

ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ХИМИЧЕСКИ ОБЕССОЛИВАЮЩЕЙ ВОДОПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ НА ТЭС (ОБЗОР)¹

© 2023 г. Н. Д. Чичирова^а, А. А. Филимонова^а, С. М. Власов^а, О. Е. Бабинов^а, *

^аКазанский государственный энергетический университет (КГЭУ),
Красносельская ул., д. 51, г. Казань, 420066 Россия

*e-mail: Olegsey1998@yandex.ru

Поступила в редакцию 31.01.2023 г.

После доработки 01.03.2023 г.

Принята к публикации 30.03.2023 г.

На тепловых электрических станциях установки, контактирующие с водным теплоносителем, подвергаются биологическому загрязнению. Это обусловлено рядом факторов: поддержанием благоприятных температурных режимов, образованием застойных зон, постоянной подачей питательных веществ, наличием больших площадей поверхностей оборудования (трубопроводы, резервуары для хранения воды, трубная поверхность конденсатора), присутствием различных материалов (ионообменные смолы, мембраны), изменением климатических условий. Борьба с образованием таких загрязнений теплоэнергетического оборудования на сегодняшний день весьма актуальна, хотя практически на всех ТЭС проводится тщательная подготовка добавочной и питательной воды. Следует отметить, что контроль концентрации органических примесей в жидкой и паровой фазах, а также ведение постоянного мониторинга являются довольно трудоемкими процессами. Органические отложения и наличие биопленок на технологическом оборудовании систем оборотного охлаждения (СОО), водоподготовительных установках (ВПУ), резервуарах хранения химически очищенной воды приводят к различным производственным сбоям, аварийным ситуациям и общему снижению эффективности выработки тепловой и электрической энергии. В настоящей работе выполнен обзор зарубежных и отечественных исследований, посвященных особенностям образования и развития биопленок. Рассмотрены актуальные методы обнаружения и оценки биологического загрязнения, описаны традиционные химические, физические, электрохимические, акустические, электромагнитные и иные методы борьбы с микроорганизмами и бактериями. Показано, что рост бактерий значительно усложняет процедуры очистки оборудования и ускоряет процесс накипеобразования. Для эффективного решения проблем биологических загрязнений разработку методов диагностики и контроля образования бактериальных отложений, подготовку добавочной воды и ведение водно-химического режима необходимо осуществлять дифференцированно на основе идентификации колоний микроорганизмов с помощью тест-систем. Отмечены предыдущие работы коллектива авторов, касающиеся вопросов загрязнения теплоносителя систем оборотного охлаждения и водоподготовительных установок на ТЭС Республики Татарстан в период с 2009 по 2022 г.

Ключевые слова: тепловые электрические станции, водоподготовительные установки, биологическое загрязнение, биопленка, конденсатор паровой турбины, ионообменные смолы, мембранные технологии, УФ-облучение, озонирование

DOI: 10.56304/S0040363623090023

В водном теплоносителе, используемом для различных технологических нужд на тепловых электрических станциях, в большом количестве присутствуют бактерии и микроорганизмы, которые оседают на разных поверхностях и выделяют при этом полимерные вещества, образующие биопленку. Такие поверхности принято называть подложками. Они состоят в основном из бактерий, взвешенных веществ, продуктов коррозии,

водорослей, простейших живых организмов и моллюсков. Факторы, влияющие на развитие биологических загрязнений, приведены на рисунке.

Биопленка, образованная биоценозом, весьма устойчива к внешнему воздействию, в том числе к биоцидной обработке [1]. Эффективность действия биоцида зависит от возраста биопленки, а также от ее конкретной физической и химической структуры.

В состав биопленки входят непосредственно бактериальные или микробные клетки и выделя-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-29-01300).



Факторы, влияющие на развитие биопленок

емые ими внеклеточные полимерные вещества, состоящие из белков, полисахаридов и дезоксирибонуклеиновой кислоты [2]. В естественных условиях в биопленке совместно существуют несколько видов микроорганизмов и бактерий, что обеспечивает системе физиологическую и функциональную стабильность и повышает выживаемость микроорганизмов.

Процесс формирования и развития биопленки осуществляется в несколько этапов. На первом этапе происходит прикрепление микробных клеток к различным поверхностям – адгезия. Эта стадия является обратимой, так как закрепившиеся клетки могут под воздействием определенных факторов вернуться к свободной (планктонной) форме существования.

Второй этап, называемый фиксацией, характеризуется окончательным прикреплением бактерий и микроорганизмов к поверхности. На этом этапе осуществляются необратимое прикрепление микроорганизмов и бактерий к поверхности и выделение внеклеточных полимерных веществ. Прикрепление происходит вследствие короткодействующих связей, таких как диполь-дипольные, водородные, ионные, ковалентные, а также гидрофобных взаимодействий [3].

На третьем этапе создаются микроколонии, которые затем объединяются ввиду наличия по-

лимерных веществ, и таким образом возникает биопленка, имеющая пространственную трехмерную структуру.

В работах [4–6] проанализированы адгезионные свойства микробных клеток и предложен физико-химический подход к изучению биопленок, базирующийся на концепции короткодействующего взаимодействия. Бактерии находятся в непосредственном контакте с субстратом, и свободную энергию Гиббса оценивают по межфазному натяжению. Когда бактерия достигает поверхности оборудования, начинают действовать силы взаимного притяжения и отталкивания между двумя клетками. Начальная адгезия происходит также из-за наличия электростатических сил, гидрофобного и ван-дер-ваальсова взаимодействий [7].

В 80-х годах прошлого столетия были исследованы биопленки в естественных и промышленных системах [2] и впервые было обнаружено, что входящие в состав биопленки бактерии и микроорганизмы способны проявлять устойчивость к бактерицидным и антимикробным реагентам. При этом бактерии и микроорганизмы зачастую используют биопленку в качестве защиты от меняющихся условий среды.

Авторы [8, 9] исследовали процесс образования биологических загрязнений и заложили тео-

ретическую основу для последующего их изучения. В работе [10] отмечена способность железо- и слизиобразующих бактерий создавать биопленки. С помощью динамического моделирования авторы [11] обнаружили, что вследствие биологического загрязнения теплообменных поверхностей их термическое сопротивление возрастает до 1.35×10^{-4} ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт.

В работе [12] предложена модель прогнозирования биологического загрязнения, базирующаяся на алгоритме нелинейного пространства физических состояний. Преимуществом такой модели является то, что в ней использован метод обнаружения биологических загрязнений теплообменного оборудования в переходных режимах работы.

В 1990 г. автор [13] представил метод online-обнаружения биологических загрязнений кожухотрубного теплообменника, основанный на интеллектуальной технологии мониторинга. В 2014 г. в [14] было выведено уравнение прогнозирования характеристик биологических загрязнений с использованием частичного метода наименьших квадратов. Термическое сопротивление стенки принималось в качестве выходной переменной, а температуры стенки на входе в теплообменник и на выходе из него – в качестве входных переменных. Авторы [15] разработали с помощью программных комплексов MatLab и LabView систему точного и эффективного прогнозирования биологических загрязнений теплообменника, действующую в режиме реального времени.

Бактериальная активность может приводить к возникновению коррозионных реакций на поверхностях энергетического оборудования или усиливать их [16, 17]. Коррозионные процессы, вызванные деятельностью бактерий, принято называть биоиндуцированной коррозией или биокоррозией (*microbiologically influenced corrosion – MIC*) [18]. Биокоррозия составляет примерно 10% всех видов коррозии металлов [19]. Согласно исследованиям [20], микроорганизмы и бактерии, входящие в состав биопленок, влияют на коррозию следующим образом:

поглощают кислород, что приводит к созданию анодных зон и влечет за собой образование локализованных ячеек коррозии;

вызывают деградацию защитных покрытий, наносимых на металлические поверхности;

поглощают водород в результате катодной реакции, что деполяризует катод и увеличивает скорость потери металла на аноде;

способствуют деградации химических реагентов, дозируемых в теплоноситель для защиты металлов в промышленных системах водоснабжения, – ингибиторов коррозии или антинакипинов;

побочные продукты метаболизма бактерий могут приводить к осаждению ионов металлов, таких как железо, с образованием FeS, который активизирует коррозионные процессы.

Согласно исследованиям [21], биокоррозию можно рассматривать как результат следующих процессов:

прикрепления бактерий и микроорганизмов к поверхности металла;

бактериальной и электрохимической трансформации в биопленке и на поверхности металла.

Эти процессы влияют на коррозионную активность микросреды на границе раздела биопленка – металл.

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ И РЕЗЕРВУАРОВ ХРАНЕНИЯ ВОДЫ

В системах оборотного охлаждения ТЭС вследствие поддержания благоприятного температурного диапазона ($10\text{--}40^\circ\text{C}$), большого количества питательных веществ и высокой насыщенности оборотной воды растворенным кислородом происходит интенсивное развитие микроорганизмов и бактерий. Биологические отложения, загрязняющие СОО, представляет собой совокупность различных бактерий и микроорганизмов, которые проникают в систему как с подпиточной водой, так и из воздуха. Бактерии способны использовать в качестве питательных веществ ингибиторы накипи и солеотложений.

Биологическое загрязнение теплообменных поверхностей приводит к снижению эффективности процесса теплопередачи и повышению эксплуатационных затрат на обслуживание и очистку энергетического оборудования. Анализ отложений в СОО показывает, что от 4 до 30% приходится именно на биологическое загрязнение [22]. Появление и развитие биопленок, образованных колониями анаэробных бактерий (железоокисляющих, сульфатредуцирующих, нитрифицирующих и др.) способствуют биоиндуцированной коррозии. Для подавления биологического загрязнения применяется комплексная биоцидная обработка [23, 24].

В 2015 г. сотрудниками КГЭУ было проведено исследование СОО с башенной испарительной градирней на предмет биологического загрязнения установок Набережно-Челнинской ТЭЦ [25]. Выявлено обширное загрязнение конденсационного оборудования и башенной испарительной градирни. Преобладающими во взятых пробах являлись бактерии анаэробного типа. Этому способствовали повышенная температура окружающего воздуха, насыщение воды кислородом в градирне, нестабильное ведение водно-химического режима.

В работе [26] выполнено исследование биологической загрязненности оборотной воды, используемой для охлаждения оборудования ПГУ 450 МВт. По результатам исследований было выявлено, что общее микробное число (ОМЧ) в пробах воды СОО ТЭЦ находилось на уровне 10^4 – 10^5 КОЕ/мл, что незначительно превышает нормируемое значение 10^4 КОЕ/мл для открытых систем охлаждения. Также было обнаружено присутствие дрожжей и грибов на уровне 10^3 КОЕ/мл, что является недопустимым.

В работе [27] объектом исследования биологического загрязнения была СОО с башенной испарительной градирней, эксплуатируемая примерно 2,5 года. Были взяты пробы воды из водосборного бассейна градирни и биофлекок. По результатам анализа бактерий и микроорганизмов, обнаруженных в данных пробах, создана библиотека клонов генов 16S рРНК. Большую часть свободноживущих бактерий (99,0%) составляли бактерии вида *Betaproteobacteria*. Преобладающими бактериями были, %:

| | |
|----------------------------------|------|
| <i>Alphaproteobacteria</i> | 47.9 |
| <i>Betaproteobacteria</i> | 11.7 |
| <i>Acidobacteria</i> | 13.1 |
| <i>Gemmatimonadetes</i> | 11.3 |

Биологическим загрязнениям подвержены также резервуары для хранения воды (баки осветленной воды, частично обессоленной и химически очищенной воды). Авторы [28] исследовали бак обессоленной воды на одной из ТЭС Венгрии. Пробы воды, взятые на входе в бак и выходе из него, были проанализированы на наличие биологических загрязнений обессоленной воды. Количество аэробных гетеротрофных бактерий составило 1.05×10^1 и 3.90×10^2 КОЕ/мл в пробах, взятых на входе в бак и выходе из него соответственно.

В [29] проанализирована реакция железобактерий (IB) и сульфатредуцирующих бактерий (SRB) в лабораторной установке, моделирующей работу сетевого подогревателя ТЭС. Определялось влияние температур, скорости потока теплоносителя, а также концентрации искусственно введенных бактерий на развитие биологического загрязнения сетевого подогревателя. В результате проведенного эксперимента было установлено, что с ростом температуры до 40°C общее количество биологических загрязнений увеличилось, с повышением же расхода теплоносителя скорость роста железобактерий снизилась, а два типа бактерий проявляли синергетическое взаимодействие.

Традиционный подход к оценке засорения трубок конденсатора заключается в расчете теплообмена по значениям противодавления кон-

денсатора, расхода охлаждающей воды и температуры. При повышении противодавления в конденсаторе всего на 0,67 кПа, вызванном биологическим загрязнением трубок, эффективность выработки тепловой и электрической энергии снижается на 0,5%, что соответствует 3 МВт генерируемой мощности [30].

Оценка развития биологического загрязнения в трубках конденсатора по параметрам установки является сложной задачей, в основном из-за большого количества переменных, влияющих на теплообмен. В 2002 г. на действующей ТЭС в Италии были протестированы электрохимические датчики образования биофлекок [31]. На нескольких ТЭС была внедрена специальная система под названием BIOX для контроля образования биофлекок на конденсационных установках [32].

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ УСТАНОВОК ВОДОПОДГОТОВКИ

В работе [33] были проведены исследования биологического загрязнения водоподготовительной установки ТЭС, в схему которой включены предварительная очистка и химическое обессоливание с помощью фильтров смешанного действия (ФСД) в качестве третьей ступени. На фильтрах первой и второй ступеней биологических загрязняющих веществ не было обнаружено, наибольшему же биологическому загрязнению был подвержен фильтрующий материал, загруженный в ФСД. В пробах воды после ФСД количество бактерий было сравнимо с таковым в пробах исходной воды и варьировалось в диапазоне $(2 - 8) \times 10^4$ КОЕ/мл. В [33] были также протестированы различные биоциды: *Bronopol* (Merck KGaA, Germany), *ProClin* (Merck KGaA, Germany), *Kathon WT* (Dow Chemical Company, USA). Эффективность применения биоцида с концентрацией 25 ppm проявлялась уже через 8 ч. Исследования ионообменных смол, проведенные методом сканирующей электронной микроскопии, показали, что зерна ионообменной смолы были покрыты заметными органическими и неорганическими отложениями. Авторы также отметили растрескивание зерен анионитов и катионитов, причем последние были даже частично разрушены и на их поверхности присутствовали микроорганизмы. На ионообменных смолах из ФСД обнаружена комплексная биофлекка, состоящая практически из микроорганизмов/бактерий всех видов (сферических, стержнеобразных и нитевидных), а биообрастаания присутствовали и в межзеренном пространстве.

В работе [34] проведено комплексное исследование питательной воды с целью установить наличие органических примесей и их структуру методами инфракрасной и ультрафиолетовой спектроскопии, потенциометрии, элементного

анализа, определить физико-химические свойства органических примесей с прогнозированием их поведения в котле-утилизаторе. В результате анализа прохождения гумусовых веществ через ступени очистки ВПУ было измерено содержание органических веществ в конденсате пара котла-утилизатора по концентрации общего органического углерода (ООУ), которая составила 100–150 мкг/дм³.

В 2020 г. авторы [35] исследовали бактериальное загрязнение блочной схемы химического обессоливания на Казанской ТЭЦ-1. Был проведен постадийный анализ проб воды на ВПУ с помощью биодетекторов BART-тестов, содержащих различные питательные среды: слизеообразующие бактерии (SLYM-BART), сульфатредуцирующие бактерии (SRB-BART), гетеротрофные аэробные бактерии (HAB-BART). Определено ОМЧ для всех элементов ВПУ. В пробах воды после ФСД обнаружена высокая степень микробиологического загрязнения, количество бактерий составляло $(6.89 - 6.35) \times 10^6$ КОЕ/мл.

В работе [36] представлены результаты изучения биологического загрязнения ВПУ, в состав которой также входит ФСД. В отличие от результатов экспериментов предыдущих авторов, на поверхности зерен ионитов исследуемых образцов смол размножения бактерий не было зафиксировано.

Авторы [37] изучили биологическое загрязнение теплоносителя в системах ВПУ методами культивирования. Отмечено, что при измерении количества бактерий методом эпифлуоресцентной микроскопии значения КОЕ на 1–2 порядка выше, чем при подсчете пластинок, независимо от применяемой среды культивирования.

В [38] обнаружено значительное количество биологических загрязнений на поверхности зерен анионитов ионообменной смолы фильтров ВПУ на электростанциях в г. Шубра-эль-Хейма (Египет). Большинство наблюдаемых бактерий принадлежали к роду *Bacillus*, которые относительно устойчивы к биоцидной обработке. В результате исследований проб ионообменной смолы было выявлено снижение обменной емкости ионитов до 5%. К сожалению, авторы не конкретизировали, о какой именно обменной емкости ионита идет речь.

Начиная со второй половины XX в. для водоподготовки на ТЭС в России стали активно применяться мембранные технологии. В процессе эксплуатации мембранные установки подвергаются биологическому загрязнению, которое составляет более 45% всех видов загрязнения мембран [39, 40].

В своих исследованиях авторы [41] провели идентификацию бактерий, обнаруженных в биопленках обратноосмотических мембран, и пришли к выводу,

что эти бактерии принадлежат к таким видам, как *Mycobacterium*, *Flavobacterium*, *Pseudomonas*, *Corynebacterium*, *Bacillus*, *Arthrobacte*, *Acinetobacter*, *Cytophaga*, *Moraxella*, *Micrococcus*, *Serratia*, *Lactobacillus*, *Aeromonas*.

Авторами [42] были выявлены четыре механизма биологического загрязнения ультрафильтрационных мембран: полная, частичная и внутренняя блокировка пор и образование корки.

МЕТОДЫ БОРЬБЫ С БИОЛОГИЧЕСКИМИ ЗАГРЯЗНЕНИЯМИ

Для борьбы с биологическими загрязнениями могут применяться следующие методы: механические, физические, химические, электрохимические, акустические и электромагнитные.

Для удаления биологических отложений механическим способом и предотвращения образования минеральных отложений в трубках конденсатора на некоторых ТЭС предусмотрена система шариковой очистки (СШО). В настоящее время высокоэффективное оборудование СШО отечественного производства успешно эксплуатируется на более чем 40 ТЭС, в том числе на Астраханской ТЭЦ-2, Березовской, Заинской, Каширской, Конаковской, Пермской, Рязанской, Троицкой и Череповецкой ГРЭС, Волжской ТЭЦ-2, Набережно-Челнинской ТЭЦ, Новосибирской ТЭЦ-5, Орловской ТЭЦ, Минской ТЭЦ-3, Пермской ТЭЦ-9, а также на большинстве ТЭЦ ОАО «Мосэнерго» и других электростанциях. Кроме того, на ТЭС применяется очистка теплообменных поверхностей гидродинамической струей. При таком способе очистки струя жидкости под высоким давлением направляется на загрязненную поверхность, при этом суспензия может содержать абразивы для повышения эффективности процесса. Для борьбы с биологическими загрязнениями применяются также кавитационный способ, при котором на очищаемую поверхность под давлением направляется парогазовая эмульсия, и микроволновое излучение, при воздействии которого удается разрушить и удалить осадки биологического происхождения.

Одним из традиционных методов борьбы с биологическими загрязнениями служит хлорирование обрабатываемой воды, которое можно производить растворением газообразного хлора или использовать раствор гипохлорита натрия NaClO. Эффективность применения хлора для борьбы с биологическими загрязнениями зависит от значения pH, но дезинфицирующее действие хлора ухудшается по мере повышения pH в пределах его допустимого диапазона 6.5–9.5. При снижении концентрации ионов H⁺ (увеличении pH) равновесие смещается в сторону иона OCl⁻, который в

качестве биоцида существенно менее эффективен, чем хлорноватистая кислота HOCl .

В процессе обработки воды хлором образуются хлорорганические побочные продукты: тригалометаны (ТГМ) или галоформные соединения (например, хлороформ, бромформ, дихлорбромметан, дибромхлорметан и др.), которые могут быть токсичными даже при низких концентрациях в сточных водах.

Диоксид хлора ClO_2 может служить альтернативой хлорированию благодаря его высокой эффективности при использовании в качестве бактерицидного средства для борьбы с биологическим загрязнением трубок конденсаторов на ТЭС. Кроме того, диоксид хлора образует небольшое количество галогенорганических побочных продуктов.

Пероксид водорода H_2O_2 является дезинфицирующим средством. Он эффективен против широкого спектра бактерий, в том числе против тех, которые проявляют устойчивость к хлорированию. Обработка пероксидом водорода широко используется в сочетании с другими дезинфицирующими способами, такими как ультрафиолетовое (УФ) облучение и озонирование. В водных растворах H_2O_2 часто присутствует вместе с растворенным озоном [43]. Этот эффект лежит в основе процессов, называемых *advanced oxidation* [44]. Пероксид водорода сам по себе не является бактерицидом. Он должен быть преобразован в радикалы [например, в гидроксильный радикал ($-\text{OH}$)], которые реагируют с клеточными компонентами: нуклеиновыми кислотами, белками и липидами. Противомикробные свойства H_2O_2 проявляются в образовании гидроксильных радикалов на поверхности мембраны, а также окислении сульфгидрильных групп белков и создании двойных связей.

Озонирование приводит к окислению неорганических и органических материалов. Основная особенность озона состоит в том, что он является более сильным окислителем, чем хлор, и может разлагать высокомолекулярные органические вещества, такие как гуминовые кислоты (с образованием низкомолекулярных соединений), альдегиды и карбоновые кислоты. Таким образом, озон считается высокоэффективным биоцидом. При озонировании снижается содержание общего органического углерода в воде, но имеются три основных ограничения для его применения. Во-первых, озон нестабилен в воде; так, при $\text{pH} = 8$ период его полураспада составляет менее 1 ч. Во-вторых, он реагирует с природными органическими веществами с образованием низкомолекулярных окисленных побочных продуктов. В-третьих, его невозможно хранить на предприятиях.

Эффективная борьба с биологическими загрязнениями путем дозирования NaClO в сочета-

нии с NaBr в пресноводные системы может привести к снижению требуемой дозы NaClO , поскольку свободный бром, в отличие от HOCl , не полностью диссоциирует при $\text{pH} > 7$. Бромамины, продукты реакции с аммиаком, естественным образом присутствующим в воде, более токсичны, чем хлорамины.

На ТЭС применяются анионные, катионные и амфотерные поверхностно-активные вещества (ПАВ). Анионные ПАВ эффективны только при $\text{pH} < 3$, и к ним относятся алифатические кислоты, такие как додецилсульфат натрия. Катионные ПАВ — это соединения четвертичного аммония, которые в достаточной степени изучены и широко используются в качестве бактерицидного средства в системах ВПУ. Наиболее известным из них является хлорид бензалкония, который представляет собой группу соединений с различной длиной алифатической цепи ($\text{C}_8\text{—C}_{18}$).

Для борьбы с биологическими загрязнениями применяются следующие виды ПАВ: MOLaktiv E30, Kenolux E-D, алкилбензолсульфонат натрия (LAS), Sulfopon 1216 G, SULFOROKAnol N232P, Hostapur SAS 60 (вторичный алкансульфонат), Capstone FS-61, Chemal EO 20, ROKAnol NL3 и др.

Биодисперсанты относятся к синтетическим ПАВ и способствуют проникновению биоцидов в органические отложения, тем самым содействуют уничтожению анаэробных бактерий. Они ограничивают образование биопленок на чистых поверхностях, уменьшают биокоррозионную активность и не снижают эффективность действия иных биоцидов. Действие биоПАВ состоит в том, что они дробят биологические загрязнения на более мелкие частицы и удерживают их во взвешенном состоянии в охлаждающей воде. Этот процесс предотвращает образование биологических загрязнений и позволяет удалять их из системы путем промывки.

Компанией Aqua-mol GmbH (Германия) для борьбы с биологическим загрязнением оборудования было предложено использовать метод под названием MOLClean [45]. Главной особенностью этого метода является возможность устранить причину возникновения биологических загрязнений и удалить уже имеющиеся. Основной принцип работы данной технологии заключается в том, что в охлаждающую воду вводят металлические катализаторы и производят дозирование химического реагента MOLaktiv E30, который представляет собой 30%-ный раствор H_2O_2 . При взаимодействии с металлом катализатора молекулы H_2O_2 в результате перехода электронов активируются, а сама поверхность приобретает положительный заряд. Благодаря электростатическим силам притяжения бактерии и микроорганизмы устремляются к поверхности катализатора. Затем бактериальные клетки разрушаются под воздействием

молекул пероксида водорода. В результате этих реакций в воде образуются ПАВ биологического происхождения (биоПАВ), названные разработчиками метода биотензидами.

Токсичные покрытия для трубопроводов и теплообменных поверхностей могут содержать такие вещества, как оксид трибутилолова, которые постепенно высвобождаются из покрытия в процессе выщелачивания (гидролиз, поверхностная эрозия). Было установлено, что среди различных токсичных покрытий те, что содержат оксид трибутилолова (Bu_3Sn)₂O, очень эффективны против широкого спектра микроорганизмов. Однако из-за чрезвычайно высокой токсичности его в конце XX в. перестали использовать на ТЭС [46].

Нетоксичные покрытия допускают биологическое загрязнение поверхностей, но облегчают его удаление из-за ослабления адгезионной связи между покрытием и био пленкой. Особой группой покрытий, перспективных для систем оборотного водоснабжения, являются покрытия на силиконовой основе. Они наносятся на идеально чистые и сухие поверхности или на чистый и почти сухой (влажность 5% и менее) бетон. Следовательно, покрытия труднее наносить на поверхности действующих СОО и можно эффективно применять лишь при строительстве новых. Покрытия данного вида чувствительны к повреждениям и механическому истиранию. Предполагаемый срок службы коммерчески доступных силиконовых покрытий составляет 4–5 лет.

Акустические методы в перспективе могут стать вполне действенными для предотвращения биологического загрязнения. Генераторы акустических импульсов (спаркеры) создают импульсные акустические волны широкого спектра частот. Конструкция спаркеров и принцип их работы подробно описаны в [47, 48]. Исследования спаркеров были связаны с проведением ингибирования биологического загрязнения трубопроводов на промышленных предприятиях [49, 50].

Термическая обработка является довольно эффективным способом борьбы с биологическими загрязнениями и применяется на некоторых электростанциях Европы и Северной Америки. Охлаждающая вода постепенно нагревается до температуры примерно 40°C и затем поддерживается на этом уровне в водном контуре от 30 мин до 2 ч. В результате микроорганизмы некоторых видов погибают от теплового шока. Однако термическая обработка неэффективна для борьбы с биологическими загрязнениями и для удаления био пленок, так как для их устранения требуется температура более 70°C. В Нидерландах на ТЭС Noogovens, Ijmuiden, Eems и Delfzijl, в качестве охлаждающей воды используется морская вода, предварительно подвергнутая термической обработке с целью устранить биологические загрязнения [51].

Обработка ультрафиолетовым излучением находит широкое применение в различных областях промышленности. Уничтожение бактерий происходит при воздействии на них фотонов с длиной волны в диапазоне от 200 до 280 нм. Фотоны, обладающие высокой энергией, наиболее эффективны при длине волны 253.7 нм [52]. Под воздействием УФ-излучения разрушаются молекулы рибонуклеиновой и дезоксирибонуклеиновой кислот.

Органические вещества и растворенные соли поглощают УФ-излучение, поэтому чем больше растворенных веществ присутствует в воде, тем ниже коэффициент пропускания. Для обработки воды рекомендуется применять УФ-излучение при значении коэффициента пропускания не ниже 85%. Для определения реального воздействия УФ-системы наряду с коэффициентом пропускания необходимо оценивать значение общего содержания в воде взвешенных твердых частиц. В стандартных УФ-системах обеззараживания воды доза излучения лампы составляет приблизительно 40 мДж/см². Основными преимуществами УФ-обработки воды являются отсутствие химических реагентов, безопасность, относительная простота использования, низкие затраты энергии.

ВЫВОДЫ

1. Биологическое загрязнение оборудования наблюдается практически на всех этапах подготовки теплоносителя на ТЭС. В СОО эффективность работы конденсационной установки снижается вследствие биологических отложений на трубной поверхности конденсатора, что негативно сказывается на экономичности ТЭС в целом. Био пленки, которые образуют анаэробные бактерии, являются причиной развития биоиндуцированной коррозии. Вследствие образования биологических отложений на стенках резервуаров хранения химически очищенной воды на ТЭС происходит недопустимое снижение качества теплоносителя, что может привести к аварийным ситуациям на прямоточных котлах.

2. Практически все технологические элементы ВПУ подвержены биологическому загрязнению, которое является причиной снижения показателей качества теплоносителя на ТЭС. На ВПУ с ионообменными фильтрами обнаруживают органические и неорганические отложения и био пленки, которые могут привести к разрушению структуры и ухудшению технологических свойств ионообменных смол, а на баромембранных ВПУ из-за образования био пленок возникает блокировка пор.

3. К наиболее эффективным методам борьбы с биологическими загрязнениями технологического оборудования на ТЭС относятся хлорирование, применение диоксида хлора, пероксида водорода,

озонирование, бромирование, использование анионо-, катионо- и амфортерных ПАВ, а также термические, акустические методы и обработка ультрафиолетовым излучением. Следует отметить, что выбор оптимального варианта должен основываться на идентификации конкретных популяций бактерий, приводящих к биологическому загрязнению на определенном оборудовании, а также технико-экономических расчетах и оценке применимости различных методов для конкретных установок водоподготовки.

4. На большинстве ТЭС следует обратить внимание на постоянный мониторинг, предотвращение возможности биологического загрязнения энергетического оборудования или ее минимизацию. Для этого необходимо поддерживать оптимальный водно-химический режим на станциях, применять современные биоциды, а также вести борьбу с биологическими загрязнениями нехимическими методами, например путем дополнительной УФ-обработки теплоносителя на определенных этапах водоподготовительного цикла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Costerton J.W., Nickel J.C., Ladd T.I.** Suitable methods for the comparative study of free-living and surface-associated bacterial populations // *Bact. Nat.* 1986. V. 2. P. 49–84.
2. **Costerton J.W., Lappin-Scott H.M.** Behaviour of bacteria in biofilms // *ASM News.* 1989. V. 55. P. 650–654.
3. **Bos R., Van der Mei H.C., Busscher H.J.** Physico-chemistry of initial microbial adhesive interactions – its mechanisms and methods for study // *FEMS Microbiol. Rev.* 1999. V. 23. No. 2. P. 179–230. [https://doi.org/10.1016/S0168-6445\(99\)00004-2](https://doi.org/10.1016/S0168-6445(99)00004-2)
4. **Surface** thermodynamics of bacterial adhesion / D.R. Absolom, F.Y. Lamberti, Z. Policova, W. Zingg, C.J. van Oss, A.W. Neumann // *Appl. Environ. Microbiol.* 1983. V. 46. P. 90–97.
5. **Rutter P.R., Vincent B.** Attachment mechanisms in the surface growth of microorganisms // *Physiological Models in Microbiology.* 2nd ed. CRC Press, 1988.
6. **Influence** of interfaces on microbial activity / M.C.M. van Loosdrecht, J. Lyklema, W. Norde, A.J.B. Zehnder // *Microbiol. Rev.* 1990. V. 54. No. 1. P. 75–87. [https://doi.org/0146-0749t90/010075-13\\$02.00/0](https://doi.org/0146-0749t90/010075-13$02.00/0)
7. **Physico-chemistry** from initial bacterial adhesion to surface-programmed biofilm growth / V. Carniello, B.W. Peterson, H.C. van der Mei, H.J. Busscher // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2018. V. 261. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2018.10.005>
8. **Melo L.F., Bott T.R.** Biofouling in water systems // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 1997. V. 14. No. 4. P. 375–381. [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(96\)00139-2](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(96)00139-2)
9. **An overview** of biofouling: from basic science to mitigation / T. R. Bott, L.F. Melo, C.B. Panchal, E.F.C. Somerscales // *Proc. of the Intern. Conf. on Understanding Heat Exchanger Fouling and Its Mitigation.* Castelvechio Pascoli, Lucca, Italy, 1997. N.Y.: Begell House, Inc., 1999. P. 55–66.
10. **Experimental** study on microbial fouling characteristics of the plate heat exchanger / Z.M. Xu, J.T. Wang, Y.T. Jia, X.Y. Geng // *Appl. Therm. Eng.* 2016. V. 108. P. 150–157. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.110>
11. **Dacheng W., Caifu Q., Shengxian C.** Dynamic simulation of microbial fouling in heat exchanger and analysis of influencing factors // *Chem. Ind. Eng. Prog.* 2013. V. 8. P. 1934–1938.
12. **Use** of extended Kalman filtering in detecting fouling in heat exchangers / G.R. Jonsson, S. Lalot, O.P. Palsson, B. Desmet // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2007. V. 50. No. 13–14. P. 2643–2655. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.11.025>
13. **Yang S.R.** The research of fouling intelligent monitor // *Proc. of the 3rd Engineering Thermophysics Conf.* Dalian, Institute of Engineering Thermophysics, 1990. P. 611–614.
14. **Wen X., Miao Q., Sun L.** Modeling and prediction of fouling characteristics of heat exchanger // *Chem. Eng. Mach.* 2014. V. 6. P. 699–704.
15. **Sun L., Tao M., Piao H.** Foul prediction of heat exchanger based on regular sequential extreme learning machine // *J. Northeast Dianli Univ.* 2015. V. 35. No. 4. P. 84–90.
16. **Ford T., Mitchell R.** The ecology of microbial corrosion // *Adv. Microb. Ecol.* 1990. V. 11. P. 231–262.
17. **Von Holy A.** Microbial corrosion // *Proc. of the Intern. Workshop on Industrial Biofouling and Biocorrosion.* Mulheim, Germany, Sept. 1997.
18. **De Bruyn E.** Microbial ecology of sulphide-producing bacteria in water cooling systems: Thesis PhD. University of Pretoria, South Africa, 1992
19. **Iverson W.P.** Microbial corrosion of metals // *Adv. Appl. Microbiol.* 1987. V. 32. P. 1–36. [https://doi.org/10.1016/S0065-2164\(08\)70077-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2164(08)70077-7)
20. **Brozel V.S., Cloete T.E.** The role of sulphate-reducing bacteria in microbial induced corrosion // *Paper SA.* 1989. P. 30–36.
21. **Lee W., Characklis W.G.** Corrosion of mild steel under anaerobic biofilm // *Corrosion.* 1993. V. 49. No. 3. P. 186–199. <https://doi.org/10.5006/1.3316040>
22. **Исследование** состава и структуры отложений в системе оборотного охлаждения ТЭС / А.А. Чичилов, Н.Д. Чичирова, И.И. Галиев, Л.И. Гайнутдинова, А.Ю. Смирнов // *Изв. вузов. Проблемы энергетики.* 2009. № 7–8. С. 37–45.
23. **Методологические** аспекты выбора реагентов для предотвращения минеральных отложений / Б.Н. Дрикер, А.И. Мурашова, А.Г. Тарантаев, А.Ф. Никифоров // *Энергосбережение и водоподготовка.* 2014. № 2 (88). С. 2–4.
24. **Комплексная** реагентная обработка воды системы технического водоснабжения с градирнями на ТЭС / А.А. Чичилов, Н.Д. Чичирова, М.А. Волков, С.М. Власов // *Труды Академэнерго.* 2012. № 1. С. 90–100.
25. **Методы** снижения бактериального загрязнения систем оборотного охлаждения ТЭЦ / Н.Д. Чичирова, А.А. Чичилов, С.М. Власов, А.Ю. Власова //

- Теплоэнергетика. 2015. № 7. С. 62–67.
<https://doi.org/10.1134/S0040363615070024>
26. **Козловский В.В., Ларин А.Б.** Методика исследования состояния водного режима системы оборотного охлаждения на ТЭС // Вестник ИГЭУ. 2019. № 3. С. 14–21.
 27. **Bacterial** community structure in cooling water and biofilm in an industrial recirculating cooling water system / J. Wang, M. Liu, H. Xiao, W. Wu, M. Xie, M. Sun, C. Zhu, P. Li // *Water Sci. Technol.*, 2013. V. 68. No. 4. P. 940–947.
 28. **Bacterial** communities in an ultrapure water containing storage tank of a power plant / V. Bohus, Z. Keki, K. Márialigeti, K. Baranyi, G. Patek, J. Schunk, E.M. Toth // *Acta Microbiol. Immunol. Hung.* 2011. V. 58. No. 4. P. 371–382.
 29. **Experimental** study of the growth characteristics of microbial fouling on sewage heat exchanger surface / C. Xiao, Y. Qirong, W. Ronghua, Z. Ning, L. Nan // *Appl. Therm. Eng.* 2017. V. 128. P. 426–433.
 30. **Drake R.C.** Increasing heat exchanger efficiency through continous mechanical tube maintenance // *Biofouling control procedures: technology and ecological effects* ed. by L.D. Jensen. N.Y.: Marcel Decker, 1977. P. 43–53.
 31. **Mollica A., Cristiani P.** On-line biofilm monitoring by electrochemical probe “BIOX” // *Water Sci. Technol.* 2002. V. 47. No. 5. P. 45–49.
<https://doi.org/10.2166/wst.2003.0277>
 32. **Cristiani P., Agostini F.** On-line monitoring of chlorination treatments at Vado Ligure power plant by BIOX system: two year of experience // *Proc. of the Intern. Conf. on Mitigation of Heat Exchanger Fouling and Its Economic and Environmental Implications*. Banff, Alberta, Canada, 11–16 July 1999. N.Y.: Begell House, Inc., 1999. P. 103–110.
 33. **Critical** point analysis and biocide treatment in a microbiologically contaminated water purification system of a power plant / Z. Kéki, J. Makk, K. Barkács, Balázs Vajna, M. Palatinszky, K. Márialigeti, E. Tóth // *SN Appl. Sci.* 2019. V. 1. Is. 820.
 34. **Качественный** и количественный анализ органических примесей в питательной воде котла-утилизатора / А.А. Чичириков, Н.Д. Чичирова, А.А. Филимонова, А.А. Гафиатулина // *Теплоэнергетика*. 2018. № 3. С. 51–58.
<https://doi.org/10.1134/S0040363618030049>
 35. **Исследование** бактериального загрязнения теплоносителя схемы химического обессоливания на Казанской ТЭЦ-1 / С.М. Власов, А.Ю. Власова, Н.Д. Чичирова, О.Е. Бабикив // *Теплоэнергетика*. 2022. № 3. С. 86–91.
<https://doi.org/10.1134/S0040363622030110>
 36. **Gram-negative** bacteria viable in ultrapure water: identification of bacteria isolated from ultrapure water and effect of temperature on their behavior / N. Matsuda, W. Agui, T. Tougou, H. Sakai, K. Ogino, M. Abe // *Colloids Surf.*, B. 1996. V. 5. P. 279–289.
 37. **Analysis** of bacteria contaminating ultrapure water in industrial systems // L.A. Kulakov, M.B. McAlister, K.L. Ogden, M.J. Larkin, J.F. O’Hanlon // *Appl. Environ. Microbiol.* 2002. V. 68. P. 1548–1555.
<https://doi.org/10.1128/AEM.68.4.1548-1555.2002>
 38. **Abiotic** factors and microbial communities fouling anion exchange resin causing performance deficiency in electric power plants / S.M. Abdelsalam, Z.M.H. Kheiralla, F.A. Abo-Seif, S.M.E. Asker // *Egypt. J. Microbiol.* 2017. V. 52. No. 37. P. 17–28.
 39. **The history** and state of art in membrane technologies Tarragona, Erasmus / B. Liu, D. Wang, G. Yu, X. Meng, J. David Giraldo, V.K. Thakur, E. Gutiérrez // *J. Membr. Sci.* 2005. V. 16. P. 1–28.
 40. **Nguyen T., Roddick F.A., Fan L.** Biofouling of water treatment membranes: a review of the underlying causes, monitoring techniques and control measures // *Membranes*. 2012. V. 2. No. 4. P. 804–840.
<https://doi.org/10.3390/membranes2040804>
 41. **Design** and performance evaluation of reverse osmosis desalination systems: an emphasis on fouling modeling / B.A. Qureshi, S.M. Zubair, A.K. Sheikh, A. Bhujle, S. Dubowsky // *Appl. Therm. Eng.* 2013. V. 60. No. 1–2. P. 208–217.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.06.058>
 42. **Fouling** mechanisms in constant flux crossflow ultrafiltration / A.Y. Kirschner, Y.H. Cheng, D.R. Paul, R.W. Field, B.D. Freeman // *J. Membr. Sci.* 2019. V. 574. P. 65–75.
 43. **Card T.R., Purdom R.L.** Ozone in wastewater treatment // *Ozone World Congress Papers*. 1989. V. 2. P. 281.
 44. **Aqueous** ozonation of pesticides: A review / G. Reynolds, N. Graham, A. Perry, R.G. Rice // *Ozone Sci. Eng.* 1989. V. 11. No. 4. P. 339–382.
 45. **Гоголашвили Э.Г.** Технология “МОЛ-КЛИН” – передовой метод борьбы с биообрастаниями // *Энергетика Татарстана*. 2008. № 2. С. 45–50.
 46. **Kawabe Midori, Kawabe Masaki.** Factors determining chemical oxygen demand in Tokyo bay // *J. Oceanogr.* 1997. V. 53. No. 5. P. 443–453.
 47. **US Patent No. PCT/CA91/00269.** Zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) and other aquatic organism control / A.D. Bryden. 1993.
 48. **US Patent No. 5 636 180.** System for preventing biofouling of surfaces exposed to water / M.G. Grothaus, M.S. Mazzola, M. Walch. 1997.
 49. **Schaefer R.B.** Pulsed acoustic sparker biofouling control in heat transfer equipment: Technical Final Report SERDP/SEED. Phoenix Science and Technology, Inc., 2002.
 50. **Mackie G.L., Lowery P., Cooper C.** Plasma pulse technology to control zebra mussel biofouling / U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station. Vicksburg, MS, 2020.
 51. **Response** of the tropical mussel *Modiolus philippinarum* (Hanley) to heat treatment: an experimental study for antifouling application / S. Rajagopal, G. van der Velde, K.V.K. Nair, H.A. Jenner // *Mar. Freshwater Behav. Physiol.* 1999. V. 32. No. 4. P. 239–253.
<https://doi.org/10.1080/10236249909379052>
 52. **Disinfection** of circulating water systems by ultraviolet light and halogenation / R. Gilpin, S. Dillon, P. Keyser, A. Androkites, M. Berube, N. Carpendale, J. Skorina, J. Hurley, A. Kaplan // *Water Res.* 1985. V. 19. No. 7. P. 839–848.
[https://doi.org/10.1016/0043-1354\(85\)90141-1](https://doi.org/10.1016/0043-1354(85)90141-1)

Biological Pollution of Technological Equipment and the Chemically Desalting Water Treatment Plant at a TPP (Review)

N. D. Chichirova^a, A. A. Filimonova^a, S. M. Vlasov^a, and O. E. Babikov^{a, *}

^a Kazan State Power Engineering University (KSUE), Kazan, 420066 Russia

*e-mail: Olegsey1998@yandex.ru

Abstract—At thermal power plants, installations in contact with the water coolant are subject to biological contamination. This is due to a number of factors: the maintenance of favorable temperature regimes, the formation of stagnant zones, the constant supply of nutrients, the presence of large areas of equipment surfaces (pipelines, water storage tanks, the pipe surface of the condenser), the presence of various materials (ion-exchange resins, membranes), and changing climatic conditions. The fight against the formation of such pollution of thermal power equipment is very relevant today, although almost all TPPs carry out thorough preparation of additional and feed water. It should be noted that the control of the concentration of organic impurities in the liquid and vapor phases, as well as continuous monitoring, are rather laborious processes. Organic deposits and the presence of biofilms on the process equipment of circulating cooling systems (CCS), water treatment plants (WTP), and chemically treated water storage tanks lead to various production failures, emergencies, and a general decrease in the efficiency of heat and electricity generation. In this paper, foreign and domestic studies on the features of the formation and development of biofilms were reviewed. Current methods for detecting and assessing biological pollution are considered and traditional chemical, physical, electrochemical, acoustic, electromagnetic, and other methods of combating microorganisms and bacteria are described. It has been shown that the growth of bacteria significantly complicates the equipment-cleaning procedures and accelerates the process of scale formation. To effectively solve the problems of biological deposits, the development of methods for diagnosing and controlling the formation of bacterial deposits, the preparation of additional water, and the maintenance of a water-chemical regime must be carried out differentially based on the identification of colonies of microorganisms using test systems. The previous works of the team of authors concerning the issues of pollution of the coolant of circulating cooling systems and water treatment plants at TPPs of the Republic of Tatarstan in the period from 2009 to 2022 are noted.

Keywords: thermal power plants, water treatment plants, biological pollution, biofilm, steam turbine condenser, ion-exchange resins, membrane technologies, UV irradiation, ozonation