

УДК 556.555.4

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КАЛИНИНСКОЙ АЭС НА ГИДРОТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ Р. СЪЕЖА

А.Н. Семчуков¹, О.В. Задонская²

¹Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул,

²Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург,

E-mail: ¹ss16011973@inbox.ru, ²ov-zadon@yandex.ru

С помощью плановой модели выполнены расчеты гидротермического режима водоемов-охладителей Калининской АЭС – озер Песьво и Удомля – для различных сценариев работы станции и гидрометеорологических данных различной обеспеченности как при трех, так и при четырех работающих энергоблоках. Определены критерии перегрева воды р. Съежа, вытекающей из озер, и выполнена оценка этого перегрева для различных расчетных сценариев. Сделана оценка изменения гидротермического режима р. Съежа после пуска четвертого энергоблока. Предложен способ уменьшения перегрева и оценена его эффективность.

Ключевые слова: водоем-охладитель; математическое моделирование; плановая модель; гидротермический режим; Калининская АЭС; тепловая нагрузка; воздействие на окружающую среду.

DOI: 10.24412/2410-1192-2023-17004

Дата поступления: 28.07.2023. Принята к печати: 14.08.2023

Температура воды является одним из главных факторов, определяющих качество воды и жизнедеятельность водной экосистемы. Поэтому большое значение имеет оценка изменения температуры воды в водоемах и водотоках вследствие антропогенного воздействия.

Данная статья посвящена работе по моделированию гидротермического режима водоемов-охладителей Калининской АЭС в годовом цикле при различных режимах работы станции, гидрометеорологических условиях и конфигурациях гидротехнических сооружений, выполненной в ГГИ и ИВЭП СО РАН в 2009–2011 гг. Главной задачей этой работы была оценка перегрева воды в р. Съежа, вытекающей из водоемов,

после пуска 4-го энергоблока станции и завершения строительства струенаправляющей дамбы, а также выработка предложений по уменьшению этого перегрева.

Калининская АЭС расположена в Тверской области, в северо-восточной части Валдайской возвышенности, и имеет 4 энергоблока, установленной мощностью по 1000 МВт, запущенных в эксплуатацию в 1984, 1986, 2004 и 2011 гг. К северо-западу от станции находятся соединенные протокой водоемы-охладители, а именно сравнительно мелководное озеро Песьво и расположенное к северо-востоку от него более глубокое озеро Удомля (см. рис. 1).

Подогретая вода от станции частично поступает в юго-восточную часть

оз. Песьво, а частично – в южную часть залива оз. Удомля, расположенного около протоки. Забор воды осуществляется из южной части оз. Удомля, причем рядом расположена дополнительная точка сброса, куда поступает охлажденная вода из двух градирен. Все описанные точки сброса и забора воды уже функционировали к моменту ввода в эксплуатацию четвертого энергоблока и, соответственно, учитывались во всех расчетах.

В северно-западной части оз. Удомля находится струенаправляющая дамба (в сочетании с береговым каналом), которая была достроена в 2010 г. непосредственно перед пуском четвертого энергоблока. Соответственно, расчеты водоемов-охладителей при трех работающих энергоблоках велись с учетом короткой, недостроенной дамбы, в результате чего подогретая вода

из оз. Песьво и залива попадала не в северную, а в среднюю часть оз. Удомля, расположенную ближе к водозабору. Наряду с дамбой, для запуска четвертого энергоблока были построены две дополнительные градирни, в которых был спроектирован замкнутый водооборот, что также должно было улучшить охлаждение воды, а значит и ограничить перегрев воды в р. Съежа.

Озера Песьво и Удомля имеют несколько небольших притоков, сток из водоемов происходит по р. Съежа. Исток реки находится на севере залива в западной части оз. Удомля, около протоки, соединяющей два озера. В 1987 г. р. Съежа была зарегулирована плотиной, после чего НПУ (нормальный подпорный уровень) озер составляет 156.55 м БС, при этом площадь озера Песьво и Удомля – 9.0 км² и 13.6 км², а их средняя глубина – 6.40 и 11.71 м соответственно.

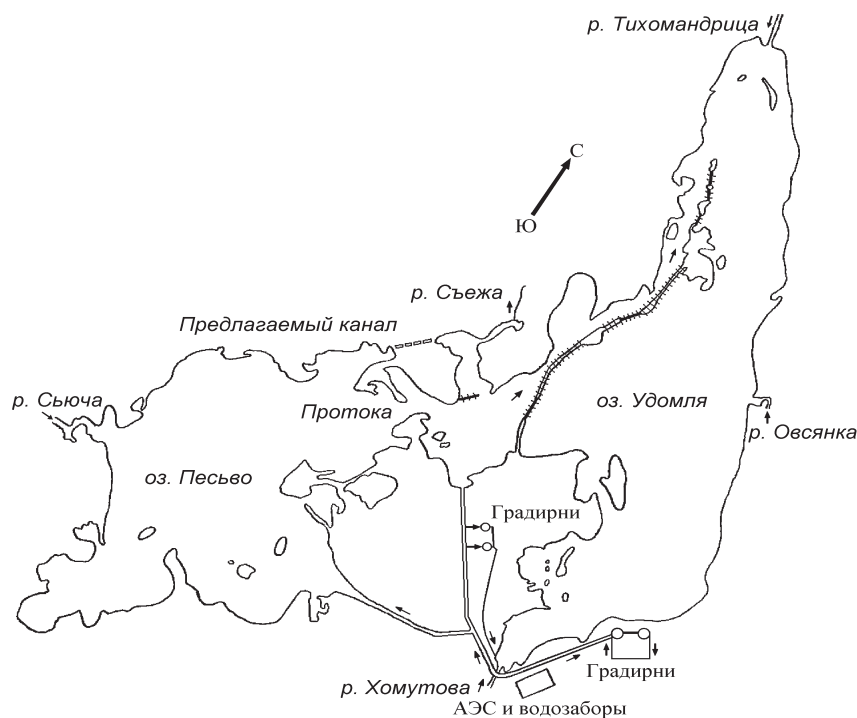


Рис. 1. Проект водоохлаждающей системы Калининской АЭС (с водоемами-охладителями) после пуска четвертого энергоблока

Fig. 1. The Kalinin Nuclear Power Plant water-cooling system design (with cooling ponds) after the fourth power unit commissioning

По интенсивности внешнего водообмена озера относятся к водоемам аккумулятивно-транзитной группы с коэффициентом условного водообмена около 1.

Работа АЭС обеспечила большую интенсивность внутреннего водообмена в озерах-охладителях. Водная масса из южной части оз. Удомля, постоянно подогреваясь в среднем на 6–12°C, перекачивается через АЭС в юго-восточную часть оз. Песьво и западную часть оз. Удомля при циркуляционных расходах порядка 100–200 м³/с, при том, что средний расход Съежи составляет порядка 2 м³/с.

Математическая модель

Математическому моделированию гидротермического режима водоемов-охладителей Калининской АЭС посвящен ряд работ, например [Александров и др., 1992; Архипов и др., 1995; Кякк, 2004], в которых, в зависимости от решаемой задачи и располагаемых вычислительных ресурсов, использовались модели различной размерности.

В связи со сравнительно малой глубиной и сложной формой водоемов, особенно в районе истока р. Съежа, а также для экономии машинного времени в данной работе расчеты выполнялись по двумерной-горизонтальной (плановой) модели на основе нестационарных уравнений Сен-Венана, близкой к использованной в [Александров и др., 1992]. Модель предусматривает усреднение гидрофизических параметров по глубине и описывает изменение во времени распределения течений, температуры воды, толщины льда и снега по акватории водоема, обусловленное воз-

действием АЭС, речными притоками, стоком воды в реку Съежу и взаимодействием с атмосферой.

Модель включает уравнение неразрывности (3), описывающее изменение уровня свободной поверхности воды, два динамических уравнения для компонент горизонтальной скорости течения (1, 2) и уравнение для температуры воды (4).

Эти уравнения учитывают следующие процессы: адвективный и турбулентный перенос массы, тепла и импульса, действие гидростатического давления вследствие пространственной неоднородности уровня свободной поверхности, трение о дно и лед, ветровое напряжение и действие силы Кориолиса.

$$\frac{\partial Q_1}{\partial t} + \frac{\partial u_1 Q_1}{\partial x_1} - l Q_2 = -gH \frac{\partial z}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_1} HK \frac{\partial u_1}{\partial x_1} - \frac{r|Q|Q_1}{H^2} + k_w |w| w_1; \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial t} + \frac{\partial u_2 Q_2}{\partial x_2} + l Q_1 = -gH \frac{\partial z}{\partial x_2} + \frac{\partial}{\partial x_2} HK \frac{\partial u_2}{\partial x_2} - \frac{r|Q|Q_2}{H^2} + k_w |w| w_2; \quad (2)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q_1}{\partial x_1} + \frac{\partial Q_2}{\partial x_2} = q_a; \quad (3)$$

$$\frac{\partial HT}{\partial t} + \frac{\partial Q_a T}{\partial x_a} = \frac{\partial}{\partial x_a} HD \frac{\partial T}{\partial x_a} + \frac{\Phi}{\rho c_p}. \quad (4)$$

В данных уравнениях идет суммирование по индексу α , где $\alpha = 1, 2$. Здесь t – время; x_1, x_2 – пространственные координаты; z – уровень свободной поверхности воды; H – глубина водоема (подо льдом); u_i, Q_i – компоненты скорости и удельного расхода воды (скорость, умноженная на глубину), $i = 1, 2$; l – параметр Кориолиса; r – коэффициент трения о дно и лед, определяемый по формуле Маннинга; K, D – коэффициенты турбулентной вязкости и турбулентной теплопроводности; T – температура воды; Φ – поток тепла через свободную поверхность водоема при отсутствии ледового покрова, или поверхность раздела воды и

льда при его наличии; q_a – влагообмен с атмосферой (осадки за вычетом испарения); ρ , c_p – плотность и удельная теплоемкость воды; k_w – коэффициент сопротивления водной поверхности ($k_w = 0$ при наличии льда); w_i – компоненты вектора скорости ветра; g – ускорение свободного падения.

Также модель дополнена уравнениями, описывающими изменение толщины снежного и ледового покровов во времени.

При отсутствии ледового покрова теплообмен с атмосферой рассчитывается на основе методики Харлемана [Rayan et al, 1974], применяемой для подогреваемых водоемов. При этом учитывается солнечная радиация, длинноволновая радиация атмосферы и водной поверхности, потоки тепла, обусловленные испарением и атмосферной конвекцией, перенос тепла испаряющейся водой и атмосферными осадками (в случае их учета в водном балансе).

Расчет толщины льда ведется независимо для каждой точки акватории с использованием методики [Wake, Rumer, 1979], дополненной учетом снежного покрова.

Предполагается, что температура нижней поверхности льда всегда равна температуре замерзания воды, а вертикальное распределение температуры в снежно-ледовом покрове непрерывно, причем линейно как по толщине льда, так и по толщине снега. Температура на верхней поверхности снежно-ледового покрова также находится из условия непрерывности теплового потока. То есть поток тепла между снежно-ледовым покровом и атмосферой должен быть равен потоку тепла через его толщину. При этом данная температура должна быть не выше температуры замерзания.

Если совместное выполнение этих условий невозможно, искомая температура считается равной температуре замерзания и идет таяние сверху сначала снега, потом льда. Считается, что образующаяся при этом талая вода, не скапливается на поверхности, а проникает вниз через поры льда.

Теплообмен снежно-ледового покрова с атмосферой определяется аналогично случаю открытой воды, а поток тепла из воды в лед считается пропорциональным отклонению ее температуры от температуры замерзания. За счет разности этого потока и потока тепла через снежно-ледовый покров происходит наращивание или таяние льда снизу.

Моментом исчезновения снежно-ледового покрова считается достижение льдом нулевой толщины, а моментом возникновения – достижения водой температуры замерзания. Ускоренное разрушение тонкого льда имитируется увеличением коэффициента теплообмена между водой и льдом.

Модель требует задания граничных и начальных условий. На берегах водоемов задается условие непротекания. В устьях отводящих каналов (т.е. в точках поступления подогретой воды в озера), в устьях притоков, на водозаборах и в истоке р. Съежа задается расход воды; в устьях притоков – температура воды; в устьях отводящих каналов – приращение температуры (по отношению к усредненной температуре на водозаборах); в истоке р. Съежа и на водозаборах – нулевой градиент температуры. Также на всех границах водоема предполагаются равными нулю турбулентные потоки импульса и тепла. В качестве начальных условий необходимо задать распределение переменных модели по акватории водоема.

Вычислительный метод

Плотность воды считается постоянной. Если пренебречь изменением толщины снежно-ледового покрова в течение временного расчетного шага, это позволяет последовательно решать систему уравнений для течения воды (уравнение неразрывности, динамические уравнения), уравнение для переноса тепла и уравнения для изменения толщины снега и льда.

Для расчета используется полу неявная конечно-разностная схема второго порядка точности по пространству и времени на равномерной прямоугольной разнесенной сетке, близкая к использованной в [Backhous, 1983; Duwe et al, 1983].

На каждом временном шаге сначала решаются уравнения для течения воды. Пространственные производные аппроксимируются центральными разностями. Основные факторы, порождающие течение (градиент уровня воды, трение о дно и лед в динамических уравнениях, градиент расхода в уравнении неразрывности) аппроксимируются полу неявно, с использованием значений как на текущем, так и на следующем временном слое. Остальные члены берутся явно, то есть на текущем временном слое. Полученные таким образом выражения для значений удельного расхода на новом временном слое подставляются в разностный аналог уравнения неразрывности, и итоговая система линейных уравнений решается методом верхней релаксации. Для повышения устойчивости и точности во времени используется метод «предиктор-корректор».

После вычисления параметров течения на следующем временном слое вы-

числяется температура воды, для чего используется аналогичный метод, но в этом случае все факторы, определяющие изменение температуры воды, аппроксимируются полу неявно.

Температура верхней поверхности снежно-ледового покрова вычисляется методом Ньютона. Температура верхней поверхности снежно-ледового покрова или поток тепла через свободную поверхность воды (при отсутствии льда) точно вычисляется один раз в несколько временных шагов, а на промежуточных шагах уравнения для их определения линейризуются относительно температуры поверхности снежно-ледового покрова или воды соответственно.

Входные данные и верификация модели

При расчетах использовались среднемесячные значения гидрометеорологических параметров, причем гидрологические параметры (расходы и температура притоков, расход Съежи) и параметры работы станции (циркуляционные расходы и приращение температуры на них, потери воды на гидирнях и брызгальных бассейнах), а также осадки задавались кусочно-постоянными, а остальные метеорологические элементы аппроксимировались квадратичным сплайном с сохранением среднемесячных значений.

В большинстве случаев расчет начинался с 1 мая и велся на 13 месяцев, причем первый месяц отводился на сглаживания ошибок задания начальных данных и в анализе полученных результатов не участвовал. На начало расчета задавалось состояние покоя, отсутствие льда и снега и постоянная по акватории температура воды, примерно соответствующая реаль-

ному состоянию водоемов на тот момент времени. В расчетах использовалась равномерная прямоугольная сетка с размером ячейки 42 на 42 м (всего более 12 тыс. ячеек, занятых водой). Шаг по времени составлял 90 с.

На рис. 2 приведены результаты верификации модели, а именно сопоставление расчетной температуры в истоке р. Съежа с измеренной температурой за май 2009 г.– август 2010 г. Разность между вычисленными и наблюдаемыми значениями колебалась в пределах 0.3–1.8°C, составив в среднем 0.9°C. Однако в апреле и мае она доходила до 2.8–4.2°C. Это может быть связано в числе прочего с существованием в период весеннего нагревания значительной вертикальной термической неоднородности, с использованием в расчетах среднемесячных данных, а также, возможно, с тем, что при увеличении сброса в Съежу

более теплая и легкая вода из сбросного канала в западной части озера Удомля проходит туда поверх воды из озера Песьво, недостаточно с ней перемешиваясь.

Согласно [Методика..., 2007] после выпуска очищенных сточных вод температура воды в водных объектах рыбохозяйственного назначения не должна превышать ее естественные значения более чем на 5°C и не должна не больше 28°C летом и 8°C зимой. Соответственно в наших оценках под величиной перегрева р. Съежа понималось превышение ее температуры над критической температурой, которая в свою очередь была на 5°C выше естественной. Однако остается вопрос, что считать ее естественной температурой. В данной работе использовалось два варианта определения естественной температуры р. Съежа и, соответственно, два варианта расчета перегрева.

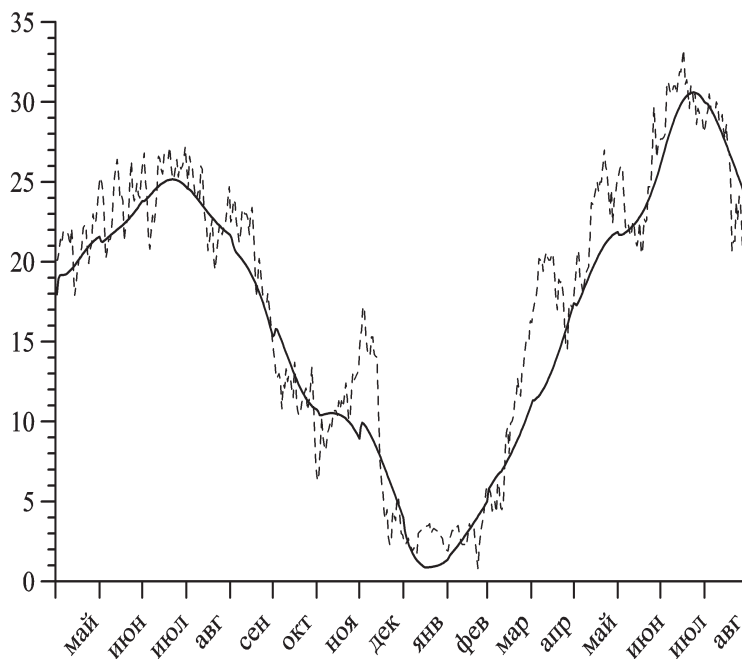


Рис. 2. Результаты верификации модели за период май 2009 г. – август 2010 г. Температура в истоке р. Съежа, °C (сплошная линия – результаты расчета, пунктирная – натурные данные)
 Fig 2. Results of model verification for the period May 2009 – August 2010. Temperature at the source of the river Syezha, °C (solid line – simulation results, dashed line – field data)

В первом варианте под естественной температурой понимается температура реки до пуска первого энергоблока АЭС, а именно среднемноголетние среднемесячные значения за период с июня 1971 г. по июнь 1984 г., которые колебались в пределах 0.4–19.7°C.

Однако рассчитанная таким образом температура воды не отражала современного состояния водного объекта, сформировавшегося под влиянием природно-техногенной обстановки и природно-климатических особенностей данного региона, учет которых рекомендован в [Методические..., 2007]. Поэтому во втором варианте под естественной температурой понимаются среднемноголетние среднемесячные значения за период в 1986–2005 гг. (2.8–22.5°C), которые характеризуют состояние экосистемы реки на момент выполнения расчетов, установившееся за 20 летний период при стабильной тепловой нагрузке от двух действующих энергоблоков.

При обоих вариантах определения критической температуры (5.4–24.7°C и 7.8–27.5°C) выполняется второе условие, то есть она не будет больше 28°C летом и 8°C зимой.

Были проведены прогностические расчеты для работы станции при трех и четырех действующих энергоблоках при гидрометеорологических условиях 50% и 95% обеспеченности. Для всех этих случаев параметры работы станции определяются проектными данными.

Однако было обнаружено, что при трех работающих энергоблоках фактические параметры работы станции отличались от проектных (в целом наблюдались большие

циркуляционные расходы при меньшем приращении температуры на них и более активное использование сбросного канала в западной части оз. Удомля). Поэтому были выполнены расчеты также и для фактических параметров для лет 50% и 95% обеспеченности.

В силу относительно небольшой точности в озера Песьво и Удомля точный учет метеорологических условий более важен, чем гидрологических. Поэтому при четырех работающих энергоблоках были проведены расчеты также с гидрологическими условиями 95% обеспеченности и метеорологическими условиями для 1971–1972 гг. и 2009–2010 гг., близких к году 95% обеспеченности по совокупности средних температур воздуха.

В качестве метеорологических данных компоновочного года 95% обеспеченности выбирались те среднемесячные данные за период с марта 1971 г. по август 2010 г., которые обеспечивали наибольшую температуру воды и наименьшее испарение (выбор осуществлялся отдельно для каждого месяца расчетного года и каждого метеорологического элемента). Атмосферные осадки выбирались минимальными. Метеорологические данные 50% обеспеченности получались усреднением соответствующих среднемесячных значений за тот же период. В обоих случаях модуль скорости ветра определялся по вышеописанной методике, а его направление определялось как господствующее для соответствующего месяца.

Месячные температуры и расходы речных притоков 50% и 95% обеспеченности определялись как средние и максимальные

(для расходов – минимальные) за длительный период наблюдений.

Аналогично месячные расходы р. Съежа 50% обеспеченности определялись как средние за период с января 2006 г. по сентябрь 2010 г., когда работали три энергоблока. Однако в качестве расходов 95% обеспеченности брались минимально возможные санитарные попуски в реку, которые были ранее рассчитаны при проектировании 3 и 4 энергоблоков и составляют $0.5 \text{ м}^3/\text{с}$ во все месяцы, кроме апреля, когда должна обеспечиваться санитарная промывка русла реки (проектный расход в этот месяц составляет $3.83 \text{ м}^3/\text{с}$).

При использовании фактических параметров работы станции 50% и 95% обеспеченности использовались средние и максимальные месячные данные за тот же период.

Из-за неопределенности водообмена с подземными водами расчеты проводились при практически постоянном среднем уровне воды, соответствующем НПУ, что близко к реальности. При этом, влагообмен с атмосферой учитывался только в тепло-

вом балансе (потери тепла на испарение) и при расчете толщины льда и снега, но не в водном балансе, а расходы речных притоков были приведены в соответствие с расходом Съежи и потерями на градирнях и брызгальных бассейнах (при сохранении пропорционального распределения расходов между притоками).

Результаты расчетов и выводы

На рис. 3. дан пример распределения расчетной температуры по акватории водоемов. В табл. 1. приведены величины перегрева р. Съежа, полученные путем сравнения помесечно усредненной расчетной температуры с предельной температурой по второму варианту, то есть с предельной температурой, полученной на основе гидротермического режима реки, сложившегося за двадцатилетний период работы двух энергоблоков. Данный вариант оценки критической температуры был принят основным, так он соответствует состоянию экосистемы реки сложившийся на момент выполнения работы.

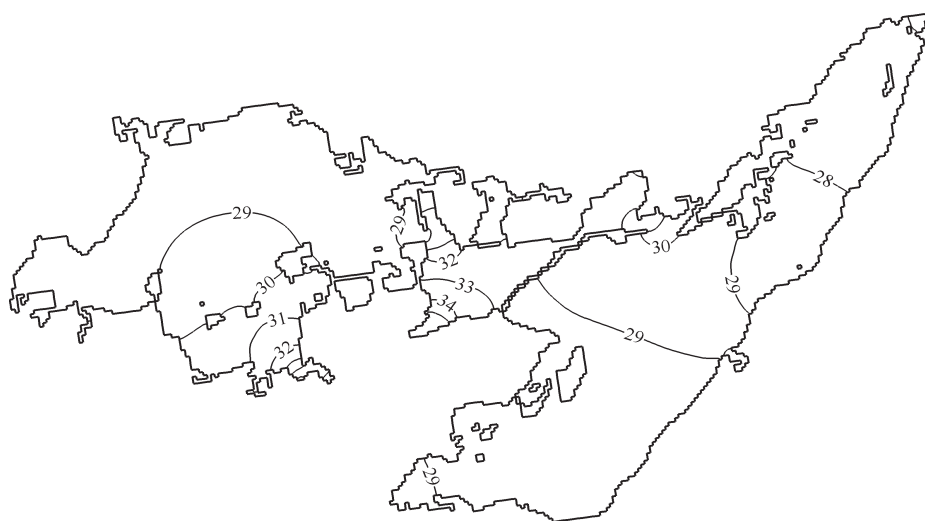


Рис. 3. Распределение температуры воды, °С, на 15 июля в год 95% обеспеченности при работе трех энергоблоков с фактическими параметрами

Fig. 3. Water temperature distribution, °C, at July 15 of a year of 95% non-exceedance probability under operation of three power units with actual parameters

Таблица 1

Перегрев р. Съежа, оцененный на основе ее гидротермического режима, сложившегося за двадцатилетний период работы двух энергоблоков, °С

Table 1

The river Syezha overheating, estimated on the basis of its hydrothermal conditions developed over the twenty-year period of two power units operation, °С

Сценарий	янв	фев	мар	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек
пр 3 бл 50%	-2.2	-2.1	-0.2	-1.3	-3.2	-4.4	-3.8	-2.7	-0.3	-0.4	-0.2	-0.8
пр 3 бл 95%	1.9	3.6	5.3	4.7	1.7	-0.2	-0.2	1.5	3.1	3.9	4.1	4.1
факт 3 бл 50%	-4.9	-4.9	-2.8	-1.8	-2.3	-3.3	-2.6	-2.1	-1.8	-1.9	-2.5	-4.0
факт 3 бл 95%	1.2	3.3	4.7	5.0	3.9	2.1	3.0	3.5	5.5	5.1	4.3	3.5
4 бл 50%	-3.0	-3.0	-0.6	-0.8	-3.2	-3.8	-3.1	-2.8	-3.0	0.2	-1.6	-3.3
4 бл 95%	0.3	2.6	4.2	3.8	0.8	-0.5	-0.4	1.1	0.2	3.3	2.0	1.0
4 бл 95% 1972	-5.0	-2.1	-0.6	-0.3	-2.4	-1.8	-0.4	-0.4	-2.2	-0.1	-1.8	-0.4
4 бл 95% 2010	-5.5	-3.5	-1.9	-0.7	-1.1	-3.5	0.0	0.0	-1.6	-0.2	0.6	-2.6

Примечание: «бл» – число работающих энергоблоков; «пр», «факт» – проектные и фактические параметры работы станции; «50%», «95%» – обеспеченность гидрометеорологических данных, «1972», «2010» – год задания метеорологических данных.

В этом случае наибольший перегрев воды в р. Съежа достигается в год 95% обеспеченности при работе Калининской АЭС на 3 блока с фактическими параметрами, наблюдаемыми в период 2006–2010 гг. В этом случае в течение всего года имел место перегрев воды в 1.2–5.5°С. Наибольшие значения перегрева, превышающие 5.0 °С, отмечаются в сентябре, октябре и апреле (при этом в июле достигается наибольшая среди всех расчетных вариантов среднемесячная температура реки, а именно 30.5°С). Также, согласно расчетам с использованием проектных данных, в расчетный компоновочный год 95% обеспеченности при работе станции на 3 и на 4 блока перегрев будет наблюдаться во все месяцы кроме июня и июля с достижением максимального значения в марте. В первом случае перегрев будет составлять 1.5–5.3°С, а во втором 0.2–4.2°С. Небольшой перегрев (меньше 0.6°С) может наблюдаться в отдельные месяцы при работе 4 блоков АЭС в год 95% обеспеченности (по метеоданным 2010 г.)

и 50% обеспеченности. Вообще, наибольший перегрев ожидался весной и осенью. Фактически, как было показано при верификации модели, перегрев в эти периоды может быть еще выше из-за особенностей термической стратификации водоема, не описываемых плановой моделью.

В целом при работе четырех энергоблоков АЭС ожидалась более благоприятная ситуация с перегревом, чем при работе трех энергоблоков. Это связано с тем, что при работе четырех блоков, согласно проектным данным, планировалось большую часть охлаждающей воды направить на четыре градирни. В связи с этим в отдельные месяцы значительно уменьшается расход воды в отводящем канале в оз. Удомля, что приводит к соответствующему снижению температуры воды в истоке р. Съежа в этот период. Также в летний период проектировалось снижение приращения температуры воды в системе циркуляции примерно на 2°С, что также сказывается на уменьшении перегрева в истоке р. Съежа. Существен-

ный вклад в повышении эффективности водоемов охладителей вносит достройка струенаправляющей дамбы, благодаря чему подогретая вода попадает не в центральную, а в северную часть оз. Удомля, максимально удаленную от водозабора.

В процессе работы было высказано предположение, что в качестве одной из мер по снижению перегрева в устье р. Съежа может быть предложено изменение направления потока теплых вод, сбрасываемых в реку. Для оценки эффективности этой меры, были выполнены дополнительные расчеты с учетом постройки канала из северного залива оз. Песьво в р. Съежа, вернее в приплотинную зону оз. Удомля, называемую акваторией доохлаждения. Предполагалось, что при этом поток воды из оз. Удомля в эту зону будет полностью перекрыт.

Согласно результатам расчетов температуры воды в реке при этом снижается, но в случае работы трех энергоблоков АЭС растет средняя объемная температура воды в водоемах-охладителях. В случае работы четырех энергоблоков такого эффекта

практически не наблюдается, т.к. большая часть циркуляционной воды отправляется на градирни, а расходы воды в отводящих каналах в озера уменьшаются.

В табл. 2. представлена разность между температурами в устье р. Съежа, рассчитанными без учета и с учетом изменения направления потока теплых вод (постройки канала) для четырех энергоблоков в годы различной обеспеченности. Очевидно, что такая мера будет являться очень эффективной, особенно в весенний и осенний периоды, когда и наблюдается наибольший перегрев воды. Так, в годы 95% обеспеченности снижение температуры в устье р. Съежа в феврале – апреле и октябре – декабре может составлять 4.5–7.5°C. В летние месяцы эффект выражен не так ярко и будет составлять всего 1.0–2.9°C. В год 50% обеспеченности снижение температуры в теплый период может колебаться в пределах 0.9–3.8°C, увеличиваясь от мая к сентябрю. Перегрев в такой конфигурации водоемов не наблюдался ни в одном из расчетных сценариев.

Таблица 2

Уменьшение температуры р. Съежа в случае соединения ее с оз. Песьво и перекрытия стока из оз. Удомля, °C

Table 2

The river Syezha temperature decrease in the case of its connection with the lake Pesvo and blocking of outflow from the lake Udomlya, °C

Сценарий	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
4 бл 50%	-	-	-	-	0.9	2.3	2.5	3.1	3.8	-	-	-
4 бл 95%	-	-	-	-	1.9	1.9	1.1	2.8	3.9	-	-	-
4 бл 95% 1972	2.8	4.7	7.0	4.8	2.1	1.9	1.0	2.9	3.9	-	5.6	7.5
4 бл 95% 1010	2.3	3.7	6.3	4.5	1.8	2.0	0.6	2.9	3.5	7.5	6.5	4.8

Примечание: см. примечание к табл. 1.

При оценке критической температуры по первому варианту, то есть на основе гидротермического режима р. Съежа, сложившегося до пуска первого энергоблока, перегрев наблюдается большую часть года в большинстве расчетных сценариев. Причем наибольшее значение, 12.1°C также наблюдается весной (в апреле) в год 95% обеспеченности при работе станции на 3 блока с фактическими параметрами. Даже в случае изменения направления потока теплых вод в р. Съежа при работе четырех энергоблоков перегрев наблюдается весной и летом, хотя он и не превосходит 4.6°C.

Заключение

Таким образом, если считать естественным гидротермическим режимом р. Съежа режим, сложившийся в течении 20-летней работой двух энергоблоков АЭС, то, при работе трех энергоблоков ее перегрев относительно нормативных значений ожидался большую часть года во всех сценариях 95% обеспеченности, а при работе четырех – в одном из сценариев 95% обеспеченности. В сценариях же 50% обеспеченности перегрев отсутствует весь год или большую часть года при работе так трех, так и четырех энергоблоков.

В случае предлагаемого переноса истока р. Съежа из оз. Удомля в оз. Песьво перегрев не ожидался ни в одном из рассматривавшихся сценариев.

Если же считать естественным гидротермическим режимом рассматриваемой реки режим, сложившийся до начала ра-

боты АЭС, перегрев ожидался в большинстве сценариев, в т.ч. и в случае переноса ее истока.

По итогам данной работы были выдвинуты следующие рекомендации по понижению температуры в р. Съежа:

1. В период увеличения сброса воды в р. Съежа до 1.5 м³/с и более уменьшать расходы и температуры воды в отводящем канале в оз. Удомля (при наличии такой технической возможности).

2. Провести анализ проектных параметров системы охлаждения Калининской АЭС с учетом сложившихся фактических расходов. При необходимости внести изменения в режимы функционирования системы охлаждения.

3. Оценить экономическую эффективность снижения величины перегрева в истоке р. Съежа за счет постройки нового канала по перебросу воды из оз. Песьво в предплотинную часть оз. Удомля и полного перекрытия потока из оз. Удомля с учетом возможных экологических платежей за перегрев воды.

4. Создать комплекс управления системой охлаждения Калининской АЭС, позволяющий в оперативном режиме осуществлять перераспределение тепловых потоков в озерах-охладителях исходя из метеорологических и технологических условий. Комплекс должен включать в себя систему мониторинга, трехмерную модель водоемов-охладителей, электронную систему принятия решений и систему регулирования потоков воды в отводящих каналах.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (проект «Исследование разнообразия и структурно-функциональной организации водных экосистем для сохранения и рационального использования водных и биологических ресурсов Западной Сибири»).

Список литературы

Александров И.Я., Квон В.И., Филатова Т.Н., Жуковская О.П. Математическое моделирование ледотермического режима в водоемах при больших тепловых нагрузках // *Метеорология и гидрология*. 1992. № 2. С. 73–81.

Архипов Б.В., Солбаков В.В., Шапочкин Д.А., Хулбарян Г.М. Опыт использования продольно-вертикальной модели с ответвляющимися каналами для расчета термогидродинамического режима водоемов-охладителей сложной формы // *Метеорология и гидрология*. 1995. № 7. С. 85–97.

Кякк В.А. Обоснование компоновки охладителей системы технического водоснабжения Калининской АЭС по условиям соблюдения норм на температурный режим водоемов-охладителей // *Теплоэнергетика*. 2004. № 12. С. 50–54.

Методика разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей: утверждена приказом МПР РФ от 17 декабря 2007 г. № 333. М.: МПР, 2007. 68 с.

Методические указания по разработке нормативов допустимых воздействий на водные объекты: утверждены приказом МПР РФ от 12 декабря 2007 г. № 328. М.: МПР, 2007. 38 с.

Backhaus J.O. A semi-implicit scheme for the shallow water equations for application to shelf sea modeling // *Continental Shelf Research*. 1983. Vol. 2, no. 4. P. 243–254.

Duwe K.C., Hewer R.R., Backhaus J.O. Results of a semi-implicit two-step method for the simulation of markedly nonlinear flow in coastal seas // *Continental Shelf Research*. 1983. Vol. 2, no. 4. P. 255–274.

Rayan P.J., Harleman D.R.F., Stolzenbach K.D. Surface heat loss from cooling ponds // *Water Resources Research*. 1974. Vol. 10, no. 5. P. 930–938.

Wake A., Rumer R.R. Modeling ice regime of Lake Erie // *Journal of the Hydraulics Division*. 1979. Vol. 105, no. 7. P. 827–844.

References

Aleksandrov I.Ya., Kvon V.I., Filatova T.N., Zhukovskaya O.P. Matematicheskoe modelirovanie ledotermicheskogo rezhima v vodoemakh pri bol'shikh teplovykh nagruzkakh [Mathematical modeling of the ice-thermal conditions of water bodies under heavy thermal loads] // *Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and hydrology]*. 1992. No. 2. P. 73–81. (in Russian).

Arkhipov B.V., Solbakov V.V., Shapochkin D.A., Khulbaryan G.M. Opyt ispol'zovaniya prodol'no-vertikal'noi modeli s otvetvlyayushchimisya kanalami dlya rascheta termogidrodin-

namicheskogo rezhima vodoemov-okhladitelei slozhnoi formy [Experience of using a longitudinal-vertical model with branching channels for calculating the thermohydrodynamic conditions of complex shaped cooling ponds] // *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology]. 1995. No. 7. P. 85–97. (in Russian).

Kyakk V.A. Substantiating the arrangement of the coolers for the service cooling water supply system at the Kalinin nuclear power station, according to the conditions for observing the temperature regime norms of cooling water basins // *Thermal Engineering*. 2004. Vol. 51, no. 12. P. 996–1000. (in Russian).

Metodika razrabotki normativov dopustimyykh sbrosov veshchestv i mikroorganizmov v vodnye ob’ekty dlya vodopol’zovatelei: utverzhdena prikazom MPR RF ot 17 dekabrya 2007 g. № 333 [Methodology for the development of standards for permissible discharges of substances and microorganisms into water bodies for water users: approved by order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation dated December 17, 2007 no. 333]. Moscow: MPR, 2007. 69 p. (in Russian).

Metodicheskie ukazaniya po razrabotke normativov dopustimyykh vozdeistvii na vodnye ob’ekty: utverzhdeny prikazom MPR RF ot 12 dekabrya 2007 g. № 328 [Guidelines for the development of standards for permissible impacts on water bodies: approved by order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation dated December 12, 2007 no. 328.]. Moscow: MPR, 2007. 38 p. (in Russian).

Backhaus J.O. A semi-implicit scheme for the shallow water equations for application to shelf sea modeling // *Continental Shelf Research*. 1983. Vol. 2, no. 4. P. 243–254.

Duwe K.C., Hewer R.R., Backhaus J.O. Results of a semi-implicit two-step method for the simulation of markedly nonlinear flow in coastal seas // *Continental Shelf Research*. 1983. Vol. 2, no. 4. P. 255–274.

Rayan P.J., Harleman D.R.F., Stolzenbach K.D. Surface heat loss from cooling ponds // *Water Resources Research*. 1974. Vol. 10, no. 5. P. 930–938.

Wake A., Rumer R.R. Modeling ice regime of Lake Erie // *Journal of the Hydraulics Division*. 1979. Vol. 105, no. 7. P. 827–844.

THE EVALUATION OF THE KALININ NUCLEAR POWER PLANT EFFECT ON THE HYDROTHERMAL CONDITIONS OF THE RIVER SIEEZHA

A.N. Semchukov¹, O.V. Zadonskaya²

¹*Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul,*

²*State Hydrological Institute, Saint Petersburg,*

E-mail: ¹ss16011973@inbox.ru, ²ov-zadon@yandex.ru

The simulations of hydrothermal conditions of the Kalinin Nuclear Power Plant cooling ponds – lakes Pesvo and Udomlya – were performed by the shallow water equations. The simulations were performed for different plant operating modes both for 3 and 4 operational

power units under hydro-meteorological conditions of different exceedance probability levels. The water overheating criteria for the river Sieezha, outflowing from the lakes, were offered. The evaluation of the river Sieezha hydrothermal conditions change after the 4-th power unit launch was performed. The overheating reduction method was offered, and its effectiveness was evaluated.

Key words: cooling pond; mathematical modeling; shallow water equations; hydrothermal conditions; Kalinin Nuclear Power Plant; thermal load; environmental affect.

Received July 28, 2023. Accepted: August 14, 2023

Сведения об авторах

Семчуков Александр Николаевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Новосибирского филиала Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 630090, г. Новосибирск, Морской просп., д. 2. ORCID: 0009-0001-2876-5713. E-mail: ss16011973@inbox.ru.

Задонская Ольга Викторовна – старший научный сотрудник Лаборатории озёр и водохранилищ Государственного гидрологического института. Россия, 199053, г. Санкт-Петербург, 2-ая линия В.О., д. 23. ORCID: 0009-0000-0892-1718. E-mail: ov-zadon@yandex.ru.

Information about the authors

Semchukov Aleksandr Nikolaevich – PhD in Physics and Mathematics, Researcher of the Novosibirsk branch of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS. 2, Morskoy Ave., 630090 Novosibirsk, Russia. ORCID: 0009-0001-2876-5713. E-mail: ss16011973@inbox.ru.

Zadonskaya Olga Viktorovna – Senior researcher of the Laboratory for Lakes and Reservoirs of the State Hydrological Institute. 23, 2nd line, Vasilyevsky Island, 199053 St. Petersburg, Russia. ORCID: 0009-0000-0892-1718. E-mail: ov-zadon@yandex.ru.