

3. Фрог Б.Н. Водоподготовка / Б.Н. Фрог, А.П. Левченко. – М.: МГУ, 1996. – 53 с.
4. Вихрев В.Ф. Водоподготовка / В.Ф. Вихрев, М.С. Шкроб. – М.: Энергия, 1973. – 416 с.
5. Замыслова Т.Н. Химическая технология теплоносителя на АЭС / Т.Н. Замыслова. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2012. – 84 с.
6. Введение в аналитическую химию и физико-химические методы анализа: пособие для обучаемого. – Нетешин: Изд-во Хмельницкой АЭС, 1997. – 255 с.
7. Водоподготовка: справочник / Под ред. С.Е. Беликова. – М.: Аква-Терм, 2007. – 240 с.

Надійшла до редакції 01.03.2013 р.

УДК 004.942.3

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ВОДОЕМОВ-ОХЛАДИТЕЛЕЙ АЭС

В.А. Мороз¹, Р.В. Беженар², Г.И. Наземцева³

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

²Институт проблем математических машин и систем, г. Киев

³Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

Произведен сравнительный анализ математических моделей теплообмена в системе «вода - атмосфера» в целях выбора наиболее точной сходимости с данными измерений. Показано, что расхождение между расчетными значениями поверхностной температуры воды и экспериментальными данными существенно зависит от применяемой модели теплообмена воды с атмосферой. Приведены результаты моделирования гидротермического режима пруда-охладителя Запорожской АЭС.

Введение

Характерной особенностью водоемов-охладителей (ВО) АЭС может оказаться снижение уровня воды (осушение) в результате прекращения подпитки. Доказательством послужила аварийная ситуация, произошедшая в декабре 2011 г. на Запорожской ТЭС. В результате порыва циркуляционных водоводов диаметром 1800 мм и отключения циркуляционных насосов на блочной насосной станции сработала система технологической защиты, вследствие чего были отключены работающие второй и четвертый блоки тепловой станции. Так как система технического водоснабжения ЗАЭС взаимосвязана с эксплуатацией ЗаТЭС, в результате временной остановки ТЭС была прекращена подпитка пруда-охладителя Запорожской АЭС.

Учитывая высокую квалификацию персонала Запорожской АЭС и своевременное принятие мер по преодолению внештатной ситуации, удалось продолжить работу с наименьшими потерями.

Данный инцидент произошел в зимний период времени, но если бы аварийная ситуация произошла в летний период, то ущерба было бы больше. В случае прекращения подпитки пруда-охладителя изменился бы не только гидротермический режим, но и гидрохимический, скорость которого зависит от температуры.

Поэтому данная работа актуальна, так как математическое моделирование позволит спрогнозировать качество воды водоема при различных режимах эксплуатации АЭС, и при соответствующих условиях в будущем.

Постановка цели и задач научного исследования

Цель научного исследования – изучить особенности математического моделирования гидротермического режима водоема-охладителя АЭС.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Произвести анализ математических моделей теплообмена между водой и атмосферой.
2. Адаптировать модель «ТРИТОКС» под условия пруда-охладителя Запорожской АЭС для описания изменения температуры воды.
3. Произвести сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных.

Анализ математических моделей теплообмена в системе «атмосфера - вода»

Для корректного моделирования теплового режима мелких водоемов большое значение имеет детальное описание тепловых потоков как между атмосферой и поверхностью воды, так и между водой и донными отложениями [1]. Также необходимо учесть распространение света в водном слое. Единственным источником охлаждения циркуляционной воды в пруде-охладителе является атмосфера. Поэтому чрезвычайно важно правильно математически описать теплообмен между водой и атмосферой. Существует множество моделей теплообмена воды с атмосферой. В данной работе авторы рассмотрели математические модели с наиболее точной сходимостью с данными экспериментальных измерений.

Поток теплоты через поверхность водоема Q включает в себя поток солнечной радиации Q_s , затраты тепла на испарение Q_e , турбулентный поток теплоты Q_h и баланс длинноволнового излучения Q_b :

$$Q = (1 - g)Q_s + Q_e + Q_h + Q_b. \quad (1)$$

Поток солнечной радиации Q_s , который зависит от температуры воздуха, угла падения солнечных лучей, альбедо, влажности, облачности, давления насыщенного водяного пара в воздухе, атмосферного давления, рассчитывался согласно соотношениям, приведенным в [2]:

$$Q_s = \begin{cases} a'(1-a)K \left(\frac{(\cos q + 2.7)r \times e(T_a)}{P_a S_0 \cos^2 q} + \frac{1.085 \cos q + 0.1}{S_0 \cos^2 q} \right)^{-1} \left(\frac{\bar{d}}{d} \right), & \cos q > 0, \\ 0, & \cos q \leq 0. \end{cases} \quad (2)$$

где $S_0 = 1370 \text{ Вт/м}^2$ – солнечная постоянная; $\alpha' = 0.9$, $\alpha = 0.06$ – альбедо; θ – угол падения солнечных лучей; n – облачность; T_a – температура воздуха; P_a – атмосферное давление; r – относительная влажность; $e(T_a)$ – давление насыщенного водяного пара в воздухе при температуре T_a , которая аппроксимируется следующей формулой:

$$e(T_a) = 611 \times 10^{7.5(T_a - 273.15)/(T_a - 35.86)}. \quad (3)$$

Отношение среднегодового расстояния между Солнцем и Землей \bar{d} к текущему расстоянию d в формуле (2) аппроксимируется соотношением согласно [3].

Баланс длинноволнового излучения Q_b имеет ту же природу, что и излучение абсолютно черного тела. Он включает сумму обратного излучения поверхностью воды и отраженного от облаков излучения, которое возвращается в воду. Данный поток рассчитывается на основе закона Стефана-Больцмана с поправками на облачность и относительную влажность:

$$Q_b = (1 - 0,75n^{0,75}) \left(\sigma \bar{T}_a^4 \times 0,05 \sqrt{0,01r \times e(T_a)} - 0,4 + 4\sigma \bar{T}_a^3 (T_a - T_s) \right), \quad (4)$$

где $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана; T_s – температура поверхности водоема; \bar{T}_a – абсолютная атмосферная температура.

Согласно теории приземного слоя Монина-Обухова, турбулентный поток тепла Q_h и затраты тепла на испарение Q_e рассчитываются в виде

$$Q_h = c_{pa} r_a \kappa U_*^s \frac{T_a - T_s}{\ln \frac{z_a}{z_0} - y_h}, \quad (5)$$

$$Q_e = r_a L_v \kappa U_*^s \frac{q_a - q_s}{\ln \left(\frac{\kappa U_*^s z_a}{c_a} + \frac{z_a}{z_0} \right) - y_h}, \quad (6)$$

где c_{pa} – удельная теплоемкость воздуха; z_a – высота измерений над поверхностью воды; L_v – удельная теплота парообразования; $c_a = 2,4 \cdot 10^{-5}$ м²/с – коэффициент молекулярной диффузии воздуха; r_a – плотность воздуха, $\kappa = 0,4$ – постоянная Кармана; z_0 – шероховатость поверхности водоема, q_a и q_s – удельная влажность на высоте z_a и у поверхности воды соответственно

$$q_a = \frac{0,622r \times e(T_a)}{P_a - 0,378r \times e(T_a)}, \quad q_s = \frac{0,622 \times e(T_s)}{P_a - 0,378 \times e(T_s)}. \quad (7)$$

В формулах (5) – (6) также используется динамическая скорость U_*^s , которая описывается согласно теории Монина-Обухова, и безразмерная функция числа Ричардсона y_h , которая определяется в зависимости от стратификации.

Описания потока солнечной радиации в виде (2) и длинноволнового излучения в виде (4) основываются на основных физических законах и могут использоваться при любых условиях. Тогда как турбулентный поток теплоты и поток теплоты за счет испарения зависят от внешних условий, например, относительной влажности над водоемом. Эти потоки в виде (5), (6) применимы для естественных водоемов. Над прудами-охладителями АЭС формируется особый микроклимат, который существенно отличается от окружающих условий обычных водоемов. Поэтому в данной работе рассматриваются и другие способы параметризации турбулентного потока теплоты и потока теплоты за счет испарения.

Следующий вариант представлен в модели теплообмена с атмосферой, которая используется в известной трехмерной численной модели термогидродинамики

Принстонского университета РОМ [4]. В ней турбулентный поток теплоты и поток теплоты за счет испарения описываются с помощью следующих соотношений:

$$Q_h = c_{pa} r_a C_T U_*^m (T_a - T_s), \quad (8)$$

$$Q_e = r_a L_v C_T U_*^m (q_a - q_s), \quad (9)$$

где параметр C_T и динамическая скорость U_*^m определяются итерационно.

Третий способ параметризации турбулентного потока теплоты и потока теплоты за счет испарения представлен в работе [5]:

$$Q_h = c_{pa} r_a C_H V_0 (T_a - T_s), \quad (10)$$

$$Q_e = r_a L_v C_E V_0 (re(T_a) - e(T_s)) \frac{0,622}{P_a}, \quad (11)$$

где $C_H = C_E = 1,1 \times 10^{-3}$; V_0 – скорость ветра.

Адаптация модели «ТРИТОКС» для описания изменения температуры воды пруда-охладителя Запорожской АЭС

Модель ТРИТОКС описывает движение несжимаемой жидкости с помощью системы усредненных по Рейнольдсу уравнений движения и неразрывности, записанных в приближениях Буссинеска и гидростатики. Детальное описание уравнений модели и граничных условий представлено в предыдущих работах авторов [6]. Для численных расчетов моделью «ТРИТОКС» пруд-охладитель ЗАЭС был покрыт трехмерной расчетной сеткой (рис. 1). При этом каждой точке соответствовала глубина, полученная в результате интерполяции с карты реальных глубин водоема. Горизонтальное разрешение сетки изменялось от 50 м в районе оттока воды со сбросного канала до 200 м в отдаленных областях.

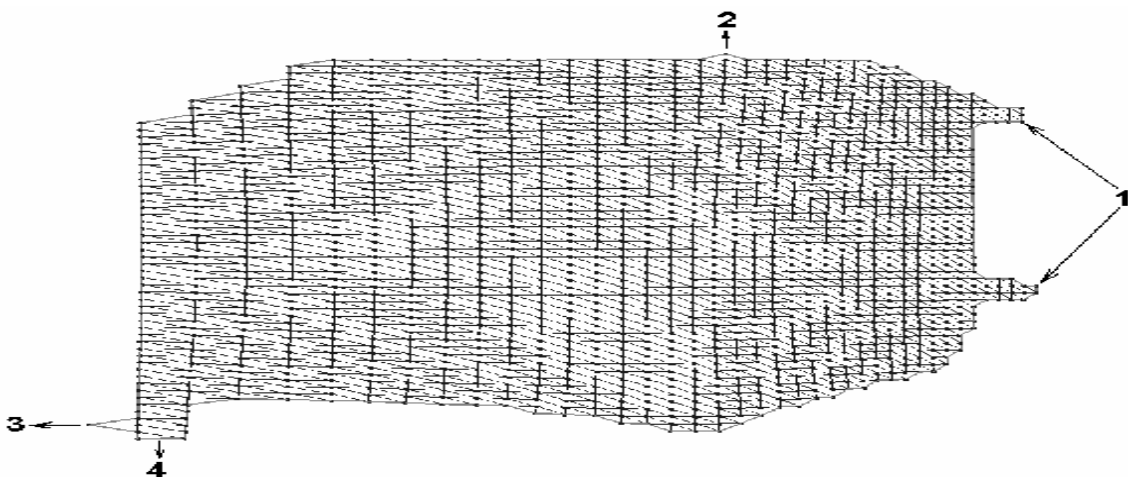


Рис. 1. Горизонтальная расчетная сетка, построенная в криволинейной ортогональной системе координат. Цифрами обозначены открытые границы: 1 – приток воды в ВО со сбросного канала; 2, 3 и 4 – отток воды с ВО на градирни, в Каховское водохранилище через канал продувки и в подводный канал, соответственно

Расчет проводился с использованием реальных значений расхода и температуры воды со сбросного канала (рис. 2), а также расходов воды на градирни, в Каховское водохранилище через канал продувки и в подводящий канал (рис. 3).

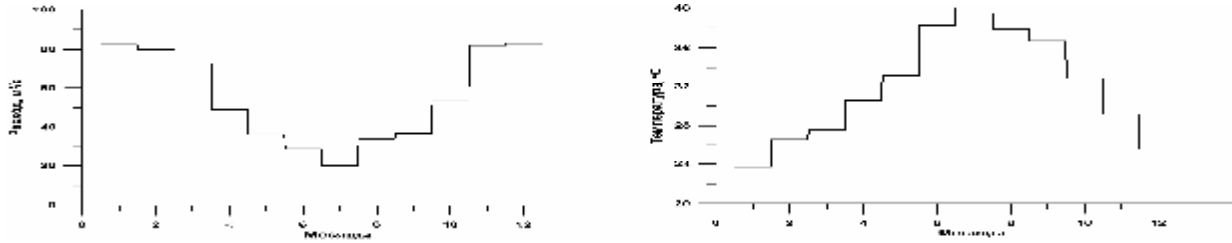


Рис. 2. Расход и температура воды со сбросного канала в пруд-охладитель ЗАЭС

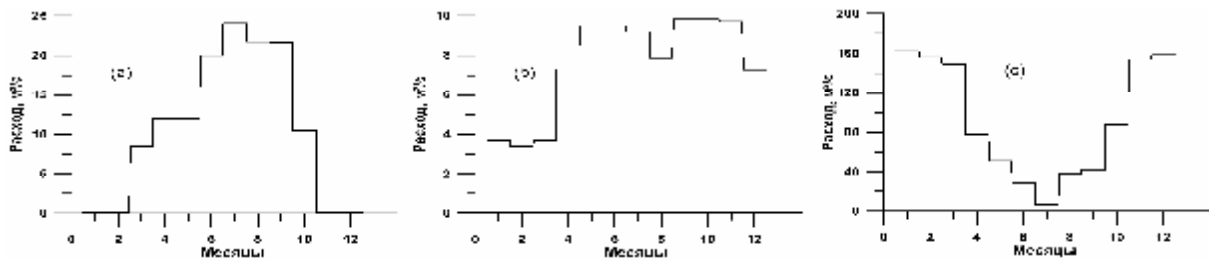


Рис. 3. Расходы воды с пруда-охладителя ЗАЭС на градирни (а), в Каховское водохранилище через канал продувки (б) и в подводящий канал (с)

В качестве метеорологических условий использовались среднемесячные значения температуры воздуха, скорости и направления ветра, относительной влажности и облачности для 2009 года в районе ЗАЭС (табл. 1). Также использовалось постоянное атмосферное давление 0,1 МПа.

Т а б л и ц а 1

Среднемесячные метеорологические условия в районе ЗАЭС для 2009 года

Месяц	Температура воздуха, °С	Скорость ветра, м/с	Направление ветра	Относительная влажность	Относительная облачность
Январь	-3,0	6,2	С	0,84	0,72
Февраль	1,7	4,0	ССВ	0,83	0,73
Март	4,6	3,5	ВСВ	0,79	0,67
Апрель	11,3	3,3	В	0,68	0,60
Май	16,7	3,4	ВЮВ	0,63	0,54
Июнь	24,2	2,8	ЮЮВ	0,64	0,49
Июль	26,0	2,7	Ю	0,63	0,41
Август	22,7	2,6	ЮЮЗ	0,62	0,38
Сентябрь	19,2	4,2	ЗЮЗ	0,67	0,42
Октябрь	13,0	3,2	З	0,75	0,53
Ноябрь	6,8	3,5	ЗСЗ	0,84	0,77
Декабрь	0,2	3,6	ССЗ	0,87	0,81

Результаты численных расчетов и их сравнение с измерениями

На рис. 4 представлены результаты моделирования адаптированной модели гидротермодинамики ТРИТОКС под водоем-охладитель ЗАЭС, а именно визуализация распределения температуры поверхностного слоя воды пруда-охладителя Запорожской АЭС за 2009 г. (Для наглядности показаны поверхностные поля температуры на 15-е число каждого месяца).

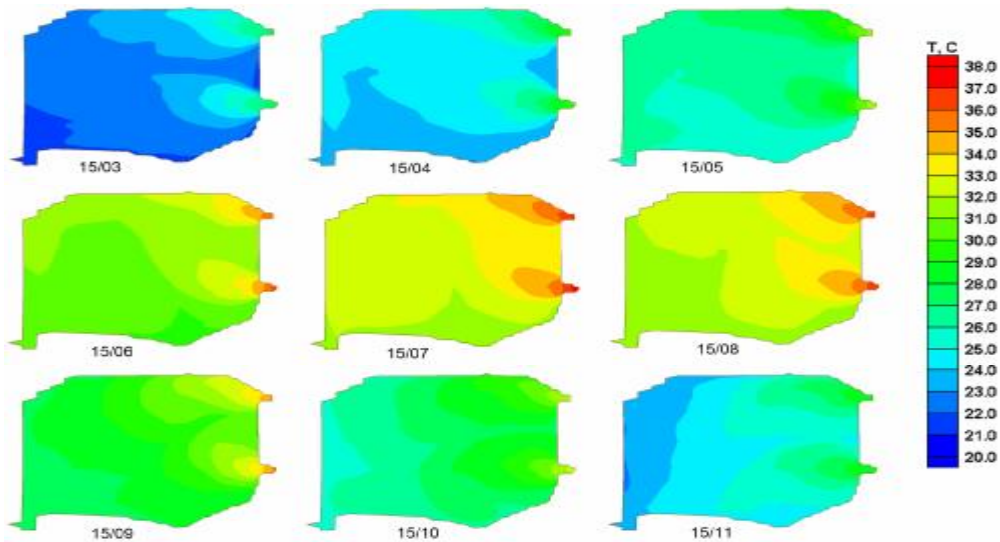


Рис. 4. Визуализация распределения температуры поверхностного слоя воды пруда-охладителя ЗАЭС за период 2009 г.

Произведен сравнительный анализ результатов моделирования адаптированной модели ТРИТОКС для водоема-охладителя ЗАЭС с экспериментальными данными температуры воды ВО (рис. 5). Сравнение проводилось для двух точек: водозабора на градирни (точка 2 на рис. 1) и продувки в Каховское водохранилище (точка 3 на рис. 1).

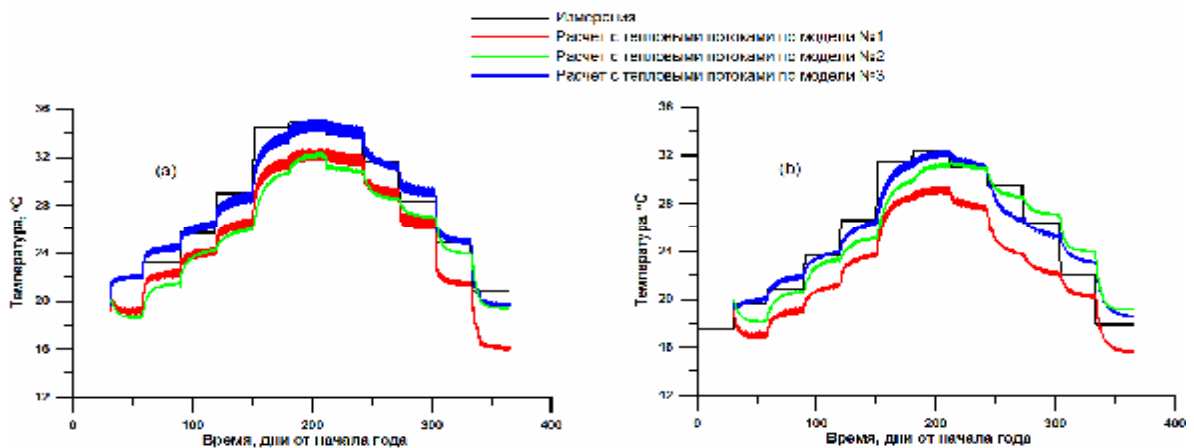


Рис. 5. Сравнение рассчитанной температуры в точке водозабора на градирни (а) и в точке продувки в Каховское водохранилище (б) с соответствующими измерениями

Выяснено, что температурный режим ВО лучше всего описывает третья модель теплообмена с атмосферой. Согласно статистической обработке результатов, представленной в табл. 2 и 3, среднее отклонение среднемесячной рассчитанной

температуры с использованием третьей модели теплообмена с атмосферой от измеренной температуры в точке водозабора на градирни составляет 0,15 °С, а в точке продувки в Каховское водохранилище – 0,1 °С. Среднеквадратические отклонения составляют 0,8 °С и 1,0 °С соответственно, что значительно меньше, чем при использовании других моделей теплообмена с атмосферой.

Т а б л и ц а 2

Сравнение среднемесячной рассчитанной и измеренной температуры в точке водозабора на градирни

Месяц	Измеренная температура, °С	Температура по модели теплообмена № 1, °С	Температура по модели теплообмена № 2, °С	Температура по модели теплообмена № 3, °С
Февраль	-	19,32878	18,90874	21,89101
Март	23,3	22,03757	21,08897	24,20417
Апрель	25,7	23,81503	23,7194	26,00647
Май	29,0	26,09776	25,56979	28,21615
Июнь	34,5	30,69643	29,67842	32,75253
Июль	35,0	32,0416	31,87867	34,43087
Август	33,8	31,7797	30,98867	34,08348
Сентябрь	31,6	29,29788	28,94297	31,57961
Октябрь	28,3	26,523	27,26677	29,15713
Ноябрь	24,9	21,60072	24,31964	25,06757
Декабрь	20,9	16,54653	19,88421	20,02737
Среднее отклонение		2,6	2,4	0,15
Среднеквадратическое отклонение		2,8	2,7	0,8

Т а б л и ц а 3

Сравнение среднемесячной рассчитанной и измеренной температуры в точке продувки в Каховское водохранилище

Месяц	Измеренная температура, °С	Температура по модели теплообмена № 1, °С	Температура по модели теплообмена № 2, °С	Температура по модели теплообмена № 3, °С
Февраль	19,6	17,17221	18,41148	19,80528
Март	20,8	18,74057	20,16858	21,50175
Апрель	23,6	20,74207	22,73199	23,47911
Май	26,6	23,19537	24,63636	25,79691
Июнь	31,4	27,54482	28,68123	30,10692
Июль	32,4	28,9848	30,88235	31,91037
Август	31,0	27,92743	31,07826	31,31822
Сентябрь	29,5	24,53523	29,01504	27,64572
Октябрь	26,4	22,53073	27,3658	25,70871
Ноябрь	22,1	20,59827	24,33193	23,56542
Декабрь	17,9	16,31004	19,63219	19,32026
Среднее отклонение		3,0	0,4	0,1
Среднеквадратическое отклонение		3,2	1,5	1,0

Выводы

1. Анализируя результаты моделирования гидротермического режима водоема-охладителя Запорожской АЭС, можно отметить, что расхождение между расчетными данными поверхностной температуры воды и измерениями зависит от применяемой модели теплообмена воды с атмосферой. Наиболее точно данные экспериментальных измерений воспроизводятся при параметризации турбулентного потока тепла и потока тепла за счет испарения согласно работе Росати-Миякоды (1988). При этом среднее отклонение среднемесячной расчетной температуры от измеренной температуры составляет $0,1 \dots 0,15$ °С, а среднеквадратическое отклонение $0,8 \dots 1,0$ °С.

2. На основании выполненных расчетов адаптированной модели «ТРИТОКС» и сравнительного анализа прогнозных и экспериментальных данных температуры воды ВО ЗАЭС установлено, что приведенный математический аппарат хорошо описывает процесс изменения температуры воды и может быть использован для определения оптимальных значений параметров продувки для обеспечения требований температурного и солевого режима водоема-охладителя АЭС.

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОТЕРМІЧНОГО РЕЖИМУ ВОДОЙМ-ОХОЛОДЖУВАЧІВ АЕС

В.А. Мороз, Р.В. Беженар, Г.І. Наземцева

Зроблено порівняльний аналіз математичних моделей теплообміну в системі «вода - атмосфера» з метою вибору найбільш точної збіжності з даними вимірювань. Показано, що розбіжність між розрахованими значеннями поверхневої температури води і експериментальними даними суттєво залежить від застосовуваної моделі теплообміну води з атмосферою. Наведено результати моделювання гідротермічного режиму ставка-охолоджувача Запорізької АЕС.

MODELING PROPERTIES of HYDROTHERMAL CONDITIONS in NPP' COOLING PONDS

V. Moroz, R. Bezhenar, G. Nasemzeva

The comparative analysis of the mathematical models of the heat exchange between water and atmosphere has been carried out having for an object the choice of the most convergence with measurement data. The divergence between calculated values of water surface temperature and experimental data is shown to be considerably depended on the applicable model of water heat exchange with the atmosphere. Modeling of hydrothermal conditions of Zaporozhe' NPP cooling pond has been resulted.

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. *Zillmann J.W.* A study of some aspects of the radiation and the heat budgets of the southern hemisphere oceans / J.W. Zillmann. – Bur. Of Meteorol., Dept. of the Interior, Canberra, Australia, 1972. – 562 p. – (Meteorol. Stud., 26.)

3. *Paltridge G.W.* Radiative processes in Meteorology and climatology / G.W. Paltridge, C.M.R. Platt. – New York: Elsevier Scientific publishing company, 1976. – 311 p.

4. *Mellor G.L.* User's guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model / G.L. Mellor. – Princeton University, 2003. – 53 p.

5. *Rosati A.* General circulation model for upper ocean simulation / A. Rosati, K. Miyakoda // *J. Phys. Ocean.* – 1988. – 18. – P. 1601 - 1626.

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 // *Зб. наук. пр. СНУЯЭтаП.* – Севастополь: СНУЯЭиП, 2012. – Вып. 1 (41). – С. 70 – 76.

Надійшла до редакції 24.01.2013 р.

УДК 502.3:630.20

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВЫБРОСОВ ИЗ ГРАДИРНИ С УЧЕТОМ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

В.В. Радкевич, А.Г. Трифонов

*ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований «Сосны»
НАН Беларуси*

Представлены модель и программный модуль расчета динамики распространения технологических выбросов из градирни с учетом влагосодержания окружающей среды. Проведены моделирование и расчеты полей концентрации капель в вертикальном сечении градирни и прилегающей поверхности с и без учета эффекта туманообразования.

Введение

Производство электрической энергии на атомных электростанциях связано с отводом большого количества теплоты, для чего возводятся башенные градирни, брызгальные бассейны, воздухоуловители-охладители.

Общая система отвода теплоты состоит, в зависимости от температурного уровня, из ряда стадий, на каждой из которых применяются различные технические средства. Значительную долю этих средств занимают системы водяного охлаждения.

В практике охлаждения оборотной воды широко используют испарительное охлаждение воды в градирнях. При испарительном охлаждении вода в градирне течет в виде пленки или капель, при этом испаряется 1,2 %, и таким образом, основное количество теплоты (до 85,90 %) передается от воды воздуху за счет массообмена. Остальная теплота – путем конвективного теплообмена. Оба процесса протекают одновременно, оказывая друг на друга взаимное влияние.

Интенсивность работы градирни зависит от условий, которые предоставляются для поверхностного испарения воды в ней. В связи с этим можно выделить два типа величин, влияющих на испарительное охлаждение:

- величины, зависящие от условий внешней среды;
- величины, зависящие от конструкции охладителя (градирни).

К первому виду относятся влагосодержание наружного воздуха, температура воды поступающей на охлаждение, скорость ветра.