

УДК 004.942.3

АДАПТАЦИЯ КОМПЛЕКСА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗА ГИДРОХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ ХМЕЛЬНИЦКОЙ АЭС

В.А. Мороз¹, Н.А. Мороз¹, к.т.н., Г.И. Наземцева², ст. препод.

¹Научно-технический центр НАЭК «Энергоатом», г. Киев

²Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

Выполнена адаптация комплекса математических моделей гидрохимического режима системы оборотного водоснабжения АЭС, позволяющая осуществлять калибровку, верификацию и прогностические расчеты изменения качества воды в пруде-охладителе Хмельницкой АЭС. Разработана схема подлинции системы технического водоснабжения Хмельницкой АЭС.

Введение

Актуальной задачей при строительстве новых энергоблоков на Хмельницкой АЭС (ХАЭС) является осуществление прогнозирования (моделирование) состояния воздушных, водных и наземных экосистем. В настоящее время широко используются такие методы, как натурно-экспериментальное моделирование, математическое (в т.ч. численное) моделирование, системное моделирование [1]. В связи со сложностью математизации сложных биологических и экологических объектов были взяты на вооружение методы кибернетики (системное моделирование и системный анализ).

Системный анализ - это стратегия научного поиска, использующая математические методы и модели, но в рамках систематизированного научного подхода к решению сложных проблем. Применение системного анализа предполагает методологию исследования объектов посредством представления их в качестве отдельных элементов и анализа этих элементов [2]. По существу системный анализ, таким образом, организует наши знания об объекте, что облегчает выбор нужной стратегии и предсказания результатов той или иной стратегии для принятия определенного решения.

Системы технического водоснабжения (СТВ) АЭС и обычно входящие в них водоемы-охладители (ВО) характеризуются, согласно существующей классификации [3, 4], малым временем оборота воды. Поэтому при расчетах гидрохимического режима первостепенное значение имеет определение изменения средних (по пространству) величин показателей качества воды во времени, которые с учетом указанных выше факторов обобщены на основе закона сохранения массы в соответствующих уравнениях, решение которых используются для выполнения необходимых расчетов. Эти принципы положены в основу расчетов гидрохимического режима СТВ АЭС.

Свой вклад в формирование гидрохимического режима вносят также внутриводоемные процессы – деятельность биоты, сорбция веществ на взвеси, взмучивание и седиментация взвеси. Интегральное влияние этих процессов традиционно отображалось в уравнениях для динамики веществ коэффициентами

неконсервативности. В последние годы для отображения влияния биоты использовалось описание процессов трансформации азотсодержащих веществ в цепочках ее питания. В рамках этого описания представление о коэффициентах неконсервативности трансформировалось в коэффициенты трансформации, которые описывают скорость перехода массы вещества из воды в другое соединение. Естественно, что для привлечения такого описания необходимо наличие соответствующих данных натурных измерений.

Расчеты гидрохимического режима предполагают определение концентраций веществ, характеризующих не только солевой режим, как предусмотрено в [3, 4], но и концентрации биогенных элементов и показателей качества воды, нормируемых в охране вод (с учетом их неконсервативности и трансформации), что качественно отличает математическую модель (ММ) от моделей [5, 6]. В ММ предусмотрено определение концентраций веществ трех видов: формально консервативных веществ, неконсервативных веществ и неконсервативных веществ с последовательной трансформацией.

В случае если в водный объект (пруд, река и т.п.) поступает определенная масса вещества, согласно закону сохранения массы, возможны два события при отсутствии внешних источников:

1) за время наблюдения масса вещества не изменилась. В этом случае говорят, что в данных условиях, в данном водном объекте данное вещество является консервативным;

2) за время наблюдения масса вещества изменилась. В этом случае говорят, что в данных условиях, в данном водном объекте данное вещество является неконсервативным. При этом отмечается, что в водном объекте имеет место изменение массы другого вещества; значит, часть первого вещества трансформировалась во второе вещество. Коэффициент пропорциональности между первоначальной массой и ее дефицитом назван коэффициентом трансформации.

Специалистами ОП НТЦ ГП НАЭК «Энергоатом» совместно с Украинским научно-исследовательским институтом экологических проблем г. Харьков разработан комплекс математических моделей прогноза гидрохимического состояния воды пруда-охладителя Запорожской АЭС [7]. Данный комплекс математических моделей верифицирован, согласован и утвержден в Министерстве экологии и природных ресурсов Украины исх. письмом № 1974/08/10-13 от 06.02.2013 г. «Щодо погодження комплексу математичних моделей».

Учитывая значительный рост техногенной нагрузки на пруд-охладитель Хмельницкой АЭС в результате эксплуатации двух энергоблоков, в целях прогноза качества воды в случае строительства и эксплуатации новых энергоблоков, целесообразно произвести адаптацию комплекса математических моделей под условия системы технического водоснабжения ХАЭС.

Постановка цели и задач научного исследования

Цель научного исследования – произвести адаптацию комплекса математических моделей под условия пруда-охладителя Хмельницкой АЭС в целях прогнозирования качества воды.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) разработать схему нодализации системы технического водоснабжения Хмельницкой АЭС;

2) выполнить адаптацию комплекса математических моделей под условия системы технического водоснабжения (СТВ) ХАЭС, позволяющую осуществлять калибровку, верификацию и прогностические расчеты изменения качества воды в пруде-охладителе;

3) произвести сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных.

Разработка схемы нодализации системы технического водоснабжения Хмельницкой АЭС

Структурное отображение физических взаимодействий в системе «ХАЭС – водоем-охладитель – река Горынь», учитываемое техногенными и природными факторами, представлено схемой нодализации системы технического водоснабжения АЭС, которая является физической моделью для математического моделирования изменения концентраций химических показателей и составления соответствующей математической модели определения концентраций тяжелых металлов в водных объектах АЭС.

На основе схемы нодализации системы технического водоснабжения АЭС, представленной на рисунке, составлены модель и алгоритм решения уравнений определения концентрации в объектах СТВ Хмельницкой АЭС с учетом факторов водохозяйственного баланса и установлено, что построение таких моделей позволяет упростить решение инженерных задач за счет представления системы в виде конечного набора, связанных расчетных элементов. В пределах каждого расчетного элемента параметры зависят от функции времени. Таким образом, сложные системы частных производных преобразуются в систему обыкновенных дифференциальных уравнений.

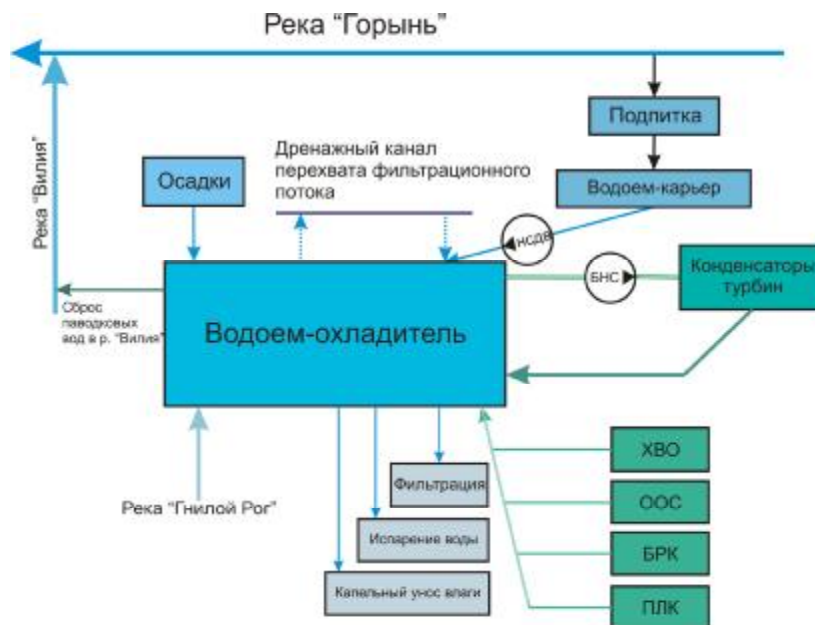


Рис. Схема нодализации системы технического водоснабжения ХАЭС

На рисунке приведены следующие обозначения: БНС – береговая насосная станция; БРК – бак радиационного контроля; НСДВ – насосная станция добавочной воды; ООС – общегородские очистные сооружения; ПЛК – промышленная ливневая канализация; ХВО – химводоочистка.

Формирование гидрохимического режима в СТВ АЭС происходит в основном в ВО согласно схеме нодализации СТВ. Из анализа приведенной на рисунке схемы следует, что вся вода, используемая в СТВ, проходит через водоем-охладитель и, следовательно, уравнения сохранения могут быть сформированы в приближении «точечной» задачи. Поскольку взаимодействие загрязняющих веществ с донными отложениями ВО является одним из существенных факторов формирования системы «вода – дно», необходимо отметить следующее:

- средний расход оборотной воды через каждый энергоблок ХАЭС составляют порядка $40 \text{ м}^3/\text{с}$. Для двух блоков суммарный расход – порядка $80 \text{ м}^3/\text{с}$. Подобная величина расхода оборотной воды при относительно небольшом размере водоема-охладителя обеспечивает эффективное взмучивание и перемешивание взвешенных частиц [7];

- каждое загрязняющее вещество имеет собственную константу сорбционного равновесия по отношению к доминирующему типу взмученных и привнесенных извне взвешенных веществ (осадки, ливневый сток, очистные сооружения и т.д.). Если бы перечисленные выше физико-химические процессы являлись основным механизмом формирования динамики концентраций загрязняющих веществ, то необходимо было бы решать пространственную задачу, как, например, в работе [6];

- опыт моделирования подобных задач требует распределения годового временного цикла на четыре временных (сезонных) отрезков. Данное распределение обусловлено в основном температурным режимом и режимом освещенности, которые влияют на активность деятельности биоты водоема и, следовательно, косвенно формируют величины коэффициентов неконсервативности.

Перечисленные выше особенности указывают на актуальность и необходимость определения этих коэффициентов для каждого сезона в целях учета влияния перечисленных выше внутриводоемных процессов на динамику концентраций исследуемых веществ.

Адаптация комплекса математических моделей под условия системы технического водоснабжения Хмельницкой АЭС

Исходные уравнения для расчета гидрохимического режима основаны на законе сохранения массы и для описанных условий выражаются в виде уравнения баланса воды (1) и баланса вещества примеси (2):

$$\frac{dW}{dt} = \sum_i Q_i + Q_{oc} - Q_{исп} - Q_s, \quad (1)$$

где W – текущий суммарный объем водоема-охладителя и других объектов системы оборотного технического водоснабжения, м^3 ;

t – время, с;

Q_{oc} – расход воды осадков, $\text{м}^3/\text{с}$;

Q_s – суммарный расход воды, уходящей из водоема со всеми потерями (фильтрация, продувка, и т.п.);

Q_i – расход воды от различных источников (с учетом их знака: «плюс» – приток, «минус» - отток);

$Q_{исп}$ – суммарные потери воды на испарение.

В общем случае, суммарные потери воды на испарение учитывают потери с

поверхности водоема-охладителя ($Q_{ис}$), на брызгальных бассейнах ($Q_{исб}$), если последние находятся в едином оборотном цикле с водоемом.

Все расходы учитываются в $\text{м}^3/\text{с}$

$$\frac{d(C \cdot W)}{dt} = \sum_i Q_i \cdot C_i + Q_{oc} \cdot C_{oc} - Q_s \cdot C - k \cdot C \cdot W + F_c, \quad (2)$$

где C – текущая концентрация показателя качества воды в водоеме-охладителе, $\text{г}/\text{м}^3$;

C_i – концентрация показателя качества воды в i -м источнике воды, поступающей в ВО (данными источниками, в частности, могут быть технологические установки химической водоочистки, вода подпитки, сточные воды очистных сооружений, вода рек, ручьев и т.п.), $\text{г}/\text{м}^3$ ($i = 1, 2, \dots$);

k – коэффициент неконсервативности для неконсервативных веществ [5], $1/\text{сут}$;

F_c – интенсивность источника (положительного или отрицательного) поступления в ВО рассматриваемого вещества вне учитываемых составляющих водного баланса, $\text{г}/\text{сут}$.

Преобразуем уравнения (1) и (2), введем вспомогательные коэффициенты M , R для упрощения выражения:

$$M = (\sum_i Q_i \cdot C_i + Q_{oc} \cdot C_{oc} + F_c) / W; \quad R = (\sum_i Q_i + Q_{oc} - Q_{исп}) / W.$$

В результате получим уравнение

$$\frac{dC}{dt} = M - R \cdot C - k \cdot C, \quad (3)$$

Для решения уравнения (3) необходимо знание искомой концентрации вещества в начальный момент времени (начальные условия), то есть, $C(t = 0) = C_0$, а также всех (кроме C) величин, входящих в правую часть уравнения (3), которые в общем случае должны быть известны и могут зависеть от времени, включая синхронизированный со временем объем водоема-охладителя W .

Уравнение (3) является дифференциальным уравнением первого порядка, методы интегрирования которого известны [8], в частности, для общего случая удобен достаточно точный и вычислительно устойчивый метод Рунге-Кутты с формулами аппроксимации четвертого порядка. Данный метод используется в расчетной части настоящей математической модели.

Сравнительный анализ экспериментальных измерений и расчетных данных

Комментируя сопоставление расчетных и измеренных значений показателей качества воды, отметим, что величины коэффициентов неконсервативности получены для 2009 г., а верификационные расчеты концентраций выполнялись для 2011 - 2012 гг. в целях наиболее жесткой проверки модели. Очевидно, что при уточнении этих величин по натурным измерениям 2011 - 2012 гг. говорить о жесткой проверке не приходится. Сопоставление рассчитанных значений (табл.) на конец каждого сезонного временного отрезка и данных натурных измерений для показателей качества воды ВО ЗАЭС указывает на удовлетворительное их совпадение, что подтверждает высокую точность адаптированной и описанной выше математической модели. В тех случаях, когда на исследуемом временном отрезке натурные данные водного баланса и балансов массы вещества не обеспечивали значительную динамику (в натурных данных) исследуемого показателя, имело место незначительное расхождение между расчетами и натурными изме-

рениями. Фактически расчеты выявляли в этом случае или ошибки в измерениях, или наличие в ВО неучтенного источника загрязнения данным веществом. Например, характерным является рост концентрации фосфатов в вегетативный период, связанный с активным использованием удобрений и последующим смывом их в ВО. Однако как источник поступления этот механизм в исходных данных не учтен. Аналогичные объяснения могут быть отнесены и к ряду других показателей.

Т а б л и ц а

**Оценки погрешности верификационных расчетов по сравнению с данными
натурных измерений**

№ п/п	Название вещества	Средняя погрешность, %									
		сезоны 2011 г.				сезоны 2012 г.				2011 г.	2012 г.
		зима	весна	лето	осень	зима	весна	лето	осень		
1	рН	5	6,6	0	10,7	8,2	4,0	5,4	3,5	5,8	5,2
2	Растворенный кислород	10,0	7,7	4,3	0	0	25,0	10,3	13,2	5,5	12,3
3	БПК ₅	5,5	10,0	5,6	8,2	6,2	0	8,2	4,1	7,3	4,6
4	ХПК	0	8,2	15,35	7,5	12,6	5,3	2,3	5,2	7,8	6,4
5	АПАВ	7,1	0	0	4,2	0	33,3	25,0	17,6	2,8	19,8
6	Натрий	0	19,3	15,8	5,2	5,4	1,4	17,0	6,6	10,1	7,6
7	Калий	0	12,9	0	0	1,7	5,2	14,0	17,6	3,2	9,6
8	Кальций	2,6	0	1,6	0	0	13,5	52,5	5,3	1,0	17,83
9	Магний	1,3	8,3	3,7	9,1	9,2	11,9	40,5	0	5,6	15,4
10	Железо общее	0	15,7	11,7	11,1	0	5,6	0	0	9,6	1,4
11	Медь	15,0	10,1	18,1	8	10	9,0	11,0	10,4	10,2	10,1
12	Марганец	5,9	28,6	10,5	0	0	0	5,3	0	11,3	1,3
13	Цинк	0	11,1	9,1	9,1	11,1	4,4	2,2	9,1	7,3	6,7
15	Фториды	2,6	21,3	13,2	30,4	16,0	0	14,3	7,9	16,9	9,6
16	Нитраты	21,6	0	15,4	0	0	0	30,2	0	9,3	7,6
17	Азот аммонийный	11,1	0	0	0	34,6	26,9	3,2	17,9	2,8	20,7
18	Хлориды	2,7	14,8	8,9	0	11,4	4,7	0	6,7	6,6	5,7
19	Сульфаты	2,6	0,4	3,4	16,3	8,4	7,3	14,6	2,8	5,7	8,3
20	Фосфаты	22,5	21,8	21	13,3	16,9	13,8	25,9	20,4	20	19,25
21	Нефтепродукты	0	25,9	4,2	26,3	0	47,4	10,0	0	14,1	14,4
22	Минерализация	6,0	11,2	0	6,9	8,6	5,4	5,6	4,6	6,0	6,1

Учитывая помесечные скачки температур, изменения режимов эксплуатации энергоблоков и т.п., естественно проводить сравнения со значениями измерений на стыке двух месяцев – последнего месяца расчетного сезона и первого месяца последующего сезона. При таком подходе, как показывают данные в сопоставительных таблицах, результаты расчетов попадают в интервал данных натурных измерений. Для таких показателей качества воды, как рН, БПК₅, ХПК, натрий, кальций, железо общее, марганец, цинк, нитраты, хлориды, сульфаты, минерализация расхождения между измеренными и рассчитанными значениями концентраций на этапе проведения верификации находится в интервале 5...10 %. Для таких показателей, как растворенный кислород, АПАВ, азот аммонийный, кальций, магний, нефтепродукты, расхождения между измеренными и рассчитанными значениями концентраций в различные сезоны 2011, 2012 гг. находятся в интервале 1...20 %.

Выводы

Практическое значение работы заключается в том, что адаптированный математический аппарат прогнозирования качества воды позволит:

– на стадии эксплуатации регулировать качество воды путем изменения расходов подпитки, продувки таким образом, чтобы обеспечить уменьшение температуры охлаждающей воды и чтобы концентрации химических показателей не выходили за значения ПДК, ПДС, тем самым будут выполняться законодательные природоохранные требования;

– на стадии проектирования новых энергоблоков на промплощадке ХАЭС более точно оценить расходы продувки и подпитки пруда-охладителя, по значениям которых спроектировать гидротехнические сооружения при соответствующих сечениях каналов: длине, глубине и ширине.

Результаты данной работы целесообразно применить в инспектировании водных объектов АЭС.

АДАПТАЦІЯ КОМПЛЕКСУ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗУ ГІДРОХІМІЧНОГО РЕЖИМУ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ДЛЯ ХМЕЛЬНИЦЬКОЇ АЕС

В.А. Мороз, Н.А. Мороз, Г.І. Наземцева

Виконана адаптація комплексу математичних моделей гіdroхімічного режиму системи оборотного водопостачання АЕС, що дає можливість виконувати калібрацію, верифікацію і прогностичні розрахунки зміни якості води в ставку-охолоджувачі Хмельницької АЕС. Розроблена схема нодалізації системи технічного водопостачання Хмельницької АЕС.

ADAPTATION of MATHEMATICAL FORECASTING MODELS COMPLEX of TECHNICAL WATER SUPPLY SYSTEM HYDRO CHEMICAL CONDITIONS for the KHMELNITSKY NPP

V. Moroz, N. Moroz, G. Nasemzeva

The mathematical forecasting models complex was adapted to the hydro chemical conditions of the NPP' reverse water supply system, that enables to carry out the calibration, verification and calculation of water quality changes in the Khmelnsky NPP' cooling pond. The nodalization scheme of the Khmenitsky NPP' technical water supply was developed.

Список использованных источников

1. *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.

2. *Богобоящий В.В.* Принципи моделювання та прогнозування в екології: підручник / В.В. Богобоящий, К.Р. Курбанов, П.Б. Палій, В.М. Шмандій. – К., 2004. – 216 с.

3. *Еременко Е.В.* Моделирование качества воды мелководных водоемов с малым временем водооборота / Е.В. Еременко, Л.И. Лавриненко, В.Е. Лысенко // Комплексные водоохранные мероприятия: сб. – Харьков: ВНИИВО, 1991. – С. 36 - 42.

4. 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.

5. 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.

6. *Беженар Р.В.* Адаптация трехмерной численной модели «ТРИТОКС» для прогнозирования гидротермического режима водоема-охладителя Запорожской АЭС / Р.В. Беженар, В.А. Мороз, Н.А. Мороз // Промышленная теплотехника. – 2013. – Т. 35. – № 3. – С. 30 - 38.

7. *Мороз В.А.* Разработка комплекса математических моделей прогноза гидрохимического состояния системы технического водоснабжения АЭС / В.А. Мороз, Н.А. Мороз, Л.И. Лавриненко, В.С. Кресин // Зб. наук. пр. СНУЯЕтаП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2013. – Вып. 2 (46). – С. 45 – 51.

8. *Караушев А.В.* Теория и методы расчета речных наносов / А.В. Караушев. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 271 с.

Надійшла до редакції 05.09.2013 р.

УДК 658.562.5:621.311.25

АНАЛИЗ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ НА АЭС

**А.А. Скидан, к.т.н., доц., Н.И. Кузнецова, доц., Н.В. Серова-Нашева, к.т.н.,
Т.Н. Шлай, студ.**

Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

Рассмотрены методы неразрушающего контроля (МНК) различных материалов, применяемых на атомных электростанциях. Приведена подробная классификация каждого вида применяемой на энергообъектах дефектоскопии. Произведен анализ МНК по следующим критериям: стоимость, опасность для здоровья, возможность дистанционного контроля (автоматизации), применяемость на АЭС, представлены возможности комплексного контроля несколькими методами одновременно. Проведенные исследования дали возможность аккумулировать имеющиеся сведения о каждом методе и путем оценивания каждого из них представить их эффективность в зависимости от исследуемого материала. Представленные в табличной форме результаты помогут быстро и главное с большой степенью точности подобрать необходимый МНК в зависимости от конкретных условий. Проанализированы основные достоинства, а также выделены очевидные недостатки дефектоскопии, что также позволяет более полно оценить возможность и, главное, эффективность ее применения.

Введение

Проблема обеспечения максимально возможного срока службы, "замедления" старения энергетических систем, продления их сроков эксплуатации в условиях жестко ограниченных средств (финансовых возможностей, технических, человеческих ресурсов и др.) является одной из наиболее актуальных проблем для ученых, экономистов и технических специалистов различных стран. Последствия возникновения отказов, неисправностей или дефектов в таких системах могут приводить к трагическим последст-