

УДК 502/504:556.18

Н. И. СЕНЦОВА

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем Российской академии наук

О НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

На примере отдельных атомных электростанций, расположенных в разных природно-географических регионах, рассматривается оценка достаточности водных ресурсов для систем технического водоснабжения. Рекомендованы методические подходы к определению надежности водообеспечения АЭС в меняющихся климатических условиях.

Атомные электростанции, системы технического водоснабжения, водохозяйственные расчеты, статистический анализ, расчетные гидрологические характеристики.

The estimation of the water resources sufficiency for the service water systems is considered by an example of various nuclear power plants located in different natural-geographical regions. Technical approaches to reliability assessment of water supply of nuclear power plants under the varying climatic conditions are recommended.

Nuclear power plants, service water systems, water-management design, statistical analysis, calculation hydrological characteristics.

Атомные электростанции, как объекты техноприродных систем, относятся к категории крупных водопользователей, требующих практически бесперебойного водоснабжения. Безвозвратное водопотребление АЭС незначительно, основная часть воды возвращается в источники. В современных меняющихся климатических условиях одной из основных задач надежного функционирования АЭС является их устойчивое водоснабжение без ущерба для природных водных объектов. В связи с этим актуально создание методов, позволяющих решать задачи надежного обоснования водохозяйственных мероприятий, обеспечивающих как нормальное состояние водных и наземных экосистем, так и бесперебойное водообеспечение систем охлаждения АЭС.

Оценка достаточности водных ресурсов является сложной задачей, требующей учета перспективных величин водопотребления и речного стока, а также ограничений экологического характера. Для исследования надежности водообеспечения атомных электростанций авторы использовали совокупность методов, включающих имитационные расчеты и составление водохозяйственных балансов, в которых сопоставляются перспективные потребности в воде для всех отраслей экономики с располагаемыми водными ресурсами [1, 2].

Такие подходы реализованы для ряда атомных электростанций, расположенных в разных природно-географических регионах и находящихся как на стадии проектирования, так и функцио-

нирующих в настоящее время. В частности, это действующие и развивающиеся Нововоронежская и Калининская АЭС, а также проектируемые Центральная (Костромская обл.) и Нижегородская.

Нововоронежская атомная электростанция расположена в лесостепной зоне в бассейне Верхнего Дона, характеризующегося ограниченными водными ресурсами. Безвозвратное водопотребление станции незначительное, однако общее использование воды в регионе высокое, колебаниям речного стока свойственна изменчивость во времени, и в засушливые периоды могут возникать дефициты водных ресурсов.

Следует отметить, что современный период характеризуется специфическими особенностями формирования водных ресурсов в регионе. В результате значительного спада промышленного и сельскохозяйственного производства уменьшилось антропогенное воздействие – отмечается постепенное сокращение водозабора из поверхностных и подземных источников, а также сокращение сброса воды в речную сеть.

Анализ данных статистической отчетности по водопользованию в регионе размещения Нововоронежской АЭС с начала восьмидесятых годов прошлого столетия до 2010 года показал сокращение объемов общего водозабора из природных источников и сброса воды в речную сеть почти в три раза. Такое снижение водопотребления в современный период уменьшает напряженность водохозяйственного баланса.

Исследование существующей водохозяйственной системы Верхнего Дона выполнено путем имитационных экспериментов с использованием современных величин водопотребления и перспективных сценариев развития экономики в регионе. С помощью искусственных последовательностей притока и испарения продолжительностью 1000 лет для водохозяйственных участков получены среднемесячные значения стока в основных створах. Это позволило оценить гарантии заданных величин водопотребления при различных сценариях водопользования – для существующего уровня и для безвозвратного водопотребления, увеличенного на 20 %. Резуль-

таты имитационных расчетов показали высокую степень гарантии санитарных попусков в реке Дон [3].

Одним из возможных решений задач надежного функционирования систем технического водоснабжения атомных электростанций в ряде случаев является комплексное использование ресурсов поверхностных и подземных вод. Такие исследования проведены авторами для Калининской АЭС, расположенной в лесной зоне. Район размещения атомной станции характеризуется достаточными водными ресурсами. Однако в силу природных особенностей региона наблюдается повышенная автокорреляция притока к озерам Удомля и Песьво ($r(1) > 0,4$), на которых замкнута система технического водоснабжения. Это обуславливает большую вероятность группирования маловодных периодов, приводящих к выводу из работы части блоков станции, связанному с недостаточным объемом воды для надежного функционирования систем охлаждения. Безвозвратные изъятия воды из озер способствуют учащению повторяемости и увеличению длительности маловодных периодов, что создает предпосылку для развития неблагоприятных изменений экологического состояния как самих озер, так и вытекающей из них реки Съежи, являющейся объектом рекреационного назначения.

Для предотвращения снижения мощности Калининской атомной электростанции и бесперебойной работы систем охлаждения в маловодные периоды рекомендуется подпитка озер-охладителей подземными водами. Поскольку подземные воды уже используются для хозяйственно-питьевых целей, то режимы их эксплуатации в качестве дополнительного источника водоснабжения АЭС должны быть комплексными, учитывающими требования различных водопотребителей. Таким образом, задача совместного управления поверхностными и подземными водами с целью смягчения последствий возникновения дефицитов воды в водохозяйственной системе становится очень актуальной.

Основным элементом правил управления предлагается использовать диспетчерский график с выделенными зонами, в пределах которых регулирование

системой осуществляется по одному и тому же алгоритму.

Расчеты водохозяйственного баланса показывают, что потребность в дополнительных водных ресурсах возникает лишь в отдельные годы в результате группирования маловодных лет. Ресурсы подземных вод в таких случаях могут использоваться в качестве дополнительного источника для компенсации возникающих дефицитов. Предлагается осуществлять компенсацию дефицитов воды с меньшими расходами на существующем водозаборе подземных вод, но с увеличенной продолжительностью работы. Это обеспечивает более плавный режим его эксплуатации. Подземный водозабор включается до момента полной сработки полезной емкости водохранилища при попадании в соответствующую зону диспетчерского графика.

Путем многовариантных имитационных экспериментов с моделью водохозяйственной системы область диспетчерского управления подпиткой озероохладителей разделена на две части: зона достаточных ресурсов поверхностных вод и зона, где необходимо привлечение подземных вод с расходом $0,3 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 1). На основе выполненных расчетов рекомендована схема комплексного технического водоснабжения Калининской АЭС [3].

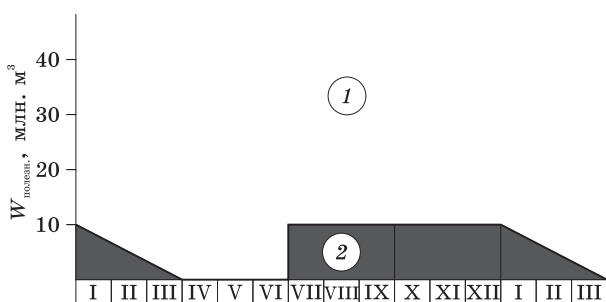


Рис. 1. Диспетчерский график управления подпиткой озероохладителей Калининской АЭС подземными водами: 1 – зона гарантированной отдачи с использованием только поверхностных вод, 2 – зона гарантированной отдачи с привлечением подземных вод

С целью обеспечения надежного функционирования систем технического водоснабжения проведена оценка до-

статочности водных ресурсов в районах размещения площадок проектируемых Центральной (Костромская обл.) и Нижегородской атомных электростанций. Исследования выполнены путем сопоставления имеющихся ресурсов поверхностных вод, объемов предельно допустимых изъятий речного стока и величин безвозвратного водопотребления. Это дало возможность определить гарантию объемов воды, требуемых на покрытие всех видов безвозвратных потерь при выработке электроэнергии на АЭС с учетом экологических ограничений.

Оценка расходных компонентов водохозяйственного баланса в бассейне реки Костромы у города Буй (район размещения Центральной АЭС в составе двух энергоблоков) показала, что в современных условиях и на перспективу безвозвратные потери воды не превысят 2 % минимального среднемесячного расхода воды зимней межени, что соответствует уровню требований экологических (санитарных) норм.

Система охлаждения Нижегородской АЭС должна включать градирни, функционирующие в замкнутом режиме, и водозаборные устройства, обеспечивающие компенсацию потерь на испарение и собственные нужды АЭС, а также продувку системы охлаждения. На данной стадии проектирования безвозвратные потери Нижегородской АЭС оценены приближенно по аналогу. В качестве аналога использована система охлаждения Калининской АЭС. Приходная статья водохозяйственного баланса определена стоком рек заданной обеспеченности, вовлекаемых в систему водоснабжения. В качестве основного проектного варианта принята обеспеченность 95 % (надежность по числу бесперебойных лет). Оценка стока в маловодные годы выполнена с учетом имеющихся изменений в его динамике (увеличение меженного речного стока).

Результаты водохозяйственных расчетов по оценке допустимых изъятий с учетом минимальной водности рек позволили сделать вывод о достаточности водных ресурсов рек Костромы и Оки для обеспечения надежного функционирования систем технического водоснабжения проектируемых АЭС.

В процессе исследований был проведен анализ многолетней динамики речного стока в регионах размещения площадок атомных электростанций с учетом изменения климатических характеристик. В колебаниях среднегодовых значений речного стока не выявлено каких-либо заметных изменений, в то время как меженный сток имеет тенденцию к увеличению. Связано это в основном с повышением приземной температуры воздуха и увеличением вы-

падения атмосферных осадков в зимний период. Такая тенденция наблюдается с середины прошлого столетия. В первое десятилетие XXI века средние значения рассматриваемых метеорологических элементов еще более увеличились. По данным метеостанции Каменная Степь представлены средние значения температуры воздуха и сумм атмосферных осадков за отдельные периоды наблюдений с конца XIX века по настоящее время (таблица).

**Изменение температуры воздуха и атмосферных осадков
(по данным метеостанции Каменная Степь)**

Показатель	Период наблюдений			
	1893 – 2009	1893 – 1950	1951 – 2009	2000 – 2009
Средняя температура воздуха, °С:				
за год	5,76	5,29	6,21	7,35
за теплый период	14,0	13,7	14,3	15,1
за холодный период	-5,81	-6,52	-5,11	-3,38
Сумма атмосферных осадков, мм:				
за год	455	439	471	530
за теплый период	321	331	312	345
за холодный период	134	107	159	185

Такие климатические изменения привели к повышению уровня грунтовых вод за счет периодического оттаивания почв в холодный период года, что сказалось и на значительном увеличении меженного и минимального стоков. Временные ряды среднегодовых величин речного стока при этом имеют относительно стационарный характер (рис. 2).

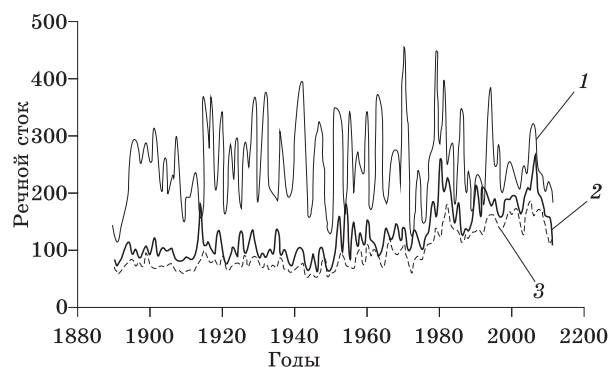


Рис. 2. Динамика многолетнего изменения речного стока за год (1), меженный период (2) и его минимальных значений (3) в створе реки Дон у города Лиски (м³/с)

В связи с этим для решения водохозяйственных задач следует выделять временные периоды с разной водностью. Выявление групп лет с повышенными (по сравнению со средним уровнем) и пониженными значениями речного стока произведено на основе анализа разностных интегральных кривых. В результате для рек в регионах размещения Нововоронежской, Калининской, а также проектируемых Центральной и Нижегородской АЭС выделены периоды, характеризующиеся относительно стационарными условиями формирования минимального речного стока, лимитирующего водохозяйственную деятельность. Выявлено, что с конца 1970-х годов во всех исследуемых регионах наблюдается повышенная водность рек в межень – норма минимального стока в этот период увеличилась более чем в 1,6 раза.

Существенные изменения формирования речного стока требуют развития методов его обработки и получения расчетных региональных гидрологических характеристик для современных условий. Следует отметить, что

имеющиеся гидрологические ряды наблюдений слишком коротки для построения сложных вероятностных моделей только статистическими методами. Уточнение расчетных характеристик речного стока для современного периода предлагается проводить путем регионализации и привлечения данных в пределах выделенных однородных районов, а также за счет использования гидрологической информации за весь период наблюдения (с введением весовых коэффициентов для разных временных условно-стационарных интервалов). С этой целью используется метод оценки и прогнозирования Байеса, состоящий в построении априорной плотности по данным пространственного распределения изучаемого параметра. В качестве параметра, для которого рассчитывается такая оценка, принимается отношение средних значений минимального стока для выявленных двух отрезков временного ряда: с начала проведения наблюдений за речным стоком до 1978 года и после 1978 года до настоящего времени. В результате применения метода Байеса для рек в регионах размещения рассматриваемых АЭС рассчитаны квантили распределения минимальных значений расходов воды и построены расчетные (прогнозные) плотности их распределения [4].

Выводы

Таким образом, для оценки надежного водоснабжения атомных электростанций рекомендована методика составления водохозяйственных балансов в сочетании с имитационными расчетами, позволяющая получать набор ситуаций, характеризующихся дефицитом водных ресурсов как по отношению к водопользователям, так и к экологически допустимым значениям остаточных величин стока.

Повышение температуры воздуха и увеличение выпадения атмосферных осадков в холодное время года привели к внутригодовому перераспределению речного стока с заметным усилением его роли в меженные периоды. С конца 70-х годов прошлого столетия норма стока рек в межень увеличилась более чем в 1,6 раза. Выявленная нестацио-

нарность формирования стока требует совершенствования методов его обработки. Уточнение оценки водных ресурсов предлагается проводить на основе подхода Байеса, позволяющего получать расчетные характеристики для современных условий с учетом всей имеющейся гидрологической информации в регионах размещения АЭС.

С целью предотвращения снижения мощности атомных электростанций из-за возникновения дефицита воды в системах охлаждения в маловодные периоды в некоторых конкретных случаях предлагается комплексное использование поверхностных и подземных вод. Потребность в привлечении дополнительных водных ресурсов возникает лишь в отдельные годы (в результате группирования маловодных лет) и зависит от мощности станции. Управление водохозяйственной системой основывается на диспетчеризации с установлением зон, соответствующих разным алгоритмам регулирования. Такой подход реализован для Калининской АЭС. Рекомендована схема комплексного технического водоснабжения путем проведения многовариантных имитационных экспериментов.

1. Раткович Д. Я. Гидрологические основы водообеспечения. – М.: Наука, 2003. – 430 с.

2. Болгов М. В., Мишон В. М., Сенцова Н. И. Современные проблемы водных ресурсов и водообеспечения. – М.: Наука, 2005. – 318 с.

3. Болгов М. В., Сенцова Н. И. Инженерно-гидрологическое обоснование надежности систем технического водоснабжения АЭС // Гидротехническое строительство. – 2006. – № 6 – С. 2–8.

4. Болгов М. В., Сенцова Н. И. Байесовские оценки расчетных характеристик минимального стока рек в нестационарных условиях // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 11. – С. 70–80.

Материал поступил в редакцию 06.06.13.
Сенцова Надежда Ивановна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник
 Тел. 8 (499) 135-04-67
 E-mail: sentsova@yandex.ru