
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ,
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ**

УДК 556.182

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАННОГО
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД
ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ КАЛИНИНСКОЙ АЭС**

© 2012 г. М. В. Болгов*, Р. С. Штенгелов**, А. А. Маслов**, Е. А. Филимонова**

*Институт водных проблем РАН

119333 Москва, ул. Губкина, 3

**Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

119991 Москва ГСП-1, Ленинские горы

Поступила в редакцию 15.07.2010 г.

Обсуждена возможность повышения надежности системы технологического водоснабжения на примере одного из важных энергетических объектов с использованием комбинированных водозаборных систем. На основе имитационного гидрологического моделирования определены периоды дефицита ресурсов поверхностных вод и, соответственно, периоды включения подземного компенсационного водозабора. На гидродинамической модели получены прогнозные величины ущерба поверхностному стоку от работы подземного водозабора. В результате составлен диспетчерский график управления комбинированной водозаборной системой.

Ключевые слова: водные ресурсы, комбинированное использование, компенсационный водозабор, маловодный период, имитационное гидрологическое моделирование, стохастическая модель, ущерб поверхностному стоку, диспетчерский график.

Использование поверхностных вод для хозяйственно-питьевого и технического водоснабжения в условиях существенной внутригодовой неравномерности речного стока ограничивается необходимостью сохранения минимального допустимого расхода воды рек и регулирующей возможностью водохранилищ [3]. Возникающий дефицит располагаемых ресурсов поверхностных вод в маловодные периоды года может быть покрыт за счет кратковременного использования подземных вод.

Подобное управление водными ресурсами речного бассейна называется комбинированным использованием поверхностных и подземных вод [5], под которым следует понимать технологически и оперативно сопряженный процесс водоотбора из поверхностных и/или подземных водосточников, обеспечивающий необходимую суммарную производительность независимо от критических изменений количественного или качественного состояния какого-либо из этих источников.

Комбинированная водозаборная система (КВС) представляет собой единый комплекс, состоящий из двух отдельных водозаборов (основного и компенсационного), которые взаимодействуют по общему диспетчерскому графику для обеспечения суммарной водохозяйственной потребности [6]. Основной водозабор обеспечивается поверхностными водами – прямым забором из

русла либо через прирусловые скважины. Компенсационный водозабор во всех случаях использует только подземные воды. Комбинирование работы основного и компенсационного водозаборов возможно в двух следующих вариантах.

Основной водозабор работает с полной нагрузкой (равной водохозяйственной потребности) в многоводные периоды года. В маловодные периоды его производительность уменьшается до величины, обеспечивающей сохранение минимального допустимого расхода реки (или уровня водоема). Дефицит водоподачи потребителям погашается включением компенсационного водозабора с производительностью, равной разности между водопотребностью и допустимым изъятием поверхностного стока. Гидрогеодинамическое обоснование в этом случае заключается в выборе такого местоположения компенсационного водозабора, при котором ущерб поверхностному стоку в период его работы не превысит минимальной допустимой величины либо будет отложен на последующий период высокой водности.

Основной водозабор круглогодично работает с полной нагрузкой. В маловодные периоды, когда его работа приводит к недопустимому ущербу поверхностным водным объектам, включается компенсационный водозабор, вода из которого сбрасывается в поверхностную гидросеть в количестве, необходимом для поддержания минимально

допустимых параметров стока. В этом случае должны быть обоснованы местоположение и производительность подземного водозабора, позволяющие покрыть ущерб поверхностным водам не только от основного, но и от самого компенсационного водозабора. Как правило, в такой постановке прогнозная задача решается итеративным путем.

Следует добавить, что во всех вариантах гидрогеодинамический прогноз работы КВС на весь период многолетней эксплуатации должен учитывать циклический режим функционирования компенсационных водозаборов с частичным или полным восстановлением сработанных запасов подземных вод в многоводные периоды.

Применение комбинированной системы водоснабжения разрабатывалось для технического водообеспечения Калининской атомной электростанции, в системе охлаждения которой используются поверхностные воды озер Песьво и Удомля [2, 4, 8]. В этих работах было предложено решать проблему возможного дефицита ресурсов поверхностных вод в маловодные периоды при дальнейшем расширении станции за счет форсированного отбора подземных вод.

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Район размещения Калининской АЭС относится к западной части Московского артезианского бассейна. С поверхности на всей территории повсеместно залегает водоносный комплекс четвертичных образований средней мощностью 20–40 м. Водовмещающая толща имеет сложное, изменчивое по площади строение, обусловленное распространением практически полного разреза моренных, водно-ледниковых и озерно-ледниковых образований четвертичных материковых оледенений, которые в речных долинах и озерных котловинах перекрываются относительно мало мощными верхнечетвертичными и современными аллювиальными, озерными и болотными отложениями. Водоносными в разрезе комплекса являются прослойки разнозернистых песков с гравием и галькой. Горизонты моренных суглинков играют роль слабопроницаемых разделяющих слоев, однако невыдержанность их распространения по площади обеспечивает тесную гидравлическую взаимосвязанность водоносного комплекса. Подземные воды – преимущественно грунтового характера. Фильтрационные свойства водовмещающих отложений низкие (проводимость – в диапазоне единиц и первых десятков м²/сут, иногда достигает 200 м²/сут).

Под четвертичным покровом повсеместно залегает напорный среднекаменноугольный Каширско-Мячковский водоносный горизонт. Водовмещающая толща сложена известняками и до-

ломитами с редкими прослоями мергелей и глин; мощность ее возрастает по мере погружения в юго-восточном направлении от 10 до 100 м. Фильтрационные свойства высокие (проводимость – в диапазоне 300–1000 м²/сут и более).

В подошве водоносный горизонт подстилается красноцветными верейскими глинами среднего карбона мощностью 10–30 м, распространенными повсеместно и выклинивающимися только в западной части территории вместе с каширско-мячковской водоносной толщей.

Под верейскими глинами повсеместно распространены напорный нижнекаменноугольный Окско-Протвинский водоносный горизонт. Мощность водовмещающей толщи – 60–110 м; по литологическому составу преобладают трещиноватые, кавернозные известняки и мергели. Фильтрационные свойства водовмещающей толщи – высокие (проводимость изменяется в диапазоне 950–5270 м²/сут).

Окско-Протвинский горизонт в подошве подстилается глинами алексинского горизонта нижнего карбона, надежно изолирующими его от нижележащей части гидрогеологического разреза.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ КОМБИНИРОВАННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Предложения по организации комбинированной водозаборной системы для технического водоснабжения АЭС учитывают наличие разведанных и утвержденных эксплуатационных запасов подземных вод, а также существующую водозаборную инфраструктуру в районе АЭС.

В качестве основного водозабора рассматривается сложившаяся система водоснабжения АЭС поверхностными водами из озер Песьво и Удомля. Отдача этой системы не постоянна и зависит от водности года, температурного режима и режима эксплуатации оборудования станции.

Для пополнения озер-охладителей необходимым количеством воды в дефицитные периоды проводится компенсационный отбор подземных вод с использованием действующего городского водозабора г. Удомля и проектного водозабора на разведанном участке Елманова горка.

ВЫБОР РАСЧЕТНОГО ПЕРИОДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОФИЛЬТРАЦИИ

Выбор расчетного периода для анализа работы комбинированной водозаборной системы осуществлялся на основе имитационного гидрологического моделирования. На практике часто ограничиваются исследованием функционирования водохозяйственной системы на отрезках времени до 100 лет, поскольку эта продолжительность при-

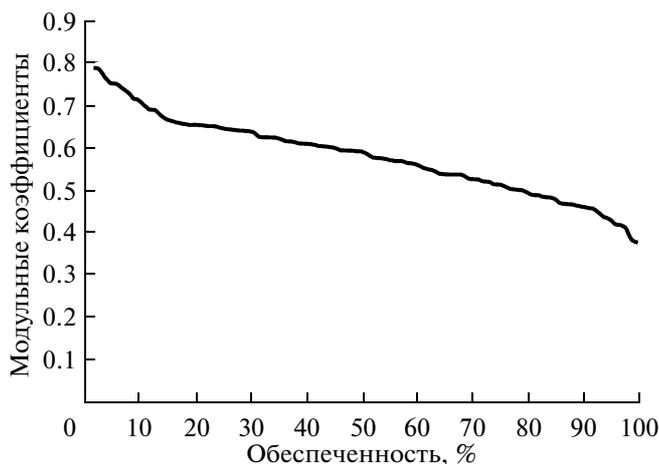


Рис. 1. Кривая обеспеченности значений водности за наихудшие в 100-летних рядах пятилетки (периоды длиной 5 лет с минимальным значением водности) в моделированном ряду значений притока к озерам Удомля и Песьво длиной 10000 лет (в модульных коэффициентах).

мерно соответствует имеющимся продолжительным рядам наблюдений за стоком рек, и в ряде случаев можно изучить особенности функционирования системы без привлечения статистических методов анализа, требующих больших объемов выборки. Однако при этом необходимо оценить репрезентативность анализируемой относительно короткой (расчетной) выборки. Сделать это можно путем моделирования искусственных рядов большой продолжительности.

Представляется допустимым выбрать расчетный период продолжительностью порядка 100 лет, включающий экстремально маловодные годы и группы лет, и для этого периода оценить характер возникающих перебоев. Как показано в [1], в качестве параметров при выборе расчетной 100-летки могут быть приняты либо характеристики выбросов случайного процесса стока ниже заданного уровня (так называемые дефицитные периоды), либо критические (особо малые) суммарные значения стока за несколько последовательных лет (критическая N -летка).

В первом случае необходимо назначить несколько уровней (значений стока), относительно которых рассчитываются характеристики выбросов. Такие уровни можно определить как набор квантилей распределения годового стока достаточно малой вероятности — например, от 50 до 95%. При оценке надежности (обеспеченности) проектной выработки электроэнергии для объектов, работающих в объединенной энергосистеме, природные (климатические) ограничения не задаются очень жестко, поэтому исследование влияния затяжного маловодья достаточно рассматри-

вать относительно уровня, соответствующего обеспеченности годового стока 80–90%, имея в виду, что даже и для простой цепи Маркова вероятность появления продолжительной группировки столь маловодных лет крайне мала.

Второй критерий выбора расчетной последовательности стока основан на распределении вероятностей суммы последовательных значений случайного процесса стока за несколько лет (так называемые N -летки). Располагая стохастической моделью многолетних колебаний стока, можно получить распределение вероятностей суммарной водности за несколько последовательных лет (или аналитически, или методом Монте-Карло). Нерешенным остается вопрос — какая вероятность появления N -летки в исследуемом 100-летнем периоде может быть принята в качестве расчетной, т.е. гарантирующей водо- и энергоотдачу заданной надежности. Это не должна быть очень малая величина, поскольку речь идет о том, что наблюдающиеся в среднем раз в 100 лет неблагоприятные условия “усугубляются” для увеличения надежности системы. Приняв уровень значимости 0.9, или, другими словами, назначив условную обеспеченность появления наихудшей N -летки в 100-летнем ряду, равной 90%, можно говорить о событии, возникающем примерно раз в 1000 лет.

Рассмотренные вероятностные критерии оценки водности маловодных периодов используются далее для выбора расчетных отрезков (100-леток).

Дефицитные периоды и N -летки

Выбор расчетной 100-летки для выполнения водохозяйственных и водноэнергетических расчетов осуществляется на основе анализа характеристик дефицитных периодов и распределения стока за наихудшую пятилетку, полученных методом имитационных экспериментов. Смоделированный для принятого значения коэффициента автокорреляции ряд притока за 10000 лет обрабатывался статистически. В результате получены параметры упомянутых выше распределений для притока к озерам Песьво и Удомля. На основе полученных распределений из ста 100-летних отрезков моделированного ряда выбраны два в качестве расчетных периоды. Один из них включает пятилетний участок, близкий по водности к расчетному значению 80%-ной обеспеченности (рис. 1), и структуру дефицитных периодов, близкую к распределению, представленному в таблице.

Второй 100-летний участок характеризует средние условия стока. Здесь обеспеченность наихудшей пятилетки близка к 50%, а структура выбросов близка к средней, отражаемой в таблице, и не содержит экстремальных маловодий.

Число выбросов заданной продолжительности ниже заданного уровня (расхода заданной обеспеченности p , %) для рядов величин притока к озерам Песьво и Удомля, $N = 10000$ лет

Уровень p , %	Продолжительность выброса, лет										Средняя продолжительность выброса, лет
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
50	755	391	259	204	83	59	46	27	27	10	2.7
60	807	425	254	145	61	44	22	14	12	5	2.3
70	846	380	181	97	38	23	9	6	8	0	1.9
75	831	333	156	75	26	14	5	2	2	0	1.8
80	794	291	127	51	16	4	2	2	0	0	1.6
90	578	168	49	10	0	0	0	0	0	0	1.4
95	343	72	15	2	0	0	0	0	0	0	1.3

Таким образом, для последующих геофильтрационных расчетов предложены три варианта эксплуатации подземных вод

100-летка высокой (80%) обеспеченности, соответствующая дебиту водозабора $0.9 \text{ м}^3/\text{с}$;

10 наихудших лет из той же 100-летки с дебитом водозабора $0.7 \text{ м}^3/\text{с}$;

16 наихудших лет подряд из 100-летки, соответствующей средним параметрам появления экстремальных маловодий.

Оценка периодов работы компенсационных водозаборов выполнялась путем статистической обработки результатов имитационных воднобалансовых расчетов. На основе анализа полученных результатов выделены периоды, когда запас воды в озерах недостаточен для надежного функционирования АЭС, и сформирован диспетчерский график для управления работой (включен/выключен) компенсационного водозабора. Организация компенсационного водоотбора и распределение нагрузки между водозаборами определяется следующими положениями:

необходимая общая производительность компенсации составляет 0.7 или $0.9 \text{ м}^3/\text{с}$ (60 и 77.8 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$ соответственно) для двух проектных вариантов; эти величины компенсируют только прямой забор воды из озер на систему охлаждения агрегатов АЭС и не учитывают ущерба, сопутствующего работе компенсационных подземных водозаборов, который должен быть оценен и учтен дополнительно;

действующий городской водозабор г. Удомля, использующий каширско-мячковский водоносный горизонт в количестве утвержденных эксплу-

тационных запасов 21.6 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$, переводится в систему технического водоснабжения АЭС, т.е. используется в качестве компенсационного водозабора с той же производительностью, но в циклическом режиме в соответствии с диспетчерским графиком управления подпиткой озер;

хозяйственно-питьевое водоснабжение г. Удомля в количестве 21.6 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$ переводится на проектный водозабор на разведанном участке Елманова горка с утвержденными эксплуатационными запасами 60 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$ по Окско-Протвинскому водоносному горизонту;

остаток эксплуатационных запасов участка Елманова горка в 38.4 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$ может быть применен для циклического компенсационного пополнения объема озер-охладителей АЭС в дефицитные периоды стока;

при необходимости компенсации с производительностью 77.8 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$ рекомендуется расширить действующий городской водозабор г. Удомля за счет дополнительного водозабора участка с производительностью 17.8 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$ (с доразведкой и переутверждением эксплуатационных запасов по Каширско-Мячковскому водоносному горизонту).

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УЩЕРБА ПОВЕРХНОСТНОМУ СТОКУ НА ВОДОСБОРНОЙ ПЛОЩАДИ ОЗЕР ПЕСЬВО И УДОМЛЯ

Рассматриваемая территория находится в западной краевой области питания межпластовых каменноугольных водоносных горизонтов Московского артезианского бассейна. Практически

на всей территории существует естественное нисходящее распределение напоров по глубине — наиболее высокое положение занимают уровни грунтовых вод четвертичного водоносного комплекса, ниже располагаются пьезометрические уровни Каширско-Мячковского и еще ниже — Окско-Протвинского горизонтов. Лишь в пределах днищ наиболее крупных речных врезов и озерных котловин пьезометрические уровни Каширско-Мячковского горизонта уравниваются выше уровней рек (на 0.1–0.8 м в зависимости от сезона), что свидетельствует о частичной восходящей разгрузке потока из межпластового горизонта в аллювий и в поверхностную гидросеть.

Депрессия напоров межпластовых горизонтов при работе компенсационных водозаборов приводит к увеличению интенсивности их питания из четвертичного водоносного комплекса и уменьшению разгрузки подземных вод в речную сеть. Развитие ущерба поверхностному стоку по площади и во времени при длительной циклической работе компенсационных водозаборов контролируется безразмерным параметром “емкостного сопротивления”

$$C = \frac{L^*}{\sqrt{a\Delta t}}, \quad (1)$$

где L^* — удаленность компенсационного водозабора от расчетной площади, обобщенно учитывающая как физическое расстояние между ними, так и виртуальные длины, эквивалентные вертикальным фильтрационным сопротивлениям подрусловых отложений поверхностной гидросети и разделяющих слабопроницаемых слоев в разрезе водоносной толщи; a — уровнепроводность водоносного горизонта, непосредственно связанного с рекой или озером, Δt — расчетная продолжительность компенсационного водозабора.

На основании серии численных модельных экспериментов в широком природном диапазоне параметров пластовых водоносных толщ установлена степенная регрессионная зависимость единичного ущерба поверхностному стоку \bar{Y} (величина ущерба на единицу дебита водозабора) от величины емкостного сопротивления (для 25-летнего расчетного срока эксплуатации КВС)

$$\bar{Y} = 0.023 + 0.508C^{-0.5}. \quad (2)$$

Рассчитанная величина единичного ущерба должна сравниваться с максимально допустимой

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{\max} &= \varepsilon \frac{\text{МДР}}{Q_{\text{КВ}}} \quad (\text{для водотоков}), \\ \bar{Y}_{\max} &= \varepsilon \frac{\text{МПО}}{Q_{\text{КВ}}\Delta t} \quad (\text{для водоемов}), \end{aligned} \quad (3)$$

где МДР — минимальный допустимый расход водотока, МПО — минимальный допустимый по-

лезный объем водоема, $Q_{\text{КВ}}$ — производительность компенсационного водозабора в течение периода Δt , ε — типовая погрешность гидрометрических оценок.

Очевидно, что такая оценка имеет приближенный характер, так как не учитывает местные особенности гидрогеологической обстановки (неоднородность гидрогеодинамических параметров водоносной толщи и условий взаимосвязи с поверхностными водами, реальную конфигурацию гидросети, неравномерность периодической работы компенсационных водозаборов при многолетней эксплуатации и т.п.). Тем не менее, возможность предварительных оценок имеет важное значение на ранних стадиях поисково-оценочных работ.

В рассматриваемой задаче компенсационного водозабора подземных вод для водоснабжения Калининской АЭС необходимо учитывать следующие обстоятельства.

При совместной эксплуатации Каширско-Мячковского и Окско-Протвинского водоносных горизонтов общая величина единичного ущерба \bar{Y} определяется суммой долей, рассчитанных пропорционально нагрузке на каждый водоносный горизонт,

$$\bar{Y} = \frac{Q_1}{Q_{\text{сум}}} \bar{Y}_1 + \frac{Q_2}{Q_{\text{сум}}} \bar{Y}_2, \quad (4)$$

где индексы 1 и 2 приданы соответственно Каширско-Мячковскому и Окско-Протвинскому горизонтам.

Регрессионная зависимость (2) получена в предположении, что компенсационный водозабор в межпластовом водоносном горизонте расположен в непосредственной близости от поверхностного водного объекта, т.е. его расчетная удаленность L^* в формуле (1) складывается только из величины фактора перетекания четвертичного водоносного комплекса и эквивалентной длины ложка водотока (водоема). Фактически же водозаборные площадки городского водозабора и участка Елманова горка располагаются на расстоянии $L_0 = 1500\text{--}3000$ м от озер Песью и Удомля и водосборной площади их притоков, что формально требует учета этой величины при расчетах по формуле (1). Однако при этом следует также учесть различие коэффициентов пьезопроводности Каширско-Мячковского и Окско-Протвинского горизонтов (порядка 10^7 м²/сут) и коэффициента уровнепроводности четвертичного водоносного комплекса (10^3 м²/сут), т.е. в окончательном виде параметр обобщенной удаленности компенсационных водозаборов составит

для городского водозабора $L^* = \sqrt{\frac{a}{a_{\text{км}}}} L_0 + B_{\text{ч}} + \Delta L$,

для водозабора Елманова горка $L^* = \sqrt{\frac{a}{a_{\text{оп}}}} L_0 + B_{\text{в}} + B_{\text{ч}} + \Delta L$,

где $a_{\text{км}}$, $a_{\text{оп}}$ — коэффициенты пьезопроводности Каширско-Мячковского и Окско-Протвинского горизонтов соответственно, $B_{\text{в}}$, $B_{\text{ч}}$ — величины фактора перетекания для Верейского разделяющего слоя и четвертичного водоносного комплекса соответственно, ΔL — эквивалентная длина для отложений в ложе озер Песьво и Удомля.

Продолжительность работы компенсационных водозаборов Δt существенно различна в зависимости от выбранного для анализа периода смоделированного гидрологического ряда. Для предварительной оценки она принята равной средней величине 60 сут в каждом году.

Аналитическая оценка ожидаемого ущерба поверхностным водам озер-охладителей от работы компенсационных водозаборов дает по формулам (1, 2) следующие результаты (при значениях гидрогеодинамических параметров $B_{\text{в}} = 17300$ м, $B_{\text{ч}} = 1400$ м, $\Delta L = 90-220$ м):

для Каширско-Мячковского водоносного горизонта средняя величина емкостного сопротивления — 6.44, единичный ущерб $\bar{Y}_1 = 0.223$;

для Окско-Протвинского водоносного горизонта емкостное сопротивление — 76.76, единичный ущерб $\bar{Y}_2 = 0.081$.

Общая величина единичного ущерба \bar{Y} в соответствии с долей каждого водозабора составит 0.132 при суммарной нагрузке 60 тыс. м³/сут и 0.152 при 77.8 тыс. м³/сут. Таким образом, по предварительной аналитической оценке прогнозируемая абсолютная величина ущерба ожидается в количестве от 7900 до 11800 м³/сут.

ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ВОДОЗАБОРНОЙ СИСТЕМЫ

Основная цель прогнозного моделирования — оценка величины дополнительного ущерба поверхностному стоку в связи с введением дополнительной (к существующей) эксплуатационной нагрузки на Каширско-Мячковский и Окско-Протвинский водоносные горизонты. При такой постановке фильтрационной задачи рационально и гидродинамически обоснованно ее решение с применением суперпозиции, т.е. относительно изменений функции напора (понижений уровней), а не для полной ее величины.

Площадь активной области модели составляет ~5000 км². Гидрогеодинамическая структура потока принимается плоско-пространственной на основе предпосылок перетекания, а вертикальное строение модели — трехпластовое с жестким режимом перетекания. Прогнозные решения выполнены в нестационарном режиме, обусловленном неравномерным периодическим режимом компенсационного водоотбора и сезонной изменчивостью уровней озер Песьво и Удомля.

Для прогнозных расчетов на основе гидрологического моделирования определены три варианта эксплуатации подземных вод, при которых продолжительность работы КВС составляет

100 лет с производительностью 0.9 м³/с (77.8 тыс. м³/сут) в условиях низкой водности;

10 лет с производительностью 0.7 м³/с (60 тыс. м³/сут) в условиях 10 наихудших лет из 100-летнего периода низкой водности;

16 лет с производительностью 0.9 м³/с (77.8 тыс. м³/сут) в условиях 16 наихудших лет подряд из 100-летнего периода средней водности.

При моделировании работы комбинированной водозаборной системы для каждого расчетного варианта решены две задачи: первая воспроизводит естественные условия формирования подземного стока, а во второй на полученном естественном фоне моделируется работа компенсационных водозаборных сооружений с проектной нагрузкой. По результатам обоих решений рассчитывается дельта-баланс подземного стока [7] и определяется величина ущерба поверхностному стоку на водосборной площади озер Песьво и Удомля.

Первый расчетный вариант. По результатам моделирования работы комбинированной водозаборной системы максимальный ущерб составляет 12.17 тыс. м³/сут и прогнозируется в марте 24-го года 100-летнего периода (рис. 2а). Максимальное понижение уровня подземных вод Каширско-Мячковского водоносного горизонта в этот период составляет 6.88, а Окско-Протвинского 10.71 м. Максимальные величины единичного ущерба достигают 0.15 при средних значениях ~0.10, что меньше предварительной аналитической оценки. Различие аналитического и модельного решений в основном объясняется неравномерностью включения компенсационных водозаборов, которая приводит к накоплению величины ущерба при их длительной работе и, с другой стороны, обеспечивает значительное (вплоть до полного) восполнение сработанных запасов подземных вод при долговременных перерывах в периоды высокой водности.

Второй расчетный вариант. Максимальный ущерб поверхностному стоку на водосборе озер Песьво и Удомля составляет 6.61 тыс. м³/сут и наблюдается в апреле 10-го расчетного года (рис. 2б).

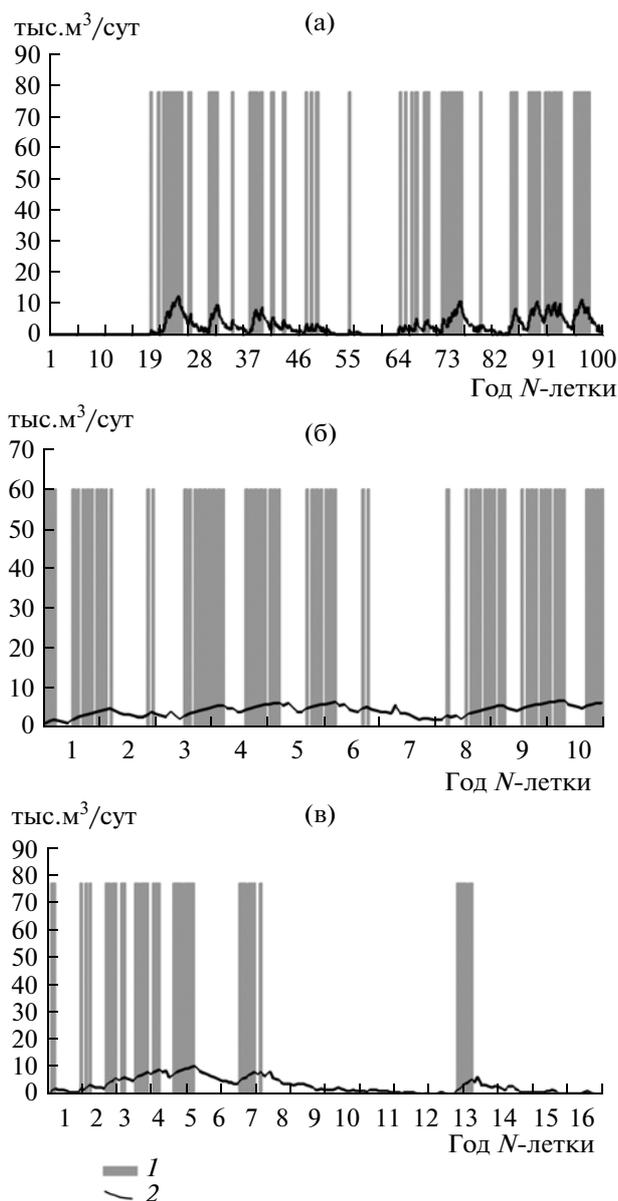


Рис. 2. Дополнительный ущерб поверхностному стоку водосбора озер Удомля и Песьво в условиях периодической работы компенсационных водозаборов для первого (а), второго (б) и третьего (в) расчетных вариантов: 1 – дебит компенсационного водозабора, 2 – ущерб водосбору озер Песьво и Удомля.

Третий расчетный вариант. Максимальный ущерб поверхностному стоку на водосборе озер достигает 10,5 тыс. м³/сут в марте пятого расчетного года (рис. 2в).

Для получения полного значения ущерба поверхностному стоку выполнено стационарное решение для условий проектного переноса городской потребности г. Удомля в объеме 21,6 тыс. м³/сут на участок водозабора Елманова горка. Прогнозный ущерб озерам Удомля и Песьво от его работы составляет 5,29 тыс. м³/сут. Эта величина должна

быть добавлена к результатам решения по каждому из трех рассмотренных вариантов компенсационного водозабора; соответственно, общая величина ущерба составит в первом варианте 17,46, во втором – 11,9, в третьем – 15,79 тыс. м³/сут.

Результаты моделирования показывают, что ущерб речному стоку наступает практически сразу – не позднее, чем через один месяц после включения водозаборов. Первый расчетный вариант – наиболее обеспеченный в части гидрологической постановки задачи и максимально нагруженный эксплуатацией подземных вод для покрытия дефицита в воде Калининской АЭС. Полученные в этом решении понижения уровней подземных вод Каширско-Мячковского и Окско-Протвинского водоносных горизонтов – максимальные.

Максимальный ущерб озерам Песьво и Удомля при работе компенсационного водозабора (с учетом постоянной работы городского водозабора) в количестве 17,46 тыс. м³/сут приводит к уменьшению объема озера на 0,524 млн м³, что составляет 1,52% от минимального объема озер (34,57 млн м³), и к понижению уровня озер на 2 см. Полученные величины ущерба объему и глубине озер несут ответственности и не требуют дополнительного увеличения дебита компенсационного водозабора для их нейтрализации.

Таким образом, результаты прогнозных расчетов показывают возможность применения предлагаемой комбинированной водозаборной системы для обеспечения требуемой надежности водоснабжения Калининской АЭС.

ДИСПЕТЧЕРСКИЕ ПРАВИЛА УПРАВЛЕНИЯ ПОДПИТКОЙ ОЗЕР-ОХЛАДИТЕЛЕЙ ПОДЗЕМНЫМИ ВОДАМИ

Необходимость разработки диспетчерских правил управления определяется возможностью “смягчения” последствий возникновения дефицитов воды в водохозяйственной системе по сравнению с подходом, основанным на распределении ресурсов по заданным приоритетам отдельных водопользователей.

Основной элемент правил управления – диспетчерский график, представляющий собой набор линий в системе координат время – наполнение водохранилища, ограничивающих зоны, в пределах которых управление системой осуществляется по одному и тому же алгоритму. Для системы, включающей “разнородные источники” водоснабжения (например, подземные и поверхностные), задача усложняется, поскольку различны как методы оценки ресурсов подземных вод и поверхностного стока, так и показатели их временной изменчивости.

При использовании ресурсов подземных вод нежелательно осуществлять резкое форсирование отдачи подземного водозабора ввиду ограничений технического характера и допускать длительные периоды остановки оборудования. Исходя из технических условий, требуемые в режиме компенсации характеристики эксплуатируемого месторождения подземных вод не могут быть реализованы полностью, поскольку в большинстве случаев подземные водозаборы проектируются и эксплуатируются на постоянную отдачу, по крайней мере, в течение сезона года.

В системе охлаждения КАЭС основные источники технического водоснабжения – поверхностные водные ресурсы бассейна озер Песьво и Удомля. Сами озера используются как водохранилища многолетнего регулирования.

Расчеты водохозяйственного баланса показывают, что потребность в дополнительных водных ресурсах возникает лишь в отдельные годы в результате группирования маловодных лет и в зависимости от мощности станции.

На стадии разработки диспетчерских правил были пересмотрены требования к эксплуатации подземного водозабора и приняты следующие решения:

компенсация дефицитов в системе технического водоснабжения АЭС осуществляется с меньшими величинами производительности водозабора подземных вод, но с увеличенной продолжительностью его работы; Такая ситуация легче реализуется на месторождении подземных вод, поскольку характеризуется более плавным режимом его эксплуатации;

подземный водозабор включается до момента полной сработки полезной емкости водохранилища; включение подземного водозабора осуществляется при попадании в соответствующую зону диспетчерского графика.

Водохозяйственные имитационные расчеты показали, что в зависимости от схемы эксплуатации подземных водоносных горизонтов приемлемы два значения производительности подземного водозабора – 0.9 и 0.7 м³/с.

При этом дополнительными источниками водоснабжения могут быть существующий городской водозабор, водозабор Елманова горка и новый участок городского водозабора. Результаты фильтрационных расчетов показали, что возникающие при этом ущербы поверхностному стоку достигают критических значений крайне редко, что позволяет говорить о достижении требуемой надежности комбинированной системы водоснабжения.

На рис. 3 представлен диспетчерский график управления подпиткой озер-охладителей подзем-

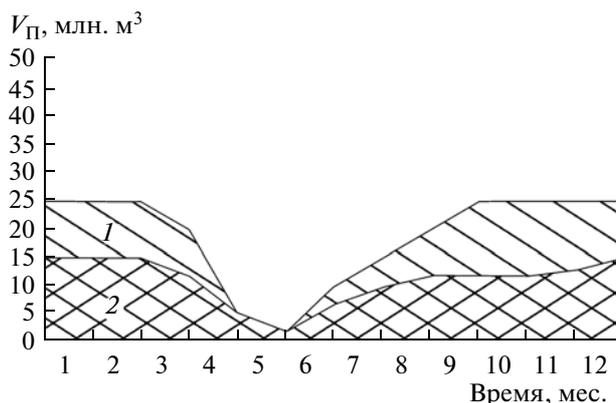


Рис. 3. Диспетчерские графики управления подпиткой озер-охладителей Калининской АЭС при производительности подземного водозабора 0.7 (1) и 0.9 (2) м³/с.

ными водами для двух значений производительности водозабора.

Вариант с производительностью 0.7 м³/с не требует расширения городского водозабора и характеризуется существенно меньшими значениями ущербов поверхностному стоку.

ВЫВОДЫ

На примере энергетического объекта показана эффективность схемы комбинированного использования поверхностных и подземных вод в задаче повышения надежности системы технического водоснабжения.

В основе предлагаемого подхода лежит сочетание методов, с одной стороны, моделирования геофильтрации для оценки как ресурсов подземных вод, так и ущербов поверхностному стоку, с другой – имитационного моделирования водохозяйственной системы на основе стохастического моделирования входных гидрометеорологических характеристик и диспетчеризации как метода управления.

Задача решалась итерационным путем. В результате моделирования выяснялась структура перебоев в водохозяйственной системе, и выбирались расчетные периоды для решения геофильтрационной задачи. По результатам оценки ущербов принималось решение об изменении схемы водоотбора и его производительности. Для новой производительности рассчитывался новый диспетчерский график, и этап повторялся еще раз.

Таким образом, возможны несколько вариантов управления комбинированной системой подпитки водоемов-охладителей, обеспечивающих заданную надежность функционирования системы водоснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Болгов М.В.* Об оценке надежности функционирования Москворецкой водной системы и Волжско-Камского каскада гидроузлов в условиях затяжного маловодья // *Вод. ресурсы.* 2010. Т. 37. № 3. С. 304–312.
2. *Болгов М.В., Раткович Д.Я.* Проблема гидрологического обоснования проектов атомных электростанций (на примере Калининской АЭС) // *Вод. ресурсы.* 1997. Т. 23. № 3. С. 365–370.
3. *Данилов-Данильян В.И., Болгов М.В., Дубинина В.Г. и др.* Оценка допустимых изъятий стока в бассейнах малых рек: основные методические положения // *Вод. ресурсы.* 2006. Т. 33. № 2. С. 224–238.
4. *Зекцер И.С., Джамалов Р.Г., Племенов В.А.* Возможность использования подземных вод для водообеспечения атомных электростанций (на примере Калининской АЭС) // *Вод. ресурсы.* 1996. Т. 23. № 4. С. 500–503.
5. *Ковалевский В.С.* Комбинированное использование ресурсов поверхностных и подземных вод. М.: Науч. мир, 2001. 332 с.
6. *Маслов А.А., Прошкина Е.А., Штенгелов Р.С.* Комбинированные водозаборные системы: принципы и условия организации. // *Материалы ЭКВАТЕК-2008.* М.; Сибико Интернэшнл, 2008. 18–21 с.
7. *Маслов А.А., Штенгелов Р.С.* Типизация баланса эксплуатационных запасов подземных вод. // *Вод. ресурсы.* 2004. Т. 31. № 5. С. 517–525.
8. *Раткович Д.Я.* Гидрологические основы водообеспечения. М.: ИВП РАН, 1993. 428 с.