**УДК 621.311.25**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ АЭС ЗА СЧЕТ ОРГАНИЗАЦИИ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ОБМЕНА ВОДЫ ПУТЕМ ПРОДУВКИ–ПОДПИТКИ И БИОЛОГО-ХИМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

***В.П. Кравченко***

*Доктор технических наук, заведующий кафедры, Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса, Украина*

***В.А. Мороз***

*Консультант ГП «УКРЭКСПРОЦЕНТР» «ООЗ», г. Одесса, Украина*

**PROVIDING OF TECHNOGENIC SAFETY OF RESERVOIR-COOLER OF NPP FOR ACCOUNT OF ORGANIZATION OF OPTIMUM MODE OF EXCHANGE OF WATER BY BLOWING OUT – SIGNUP AND BIOLOGOTYPE-CHEMICAL MONITORING**

**V.P. Kravchenko**

Doctor of technical sciences, head of the department, Odessa national polytechnic university, Odessa, Ukraine

**V.A. Moroz**

Consultant of the SE “UKREKSPROCENTER” “OEP”, Odessa, Ukraine

**Аннотация**

Статья посвящена совершенствованию методов мониторинга качества воды водоема-охладителя и брызгальных бассейнов ответственных потребителей для регулирования качества воды с целью увеличения надежности и продления ресурса основного технологического оборудования энергоблоков АЭС с соблюдением требований природоохранного законодательства. Приведено математическое моделирование процессов в техно-экосистеме АЭС, выполнена верификация и валидация результатов прогноза с экспериментальными данными качества воды водоема-охладителя. Приведены рекомендации по разработке унифицированных программ биолого-химического мониторинга АЭС.

**Annotation**

The article is devoted to improving the methods of water quality monitoring of the reservoir-cooler and spray basins of responsible consumers for the regulation of water quality in order to increase the reliability and extend the life of the main technological equipment of power units of nuclear power plants in compliance with the requirements of environmental legislation. Mathematical modeling of processes in the NPP techno-ecosystem is presenting, verification and validation of the forecast results are performing with experimental data of water quality of the reservoir-cooler. Recommendations on the development of unified biological and chemical monitoring programs of NPP.

**Ключевые слова:** атомная электростанция, техно-экосистема, водоем-охладитель, математическое моделирование, биолого-химический мониторинг

**Keywords:** nuclear power plant,techno-ecosystem, reservoir-cooler, mathematical modeling, biological and chemical monitoring

**Введение**

Современная атомная электростанция (АЭС), помимо основного, имеет значительное количество вспомогательного оборудования, необходимого как для его нормальной эксплуатации, так и для обеспечения техногенной безопасности. Под последней понимают состояние защищенности населения, производственного персонала, объектов экономики и окружающей среды от опасных техногенных происшествий [1].

При эксплуатации вспомогательного оборудования, в связи с технологическими потребностями в охлаждении, возникают характерные научно-технические проблемы. К примеру, повышение карбонатной жесткости воды и концентрации меди в водоеме-охладителе (ВО) и биопомехи (биообрастания).

Поэтому целью работы является разработка рекомендаций для:

* регулирования качества воды систем технического водоснабжения (СТВ) АЭС ответственных и неответственных потребителей на экологически безопасном уровне;
* ведения биолого-химического мониторинга с целью прогнозирования возникновения биопомех в СТВ АЭС для своевременного принятия мер по борьбе с ними.

**Применение метода системного анализа при моделировании процессов в техно-экосистеме АЭС**

СТВ оказывает существенное влияние на работу АЭС. От температуры и качества охлаждающей воды состава зависит экономичность работы АЭС. Температура охлаждающей воды водоема-охладителя (ВО) и ее качество влияют на давление пара в конденсаторах турбин. Снижение эффективности работы конденсационных установок ведет к уменьшению КПД энергоблоков и является одной из основных причин недовыработки электроэнергии и больших финансовых потерь АЭС.

К примеру, снижение температуры охлаждающей воды на 1°С приводит к повышению электрической мощности до 1% на АЭС [1]. Поэтому целесообразно применять штатные технологические операции по регулированию качества воды СТВ АЭС ответственных и неответственных потребителей для повышения работоспособности и продления ресурса основного технологического оборудования энергоблоков АЭС с соблюдением природоохранного законодательства Украины.

Для определения оптимального режима обмена воды путем продувки–подпитки ВО целесообразно использовать один из методов экологического мониторинга – прогноз состояния прилегающей акватории АЭС.

За период 2010-2013 гг. специалистами ОП «Научно-технический центр» ГП «НАЭК «Энергоатом» выполнялись работы [2, 3], направленные на разработку методов прогнозирования экологических показателей ВО с использованием системного анализа посредством представления СТВ в качестве отдельных элементов и их анализа.

**Разработка рекомендаций по регулированию качества воды на экологически безопасном уровне систем технического водоснабжения АЭС ответственных и неответственных потребителей**

В нормативном документе [4] приведен расчет параметров продувки ВО АЭС в водоем-приемник на основе метода Фельзенбаума. Особенностью данного расчета заключается в том, что данный метод предназначен для выполнения прогноза морских течений, которые не характерны для СТВ АЭС Украины. Поэтому была поставлена задача внести изменения в данный нормативный документ и разработать рекомендации по выполнению прогноза с учетом всех факторов, влияющих на экологическое состояние техно-экосистемы АЭС.

Учитывая, что Запорожская АЭС является крупнейшей АЭС в Европе, имеющей уникальную по масштабам брызгальную систему охлаждения циркуляционной воды, ВО и градирни, она оказывает наибольшую техногенную нагрузку на окружающую среду от АЭС Украины.

Структурное отображение физических взаимодействий в системе «Запорожская АЭС – водоем-охладитель – Каховское водохранилище», учитывающее техногенные и природные факторы, представлено схемой нодализации СТВ АЭС, которая является физической моделью для математического моделирования изменения концентраций химических показателей в водных объектах АЭС [5].

На рис. 1 представлена усовершенствованная схема нодализации СТВ АЭС по сравнению с работой [5], составлены модель и алгоритм решения системы уравнений определения концентрации в объектах СТВ Запорожской АЭС с учетом факторов водохозяйственного баланса.

**ПРОДУВКА**

**Каховское**

**водохранилище**

**Испарение воды**

**Капельный унос влаги**

**ГРАДИРНИ**

**Осадки**

**ПРУД-ОХЛАДИТЕЛЬ**

**Капельный унос влаги**

**Испарение воды**

**Конденсаторы**

**турбин**

**Брызгальные бассейны неответственных**

**потребителей**

**Капельный унос влаги**

**Испарение воды**

**ПОДПИТКА**

**ТЭС**

**ОСЗЗС**

**ООС**

**БРК**

**БН**

**ПЛК**

**Брызгальные бассейны ответственных потребителей**

**группы А**

**Капельный унос влаги**

**Испарение воды**

**Фильтрация**

**Подводящий**

**канал**

**Сбросной**

**канал**

Рис. 1 – Схема нодализации системы технического водоснабжения ЗАЭС

БН – баки нейтрализации, БРК – бак радиационного контроля, ПЛК – промышленная ливневая канализация, ООС – общегородские очистные сооружения, ОСЗЗС – общегородские сооружения замасленных и замазученных стоков, ХВО – химическая водоочистка

Аналитическое описание математической модели в динамике представлено в виде системы дифференциальных и алгебраических уравнений, отражающих баланс концентрации примесей в элементах СТВ согласно схеме нодализации:

 (1)

  (2)

  (3)

 (4)

 (5)

где  − суммарный расход воды в циркуляционной системе брызгальных бассейнов;  − расход воды брызгального бассейна капельным уносом;  − расход воды брызгального бассейна испарением;  − расход воды насосов градирни;  − расход воды градирни капельным уносом;  − расход воды градирни испарением;  − объем воды в бассейне градирни;  − расход воды брызгальных бассейнов ответственных потребителей капельным уносом;  − расход воды брызгальных бассейнов ответственных потребителей испарением;  − расход воды насосов брызгальных бассейнов ответственных потребителей;  − расход насосов циркуляционной системы;  − объем воды пруда-охладителя АЭС;  − концентрация загрязняющего вещества в воде пруда-охладителя АЭС;  − концентрация хозяйственно-бытовых стоков;  − концентрация загрязняющего вещества в сбросном канале ЗаТЭС;  − концентрация загрязняющего вещества в брызгальном бассейне;  − концентрация загрязняющего вещества в бассейне градирни;  − концентрация примеси сбросного канала;  − расход воды на фильтрацию в пруде-охладителе АЭС;  − расход на подпитку пруда-охладителя АЭС;  − расход на продувку пруда-охладителя АЭС;  − объем воды в брызгальном бассейне ответственных потребителей.

**Сравнительный анализ результатов математического моделирования трехмерной гидротермической моделью «ТРИТОКС» с экспериментальными данными**

В настоящей работе была использована адаптированная под ВО Запорожской АЭС модель гидротермодинамики «ТРИТОКС», разработанная на основе обобщенной трехмерной модели циркуляции воды в водном объекте Princeton Ocean Model (POM) [6, 7].

В соответствии с [4] расчет допустимого расхода продувки ВО необходимо выполнять по результатам измерений концентрации критического загрязняющего вещества.

В результате анализа данных химических показателей [2] в нашем случае критическим веществом является медь, так как ожидаемая концентрация по данному веществу в контрольном створе превышает допустимую.

Выполнен сравнительный анализ усредненных результатов (данных) расчетного моделирования адаптированной моделью «ТРИТОКС» под ВО ЗАЭС с экспериментальными данными качества воды ВО (рис. 2). В результате установлено, что приведенный математический аппарат хорошо описывает процесс изменения концентрации меди и может быть использован для определения оптимальных значений параметров продувки при обеспечении требований солевого режима ВО АЭС.

Рис. 2 – Сравнительный анализ усредненных результатов расчетного моделирования адаптированной моделью «ТРИТОКС» с экспериментальными данными.

Комплекс математических моделей прогноза качества воды ВО Запорожской АЭС прошел этапы верификации, валидации и согласован в Министерстве экологии и природных ресурсов Украины. Результаты проведенных исследований позволяют утверждать, что разработанные математические модели и их реализация в виде программного комплекса являются основой для установления регламента продувки СТВ АЭС, а также стали обосновывающими документами для утверждения и согласования разработанного комплекса математических моделей в Министерстве экологии и природных ресурсов Украины.

**Разработка рекомендации по организации биолого-химического мониторинга СТВ АЭС**

Биообрастание может быть вызвано созданием благоприятных условий для развития аборигенных микроорганизмов, либо попаданием в экосистему чужеродных организмов. Биообрастание негативно влияет на работу систем охлаждения основного и вспомогательного технологического оборудования АЭС. При этом снижается пропускная способность защитных решеток трубопроводов, снижается производительность насосного и теплообменного оборудования. Все это приводит к повышению рабочей температуры и эксплуатационных затрат, а также к снижению эффективности и безопасности производства электроэнергии.

Одним из первых шагов в решении проблем организации биолого-химического мониторинга техно-экосистем АЭС в Украине был сделан путем разработки и внедрения Стандарта предприятия [9].

Этим документом были определены основные принципы организации мониторинга и первоочередные мероприятия по обеспечению его выполнения. Впервые был предложен регламент деятельности, направленный не только на охрану окружающей среды, но и на защиту технических систем АЭС от негативного влияния биологических факторов на основе мониторинга экологических процессов во всех основных элементах техно-экосистемы АЭС.

Однако, анализ проведения наблюдений за биолого-химическим состоянием ВО и СТВ АЭС Украины показал отсутствие единого подхода по проводимым наблюдениям и, как следствие, отсутствие необходимого объема данных для прогнозирования развития биопомех.

Поэтому с целью усиления борьбы с биопомехами для повышения надежности работы тепломеханического оборудования СТВ АЭС целесообразно разработать методику унифицированного биолого-химического мониторинга (БХМ), учитывающего особенности географического и климатического расположения АЭС.

Организация унифицированного БХМ полностью преемственна системе методов анализа гидрохимических показателей, используемых подразделениями ГП НАЭК «Энергоатом» для осуществления программ производственного экологического контроля.

Разработку индивидуальных программ БХМ каждой АЭС следует проводить с учетом следующих особенностей АЭС:

* географических, климатических, технологических, эксплуатационных и других;
* ведущейся хозяйственной деятельности на ВО АЭС, включая программы биомелиорации и альголизации.

При проведении наблюдений за основными группировками гидробионтов рекомендуется использование стандартных методов гидробиологических исследований [10-14]. Для получения оперативной информации рекомендуется, наряду со стандартными методами гидробиологических исследований использовать экспресс-методы и методы молекулярно-генетической идентификации.

Необходимо использовать интегративный подход к сбору полевых данных, когда наряду с отбором проб и измерениями применяются современные неинвазивные дистанционные методы исследований и наблюдений, такие как дистанционное зондирование, фото- и видео-документирование; для выявления вторичных очагов расселения нежелательных организмов на внешних ГТС и в закрытых частях СТВ рекомендуется использовать в том числе и метод информационного опроса.

Интегрированный подход БХМ ориентирован на получение по ряду показателей данных двух типов:

* точечные;
* пространственные (дистанционные).

Пространственные данные доступны для многократного (в том числе возвратного) экспертного анализа различными специалистами. Они позволяют визуально оценить некоторые тренды в развитии экосистемы (например, проективное покрытие, протяженность и состав ассоциаций зарослей прибрежной водной растительности). При сборе дистанционных данных не происходит нарушения целостности исследуемого объекта, т.е. они имеют неинвазивный характер.

В целях систематизации точечных данных и их обработки с применением современных ГИС-технологий, привязки к пространственным данным (визуальной интерпретации) рекомендуется сопровождать отбор проб и измерения в открытой части СТВ географическим позиционированием.

БХМ необходимо осуществлять с помощью сети наблюдений, охватывающей открытую часть СТВ (на акваториях водоема-источника водоснабжения, ВО, внешних гидротехнических сооружениях – выпускных и подводящих каналах, вблизи отсыпок дамб, а также в чашах градирен) и закрытую часть СТВ - технический мониторинг;

Наблюдения БХМ рекомендуется осуществлять в трех основных режимах:

* регулярном, с периодичностью от нескольких дней до 1 раза в квартал в зависимости от жизненного цикла организмов-«мишеней» и технологического цикла конкретной АЭС на минимальной сети наблюдений;
* ежегодном, в течение вегетационного периода, с периодичностью 1…3 раза в год (в зависимости от показателя) на сети наблюдений, охватывающей наиболее важные участки открытой части СТВ;
* инвентаризационном (экстенсивном, поисковом, многолетнем), с периодичностью не реже 1 раза в 5 лет на всех участках СТВ на расширенной сети наблюдений. АЭС с оборотной системой охлаждения, проводящих биомелиоративные и биоремедиационные мероприятия, имеющим в составе системы СТВ градирни, поисковые наблюдения рекомендуется проводить не реже 1 раза в 3 года;
* наблюдения вне режима осуществляются на осушенных и вскрытых участках оборудования СТВ в соответствии с графиком плановых мероприятий и неплановыми осушкой и вскрытиями.

БХМ проводят в соответствии с перечнями гидрофизических, гидрохимических и биологических (гидробиологических, гидроботанических, ихтиологических) показателей.

К стандартному набору биологических объектов наблюдений БХМ добавлены в качестве ключевых организмы-источники биопомех из числа беспозвоночных обрастателей.

В задачи БХМ тех АЭС, где такие организмы выявлены, входят:

* своевременное выявление в ходе ежегодных и инвентаризационных наблюдений новых видов гидробионтов - потенциальных источников биопомех;
* прогноз массового развития в СТВ нежелательных организмов-обрастателей, патогенов [14], видов, дающих аномальные вспышки численности [15];
* ведение непрерывных наблюдений за динамикой расселительных стадий обрастателей и других нежелательных организмов как основы планирования защитных мероприятий;
* специализированные наблюдения за обрастанием на внешних ГТС и внутри СТВ (технический мониторинг), в том числе в ходе проведения работ по оптимизации использования биоцидных обработок.

Одним из результатов наблюдений в рамках мониторинга СТВ должно быть выявление вторичных очагов расселения нежелательных организмов, источников формируемого ими обломочного материала (биогенных наносов), оценка распределения и количественного развития обрастания в зависимости от наиболее важных параметров среды с целью выявления причин и прогноза возможного аномального развития нежелательных организмов в СТВ;

Для каждого водного объекта техно-экосистемы АЭС должен быть разработан свой экологический потенциал, который может рассматриваться как «эталон сравнения» при проведении оценок на основании данных, полученных в ходе мониторинга. Для сравнений и получения количественных критериев соответствия/несоответствия реального состояния принятому экологическому потенциалу как «эталону» может быть два подхода. Один базируется на сравнении количественных показателей по отдельным группировкам гидробионтов. Второй – на определении сходства всего списка показателей с помощью тех или иных методов определения сходства (индексы сходства) или методов кластеризации.

Важным явлением, которое необходимо контролировать в процессе мониторинга, является процесс биологических инвазий, то есть спонтанного вселения чужеродных видов организмов, иногда даже из водоемов других континентов. Анализируя литературные источники [8] было установлено, что в ВО Хмельницкой АЭС обнаружены два вида моллюсков американского происхождения, один редкий южно-азиатский вид губки, биомасса которой достигла очень высоких значений и два редких вида водорослей.

В ВО Южно-Украинской АЭС в массе развиваются донные брюхоногие моллюски тропического происхождения. Поэтому, целью организации биолого-химического мониторинга, связанного с регистрацией биологических помех и процессов, их вызывающих, является предупреждение биопомех и контроль эффективности мер их ограничения. Задачи его могут быть сформулированы в нескольких направлениях:

* контроль в системах водоснабжения за развитием организмов, вызывающих биопомехи для своевременного начала мероприятий по их устранению;
* контроль биологических факторов (хищники, паразиты) регуляции численности нежелательных видов гидробионтов;
* контроль во всей техно-экосистеме за появлением новых агентов биологических помех и развитием организмов, которые способны непосредственно или опосредованно влиять на агентов биопомех;
* контроль за экологическим состоянием источника воды, в первую очередь за процессами, обусловливающими биологические помехи.

Очевидно, что осуществлять подробное обследование ВО нецелесообразно, да и невозможно только силами специалистов природоохранных служб АЭС. Стандартом [5] предусмотрено периодическое обследование объектов мониторинга силами гидробиологов, экологов. Опыт гидробиологов, безусловно, следует использовать при организации и проведении мониторинга.

**Выводы**

1. Разработан комплекс математических моделей, предназначенный для расчетов концентраций солей металлов (консервативных веществ) и нормированных веществ, подверженных трансформации (неконсервативных веществ), характерных для систем технического водоснабжения АЭС при известных средних температурах оборотной воды. Отличие данного комплекса математических моделей заключается в том, что он может применяться как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации АЭС с целью прогноза значений показателей качества воды при различных режимах работы системы технического водоснабжения АЭС, обусловленных возможными изменениями мощности станции и комбинированным использованием объектов охлаждения оборотной воды (водоем-охладитель, брызгальные бассейны, градирни).
2. Произведено тестирование математических моделей. Сопоставление расчетных прогнозируемых концентраций и данных фактических наблюдений качественного состава воды ВО по содержанию меди показало, что прогнозируемые концентрации приближены к фактическим, а в некоторых случаях абсолютно идентичны. Максимальная ошибка составляет 30 %.
3. Предложенный математический аппарат, реализованный в виде программного продукта, целесообразно использовать в инспекционном контроле для определения недостоверных данных в годовых экологических отчетах воздействия АЭС на водные объекты, а также может быть использован в качестве тренажера для обучения, отработки действий персонала при различных режимах эксплуатации СТВ и при аварийных ситуациях природного и техногенного характера.
4. Разработаны рекомендации по регулированию качества воды и по организации биолого-химического мониторинга с целью планирования применения мер предупреждения и контроля развития организмов-обрастателей, локализации и контроля их поселений на оборудовании СТВ, также для оптимизации работы специалистов АЭС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Макаров И.И. Моделирование гидротермических процессов водоемов-охладителей ТЭС и АЭС / И.И. Макаров, А.С. Соколов, В.С. Шульман – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 174 с.
2. Усовершенствование мониторинга качества воды по содержанию тяжелых металлов в системах технического водоснабжения АЭС Украины. Этап 2. Разработка схемы нодализации системы технического водоснабжения ЗАЭС. Вывод зависимостей многолетней и сезонной динамики концентраций тяжелых металлов в воде системы технического водоснабжения: Отчет ОП НТЦ ГП НАЭК «Энергоатом», 2011. − 100 с.
3. Разработка метода расчета коэффициентов неконсервативности и трансформации нормированных веществ в воде водоемов-охладителей АЭС (стадия верификации и калибрации). Этап 3. Разработка комплекса математических моделей и их объединение в единый программный комплекс с управляющим интерфейсом для реализации таких аспектов модели, как калибрация и верификация: Отчет ОП НТЦ ГП НАЭК «Энергоатом», 2012. − 70 с.
4. Нормативный документ МИНТОПЭНЕРГО Украины. Методичні вказівки / Порядок розроблення регламенту продувки водойми-охолоджувача АЕС. / СОУ-Н ЯЭК 1.003:2006 – Киев: Министерство топлива и энергетики Украины, 2006. – 50с.
5. Мороз Н.А. Разработка математической модели для расчета водного баланса изменения концентрации примесей в воде пруда-охладителя Запорожской АЭС / Н.А. Мороз, В.А. Седнев // Сб. науч. тр. СНИЯЭиП. − Севастополь: СНИЯЭиП, 2004. − Вып. 13. – С. 133-139.
6. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of a three-demensional coastal ocean circulation model. In: Heaps, N. (Ed.), Three-demensional Coastal Ocean Model. American Geophysical Union. 1987.
7. Беженар P.В. Адаптация трехмерной численной модели «ТРИТОКС» для прогнозирования гидротермического режима водоема-охладителя Запорожской АЭС / P.В. Беженар, В.А. Мороз, Н.А. Мороз // Промышленная теплотехника. – 2013. – Т. 35. − № 3. – С. 30-38.
8. Протасов А.А. Техно-экосистема АЭС. Гидробиология, абиотические факторы, экологические оценки / Протасов А.А. [и др.]. – К.: Ин-т гидробиологии НАН Украины, 2011. – 234 с.
9. Порядок разработки регламента гидробиологического мониторинга водоема-охладителя, систем охлаждения и систем технического водоснабжения АЭС с реакторами типа ВВЭР. Методические указания / Стандарт предприятия. СТП 0.03.088-2010 ГП НАЭК «Энергоатом». - Киев, 2010. – 48с.
10. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Бактериопланктон и его продукция. Л.: ГосНИОРХ, АН СССР, 1974.
11. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зообентос и его продукция. Л.: ГосНИОРХ, АН СССР, 1983.
12. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зоопланктон и его продукция. Л.: ГосНИОРХ, АН СССР, 1982.
13. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Фитопланктон и его продукция. Л.: ГосНИОРХ, АН СССР, 1984.
14. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Задачи и методы изучения использования кормовой базы рыбой. Методы оценки кормовой базы рыб. Л.: ГосНИОРХ, АН СССР, 1984.
15. Инструкции и методические рекомендации по сбору и обработке биологической информации в районах исследований ПИНРО. Мурманск. Изд-во ПИНРО, 2001.