonata-kaltsiya-v-tehnologicheskikh-vodnykh-sistemakh/read> (дата обращения: 02.02.2020).
12. СТО 1.1.1.01.0678-2015 Основные правила обеспечения эксплуатации атомных станций. Внутренний документ Ростовской АЭС.
13. *Горбань, Я. Ю.* Методы удаления из воды солей кальция и магния / Я. Ю. Горбань, Т. Г. Черкасова, А. В. Неведров // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. – № 2. – С. 126-134. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-udaleniya-iz-vody-soley-kaltsiya-i-magniya> (дата обращения: 01.01.2020).

REFERENCES

- [1] IE.3.GT.26.03 Instruksiya po ekspluatatsii sistemy gazookhlazhdeniya turbogeneratorsa. Vnutrenniy dokument Rostovskoy AES [Operating Instructions for the Gas Cooling System of the Turbo Generator. Internal document of Rostov NPP] (in Russian).
- [2] Ministerstvo RF po atomnoy energii. Kontsern «Rosenergoatom». Balakovskaya atomnaya stantsiya. Sluzhba podgotovki personala. Sistemy turbinnoy otdeleniya. Chast' 1 [RF Ministry for Atomic Energy. Rosenergoatom Concern. Balakovo Nuclear Power Plant. Staff Training Service. Turbine Room Systems. Part 1]. Moskva [Moscow]. 2000. 374 p. (in Russian).
- [3] P. L. Kirillov [it ol.]. Spravochnik po teplogidravlicheskim raschotam v yadernoy energetike. T. 2: Yadernyye reaktory, teploobmenniki, parogeneratory [Handbook of Thermohydraulic Calculations in Nuclear Power. Nuclear Reactors, Heat Exchangers, Steam Generators]. Moskva: IzdAt [Moscow: Publishing House IzdAt]. 2013. 685 p. (in Russian).
- [4] Spravochnik po teplogidravlicheskim raschotam v yadernoy energetike. T. 3: Teplogidravlicheskiye protsessy pri perekhodnykh i nestandartnykh rezhimakh. Tyazhelyye avarii. Zashchitnaya obolochka. Kody, ikh vozmozhnosti, neopredelennosti [Handbook of Thermohydraulic Calculations in Nuclear Power. Vol. 3: Thermal-Hydraulic Processes in Transient and Non-Standard Modes. Severe Accidents. Protective Shell. Codes, Their Capabilities, Uncertainties]. 2014. 686 p. (in Russian).
- [5] СТО 1.1.1.01.999.0466-2018 Osnovnyye pravila obespecheniya okhrany okruzhayushchey sredy na atomnykh stantsiyakh. Vnutrenniy dokument Rostovskoy AES [Basic Rules for Ensuring Environmental Protection at Nuclear Power Plants. Internal document of Rostov NPP] (in Russian).
- [6] RD 34.22.501-87 Metodicheskiye ukazaniya po predotvrashcheniyu obrazovaniya mineral'nykh i organicheskikh otlozheniy v kondensatorakh turbin i ikh ochistke. Vnutrenniy dokument Rostovskoy AES [Guidelines for the Prevention of the Formation of Mineral and Organic Deposits in Turbine Condensers and Their Cleaning. Internal document of Rostov NPP] (in Russian).
- [7] RD 34.30.403-93 Metodicheskiye ukazaniya po naladke i ekspluatatsii sistem sharikovoy ochistki kondensatorov parovykh turbin. Vnutrenniy dokument Rostovskoy AES [Guidelines for the Adjustment and Operation of Ball Cleaning Systems for Steam Turbine Condensers. Internal document of Rostov NPP] (in Russian).
- [8] Kulak A.P., Shestozub A.B., Korobov V.I. Priblizhennyy raschet struynykh nasosov [Approximate Calculation of Jet Pumps]. Prikladnaya gidromekhanika [Applied Hydromechanics]. 2011. Vol. 13. № 1. P. 29-34. URL: <https://docplayer.ru/41985988-Priblizhennyy-raschet-struynyh-nasosov.html> magniya (reference date: 01.01.2020) (in Russian).
- [9] Sazonov Y.A. Raschet i konstruirovaniye struynykh apparatov [Calculation and Design of Jet Devices]. Moskva: RGU nefti i gaza imeni I.M. Gubkina [Moscow: I.M. Gubkin Russian State University of Oil and Gas], 2016. 64 p. (in Russian).
- [10] Sokolov E.Y., Zinger N.M. Struynnye apparaty [Inkjet Devices]. Moskva: Energoatomizda [Moscow: Energoatomizdat]. 1989. 352 p. (in Russian).
- [11] Kekin P.A. Kristallizatsiya karbonatov kal'tsiya v tekhnologicheskikh vodnykh sistemakh: avtoreferat na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Crystallization of Calcium Carbonates in Technological Water Systems Abstract for the Degree of Candidate of Technical Sciences]. Moskva [Moscow]. 2018. 18 p. URL: <https://www.dissercat.com/content/kristallizatsiya-karbonata-kaltsiya-v-tekhnologicheskikh-vodnykh-sistemakh/read> (reference date: 02.02.2020) (in Russian).
- [12] СТО 1.1.1.01.0678-2015 Osnovnyye pravila obespecheniya ekspluatatsii atomnykh stantsiy. Vnutrenniy dokument Rostovskoy AES [Basic Rules for Ensuring the Operation of Nuclear Power Plants. Internal document of Rostov NPP] (in Russian).
- [13] Gorban Y.Y., Cherkasova T.G., Nevedrov A.V. Metody udaleniya iz vody soley kal'tsiya i magniya [Methods of Removing Calcium and Magnesium Salts from Water]. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Kuzbass State Technical University].

2016. № 2. P. 126-134. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-udaleniya-iz-vody-soley-kaltsiya-i-magniya> (reference date: 01.01.2020) (in Russian).

Methods for Controlling Carbonate Deposits on Heat Exchange Equipment in Nuclear Power Industry

M.N. Galanova¹, E.R. Bartel², N.V. Bogush³

Rostov nuclear power plant, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360

¹*ORCID iD: 0000-0003-3064-2883*

e-mail: mashoolka@yandex.ru

²*e-mail: mr.bartel@yandex.ru*

³*e-mail: bogush-nv@vdpnp.rosenergoatom.ru*

Abstract – All heat exchange equipment of nuclear power plants is subject to carbonate deposits, and especially strongly the one in which water circulates from the cooling pond. The appearance of contamination on the surface of the heat exchange leads to various consequences from a slight deterioration of heat transfer to premature wear of equipment. Increasing the thickness of contamination in heat exchangers at nuclear power plants also leads to losses of electrical power, and this is a direct economic loss. As a result, the problem of controlling carbonate deposits is very urgent and does not have a universal solution at present. The paper shows how heat exchange worsens in one month if no measures are taken. However, existing cleaning methods do not give 100% results and have their own disadvantages. This paper highlights the methods used for cleaning deposits, considers ways to increase their efficiency, and presents new ideas that were not previously used at nuclear power plants (including the Rostov NPP). These include increasing the efficiency of the ball cleaning system, reducing the salt content of the cooling reservoir, ultrasonic cleaning, and last of all, water magnetization. Their advantages over the existing ones are that cleaning is carried out during operation, there is no large waste for disposal, there is no probability of damage to the tubes, and they can be performed by the personnel of the nuclear power plant, which is less time and financial costs. The proposed ways are completely different, but they work for the same end goal, that is, to reduce pollution, reduce energy underutilization and eliminate lost profits.

Keywords: carbonate deposits, heat exchange surface, undertreatment, injector, ball cleaning system, turbo generator gas cooling system, ultrasonic cleaning, water magnetization, nuclear power plant.