

УДК 004.942.3.1

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗА ГИДРОХИМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ АЭС

В.А. Мороз¹, Н.А. Мороз², Л.И. Лавриненко³, В.С. Кресин³

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

²Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

³Украинский научно-исследовательский институт экологических проблем, г. Харьков

Приведены особенности математического моделирования качества воды системы технического водоснабжения АЭС. Разработан комплекс математических моделей гидрохимического режима системы оборотного водоснабжения АЭС, позволяющий осуществлять калибровку, верификацию и прогностические расчеты.

Введение

Актуальность работы заключается в том, что система технического водоснабжения (СТВ) оказывает существенное влияние на работу АЭС в процессе эксплуатации. Температура охлаждающей воды, ее биологические и химические показатели 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 материальных потерь АЭС [1 - 3]. Поэтому целесообразно разработать инструмент (математический аппарат) для получения прогнозных данных, с помощью которых можно сделать комплексную оценку возможных последствий при различных технологических режимах эксплуатации СТВ АЭС (включая аварийные ситуации и аварии).

Постановка цели и задач научного исследования

Цель научного исследования – разработать комплекс математических моделей прогноза гидрохимического режима воды СТВ АЭС.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) изучить особенности математического моделирования гидрохимического режима системы технического водоснабжения АЭС с учетом коэффициентов неконсервативности и трансформации.
- 2) выполнить математическое моделирование изменения качества воды СТВ АЭС, позволяющее осуществлять калибровку, верификацию и прогностические расчеты.
- 3) выполнить сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных.

Особенности математического моделирования гидрохимического режима системы технического водоснабжения АЭС с учетом коэффициентов неконсервативности и трансформации

Системы технического водоснабжения АЭС и обычно входящие в них водоемы-охладители (ВО) характеризуются, согласно существующей классификации [1, 2], малым временем оборота воды.

Водооборот в ВО обычно составляет несколько (3 - 5) суток, а это, в свою очередь, создает условия для хорошего перемешивания водных масс, что вызывает выравнивание показателей качества воды в пространстве. 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 используется 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 взвешях, взмучивание и седиментация взвесей. 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 не только описывали скорость ухода массы вещества из воды, но и скорость перехода этой массы вещества в другое соединение. Естественно, что для привлечения такого описания необходимо наличие соответствующих данных натурных измерений.

Расчеты гидрохимического режима предполагают определение не только концентраций веществ, характеризующих солевой режим, как предусмотрено в [2, 3], но и концентраций биогенных элементов и показателей качества воды, нормируемых в охране вод (с учетом их неконсервативности и трансформации), что качественно отличает математическую модель (ММ) от моделей [2, 3]. 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.

Формирование гидрохимического режима в СТВ АЭС происходит в основном в ВО согласно схеме нодализации СТВ. Из анализа приведенной схемы [4] 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:

– расходы оборотной воды через каждый энергоблок составляют порядка $50 \text{ м}^3/\text{с}$. Для шести блоков суммарный расход – порядка $300 \text{ м}^3/\text{с}$. Подобная величина расхода оборотной воды при относительно небольшом размере водоема-охладителя обеспечивает эффективное взмучивание и перемешивание взвешенных частиц [5];

– 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 перечисленные выше физико-химические процессы являлись бы основным механизмом формирования динамики концентраций загрязняющих веществ, то необходимо было бы решать пространственную задачу, как, например, в работах [6];

– очевидно, что для рассматриваемого объекта (ЗАЭС) уже в первые годы работы станции произошло достижение некоего «среднего» сорбционного равновесия (т.е. сорбционное насыщение), с одной стороны, и формирование определенной смеси взвешенных веществ, с другой стороны. В случае влияния перечисленных выше процессов взмучивания, седиментации и сорбции незначительно и по своей величине сопоставимо с эффектом «неконсервативности» для исследуемых загрязняющих веществ. При этом также очевидно, что для каждого сезона величины коэффициентов неконсервативности будут отличаться, как под влиянием температуры, так и под влиянием изменения интенсивности деятельности «биоты».

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.

Математическое моделирование гидрохимического режима водоема-охладителя АЭС

Практика подобных исследований показывает, что для некоторых показателей в отдельные сезоны возможно получение отрицательных значений для коэффициентов неконсервативности [7], как по указанным выше причинам, так и за счет поступления веществ от неучтенных при натурных измерениях источников.

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 СОТВ, м³;

t – время, с;

Q_{oc} – расход воды осадков, м³/с;

Q_s – суммарный расход воды, уходящей из водоема со всеми потерями (фильтрация, продувка, унос с брызгальных бассейнов и градирен 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 ($Q_{исб}$) и градирнях ($Q_{исг}$), если последние находятся в едином оборотном цикле с водоемом.

Все расходы учитываются в м³/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, г/м³;

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.), г/м³ ($i = 1, 2, \dots$);

k – коэффициент неконсервативности для неконсервативных веществ [3], 1/сут;

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

Из двух уравнений (1) и (2) следует уравнение для определения концентрации веществ $C = C(t)$:

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

где

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

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 (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 [7], в частности, для общего случая удобен достаточно точный и вычислительно устойчивый метод Рунге-Кутты с формулами аппроксимации четвертого порядка. Этот метод используется в расчетной части настоящей математической модели.

Метод Рунге-Кутты в приложении к дифференциальному уравнению вида $C' = f(t, C)$ используется для решения задачи расчета гидрохимического режима. Введем обозначения при начальном условии $C(t = 0) = C_0$ и шаге Δt :

$$t_0 + j \cdot \Delta t = t_j \quad C(t_j) = C(t_0 + j \cdot \Delta t) = C_j \quad f(x_j, C_j) = f_j, \quad (4)$$

где ($j = 0, 1, 2, \dots$).

Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных

Прежде чем комментировать сопоставление расчетных и измеренных значений показателей качества воды, отметим, что величины коэффициентов неконсервативности получены для 2005 г., а верификационные расчеты концентраций выполнялись для 2008 - 2009 гг. в целях наиболее жесткой проверки модели [2]. Очевидно, что при уточнении этих величин по натурным измерениям 2008 - 2009 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 разработанной 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 измерениями. 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. Помимо этого необходимо принимать во внимание то, что нам не известны даты проведения измерений – начало, середина или конец месяца. В то же время полученные нами расчеты выполнялись на последнее число каждого месяца.

Т а б л и ц а

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

№ п/п	Название вещества	Средняя погрешность, %									
		за сезоны 2008 г.				за сезоны 2009 г.				за 2008 г.	за 2009 г.
1	рН	0	11,6	0	10,7	8,2	4,7	4,6	3,5	5,6	5,3
2	Раствор. кислород	10,0	7,7	4,3	0	0	25,0	10,3	13,2	5,7	13,6
3	БПК ₅	5,5	10,7	4,9	8,2	6,2	0	8,2	4,1	7,3	4,9
4	ХПК	0	8,2	15,3	7,5	12,6	5,3	2,3	5,2	7,8	6,4
5	АП АВ	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	17,8
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	40,9	58,5	33,3	38,5	18,5	48,9	61,5	53,4	42,8	45,4
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
14	Никель	22,5	25,5	20,0	9,1	10,0	20,0	27,8	27,1	19,3	21,2
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	70,8	0	12,3	56,9	13,8	25,9	20,4	26,4	29,3
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, возможную смену количества работающих 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 стабильно попадают в интервал 5...10 %. Для таких показателей, как растворенный кислород, АП АВ, азот аммонийный, кальций, магний, никель, фториды, нефтепродукты расхождения между измеренными и рассчитанными значениями концентраций в

различные сезоны 2008, 2009 гг. попадают в интервал 1...20 %. Для фосфатов расхождения между измеренными и рассчитанными значениями концентраций попадают в интервал 1...30 %. Для меди расхождения между измеренными и рассчитанными значениями концентраций попадают в интервал 20...50 %.

Анализ натурных данных для 2005 г. при вычислении коэффициентов неконсервативности показал наличие несоответствия между концентрациями этих веществ в притекающей в ВО воде и динамикой концентраций этих показателей в водоеме.

В первую очередь это относится к таким показателям, как медь и никель. Принимая во внимание, что эти вещества хорошо сорбируются на взвешах, а «свежие» взвеси пополняются за счет поверхностного стока и подпитки, равенство нулю коэффициентов неконсервативности для этих показателей означает, что их наличие в притекающих водах отражено неполно или же с той погрешностью, которая отмечена выше. Очевидно, что при постоянном использовании этой модели указанные расхождения в силу самообучаемости модели будут уменьшены до пределов погрешности соответствующих измерений.

В целом за верификационный период времени получены следующие средние отклонения в %: рН – 5,45 %; железо общее – 5,5 %; минерализация – 6,05 %; БПК₅ – 6,1 %; хлориды – 6,15 %; марганец – 6,3 %; калий – 6,4 %; сульфаты – 7,0 %; цинк – 7,0 %; ХПК – 7,1 %; нитраты – 8,45 %; натрий – 8,85 %; кальций – 9,4 %; растворенный кислород – 9,65 %; магний – 10,5 %; АПАВ – 11,3 %; азот аммонийный – 11,75 %; фториды – 13,25 %; нефтепродукты – 14,25 %; никель – 20,25 %; фосфаты – 27,85 %; медь – 44,1 %.

Выводы

В результате выполненных численных расчетов установлено, что разработанный комплекс математических моделей, реализованный в программном комплексе, позволяет:

- выполнять определение сезонной динамики коэффициентов трансформации и неконсервативности;
- выполнять с высокой точностью расчеты сезонной динамики концентрации нормированных веществ в водоеме-охладителе;
- определять наличие неучтенных источников поступления нормированных веществ и интенсивность их поступления.

Разработанный комплекс математических моделей верифицирован, согласован и утвержден в Министерстве экологии и природных ресурсов Украины письмом Министерства экологии и природных ресурсов Украины исх. № 1974/08/10-13 от 06.02.2013 г. «Щодо погодження комплексу математичних моделей».

РОЗРОБКА КОМПЛЕКСУ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗУ ГІДРОХІМІЧНОГО СТАНУ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ АЕС

В.А. Мороз, Н.А. Мороз, Л.І. Лавриненко. В.С. Кресін

Наведені особливості математичного моделювання якості води системи технічного водопостачання. Розроблено комплекс математичних моделей гідрохімічного режиму води системи технічного водопостачання АЕС, що дозволяє здійснювати калібрування, верифікацію та прогностичні обчислення.

DEVELOPMENT of MATHEMATICAL PREDICTION MODELS COMPLEX of HYDROCHEMICAL CONDITIONS for NPP' TECHNICAL WATER SUPPLY SYSTEMS

V. Moroz, N. Moroz, L. Lavrinenko, V. Kresin,

The water quality mathematical modelling features for the NPP' system of the technical water supply have been described. It was developed the complex of mathematical prediction models for the hydro chemical conditions of the NPP' water supply system that enables the calibration, verification and prediction calculations.

Список использованных источников

1. Методические основы оценки антропогенного влияния на качество поверхностных вод / Под ред. А.В. Караушева. - Л.: Гидрометеиздат, 1987. - 286 с.
2. Разработка метода расчета коэффициентов неконсервативности и трансформации нормированных веществ в воде водоемов-охладителей АЭС (стадия верификации и калибровки). Этап 3. Разработка комплекса математических моделей и их объединение в единый программный комплекс с управляющим интерфейсом для реализации таких аспектов модели как калибровка и верификация: Отчет ОП НТЦ ГП НАЭК «Энергоатом». - 2012. - 70с.
3. Методические указания по прогнозированию химического состава и накипеобразующих свойств охлаждающей воды электростанций. РД 34.37.307-87 / ПО «Союзтехэнерго». - М., 1989.
4. 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.
5. *Караушев А.В.* Теория и методы расчета речных наносов / А.В. Караушев. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 271 с.
6. *Беженар Р.В.* Адаптация трехмерной численной модели ТРИТОКС для прогнозирования гидрохимического режима водоема-охладителя Запорожской АЭС / Р.В. Беженар, Н.А. Мороз, Л.Л. Савелий // 3б. наук. пр. СНУЯЕтаП – Севастополь: СНУЯЭиП, 2012. – Вып. 1 (41). – С. 70 - 76.
7. *Еременко Е.В.* Моделирование качества воды мелководных водоемов с малым временем водооборота / Е.В. Еременко, Л.И. Лавриненко, В.Е. Лысенко // Комплексные водоохранные мероприятия. – Харьков: ВНИИВО, 1991. – С. 36 - 42.

Надійшла до редакції 24.05.2013 р.