
**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 621.311.25 : 502.51

**УВЕЛИЧЕНИЕ РЕЖИМОВ ПРОДУВКИ ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ
РОСТОВСКОЙ АЭС В СВЯЗИ С ПУСКОМ
ЭНЕРГОБЛОКОВ № 3 И 4**

© 2021 О.И. Горская, И.В. Медулька

*Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция», Волгодонск,
Ростовская обл., Россия*

Объектом исследования является водоем-охладитель Ростовской АЭС и приплотинный участок Цимлянского водохранилища. В работе проведена разработка оптимального варианта продувки водоема-охладителя Ростовской АЭС в круглогодичном режиме для обеспечения нормализации его минерализации, при соблюдении экологических требований по термическому и гидрохимическому загрязнению приплотинного участка Цимлянского водохранилища. Применение современного метода численного моделирования гидродинамики и тепло- и массопереноса, а также метода расчета солевых балансов, основанного на законе сохранения массы, позволило определить наиболее оптимальный режим осуществления продувки водоема-охладителя в круглогодичном режиме, который обеспечит нормализацию и поддержание минерализации воды в водоеме-охладителе при минимальном объеме его продувки и, соответственно, наименьшей степени влияния на термический и гидрохимический режимы приплотинного участка Цимлянского водохранилища.

Ключевые слова: Ростовская АЭС, водоем-охладитель, минерализация воды, Цимлянское водохранилище, приплотинный участок, градирия, продувка, расчет гидрохимического режима, солевой баланс, годовой объем.

Поступила в редакцию 15.02.2021

После доработки 24.02.2021

Принята к печати 04.03.2021

Ростовская атомная станция расположена в Ростовской области, на берегу Цимлянского водохранилища, в 13,5 км от города Волгодонска (рис. 1).



Рисунок 1 – Вид на Ростовскую АЭС с водоема-охладителя
[View of the Rostov NPP from the cooling pond]

Ростовская АЭС относится к серии унифицированных проектов АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000. Строительство станции начато в октябре 1979 года. Начало эксплуатации станции и работы водоема-охладителя приурочено к 2000 году.

Первой очередью строительства станции было предусмотрено сооружение двух энергоблоков №№ 1 и 2 с реакторной установкой типа В-320, мощностью до 1000 МВт. Второй очередью строительства станции предусмотрено сооружение еще двух энергоблоков – №№ 3 и 4 – с реакторной установкой типа В-320, мощностью до 1070 МВт.

Энергоблок № 1 введен в промышленную эксплуатацию в 2001 г., энергоблок № 2 – в 2010 г., энергоблок № 3 – 17 сентября 2015 году, энергоблок № 4 – 28 сентября 2018 года. Ростовская АЭС является одним из крупнейших предприятий энергетики на Юге России. Атомная станция обеспечивает более 50% производства электроэнергии в Ростовской области. Суточная выработка составляет свыше 100 млн. кВт*ч.

Система технического водоснабжения Ростовской АЭС для охлаждения основного оборудования (конденсаторов турбин, конденсаторов ТПН и вспомогательных потребителей машзала) блоков №№ 1 и 2 организована по оборотной схеме, с использованием в качестве охладителя водоема-охладителя Ростовской АЭС, который представляет собой искусственный водоем отсечного типа, образованный путем возведения земляной плотины в мелководной левобережной части приплотинного плеса Цимлянского водохранилища (рис. 2).



Рисунок 2 – Место сброса продувочных вод из водоема-охладителя в Цимлянское водохранилище
[Place of discharge of blowdown water from the cooling reservoir into the Tsimlyansk reservoir]

Система технического водоснабжения основного оборудования (конденсаторов турбин, конденсаторов ТПН и вспомогательных потребителей машзала) энергоблоков №№ 3 и 4 организована по оборотной схеме, в качестве охладителя используются две градирни (по одной на каждый энергоблок). Технологической особенностью системы технического водоснабжения энергоблоков № 3 и № 4 и водохозяйственного баланса водоема-охладителя [1] является сброс вод, поступающих от продувки градирен, в водоем-охладитель. Таким образом, гидрохимический режим водоема-охладителя Ростовской АЭС формируется за счет:

- концентрации солей при испарении воды из водоема-охладителя;
- поступления в водоем-охладитель солей:
 - а) с подпиточной водой из Цимлянского водохранилища,
 - б) при продувке градирен блоков №№ 3 и 4,
 - в) поверхностных стоков с водосборной площади прилегающей территории,
 - г) нормативно очищенных поверхностных стоков с территории станции, нормативно очищенных бытовых стоков, нейтрализованных соледержащих стоков химической водоочистки (ХВО) с учетом ее модернизации;
- уноса солей из водоема-охладителя:
 - а) с фильтрационной водой через земляную плотину,
 - б) при осуществлении продувки водоема-охладителя.

Ввиду планомерно увеличивающейся и значительной минерализации воды в водоеме-охладителе, начиная с 2010 по 2018 год включительно осуществлялась его

ежегодная продувка в течение 62 суток – с 31 марта по 31 мая – в объеме 8,57 млн. м³ [2]. Осуществление сброса продувочных вод градирни энергоблока № 3 усугубило гидрохимический режим водоема-охладителя. Так, по состоянию на начало 2018 года гидрохимический режим водоема-охладителя Ростовской АЭС характеризовался превышением ПДК_{рыб} – минерализация воды в водоеме-охладителе превышала допустимое значение 1000 мг/дм³. Пуск энергоблока № 4 в конце 2018 года в промышленную эксплуатацию и сброс продувочных вод градирни четвертого энергоблока еще более усугубил гидротермический и гидрохимический режимы водоема-охладителя Ростовской АЭС [3].

В 2019 г. Ростовской АЭС был осуществлен переход на новый, рекомендованный АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», режим продувки водоема-охладителя, осуществление продувки расходом 1,6 м³/с с апреля по ноябрь (244 дня в году). Однако, в связи с возникшими причинами технического свойства, осуществление продувки ВО в объеме 33,7 млн. м³ в 2019 году не было осуществлено: фактический объем продувки составил всего 20,7 млн. м³.

Однонаправленное воздействие двух факторов: ввод в промышленную эксплуатацию в сентябре 2018 года энергоблока № 4 и невозможность осуществления продувки водоема-охладителя в 2019 году в требуемом объеме обусловило усугубление ситуации по его гидрохимическому режиму: минерализация воды в водоеме-охладителе по состоянию на 2020 год составляла 1350 мг/дм³.

Эксплуатация водоема-охладителя Ростовской АЭС по гидрохимическим условиям без осуществления его продувки невозможна, так как в условиях постоянного поступления солей с подпиточной водой из Цимлянского водохранилища, продувочной водой градирен энергоблоков №№ 3 и 4 и прочих сбросов в водоем-охладитель, а также значительной величины естественного и дополнительного испарения с водной поверхности водоема-охладителя в нем происходит планомерное постоянное накопление солей.

Нормализация гидрохимического режима водоема-охладителя без осуществления его продувки невозможна. Следует особо отметить, что накопление солей происходило даже в условиях отсутствия сбросов продувочных вод градирен энергоблоков №№ 3 и 4 только по причине постоянного выпаривания воды ВО (пресная вода испаряется, а минерализация увеличивается).

Ввиду вышеуказанных обстоятельств в 2020 году стал актуальным вопрос обоснования нового режима продувки водоема-охладителя Ростовской АЭС с увеличенным годовым объемом продувки, который позволит нормализовать минерализацию воды в нем и при этом будет оказывать наименьшее влияние на гидротермических и гидрохимический режимы приплотинного участка Цимлянского водохранилища [4].

Выполненные в 2018 году АО «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б.Е. Веденеева» исследования по рассмотрению различных вариантов продувки, позволили сделать выводы, что термические режимы водоема-охладителя Ростовской АЭС и приплотинного участка Цимлянского водохранилища в современных условиях эксплуатации не являются лимитирующим обстоятельством для вариантов осуществления продувки в круглогодичном режиме с расходом продувочных вод в диапазоне значений 1,0 ÷ 1,6 м³/с, в этих случаях контролю подлежит только гидрохимический режим водоема-охладителя и приплотинного участка Цимлянского водохранилища.

Оценка возможности осуществления продувки водоема-охладителя Ростовской АЭС в круглогодичном режиме, а также разработка оптимального варианта продувки водоема-охладителя Ростовской АЭС для обеспечения нормализации минерализации воды в нем при наименьшей нагрузке на термический и

гидрохимический режимы приплотинного участка Цимлянского водохранилища была проведена в 2020 году АО «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б.Е. Веденеева».

При расчетах солевых балансов водоема-охладителя Ростовской АЭС начальная минерализация воды, а также начальная концентрация сульфатов и меди в нем принимались равными 1350 мг/дм³, 400 мг/дм³ и 0,0060 мг/дм³ соответственно.

Для водоема-охладителя Ростовской АЭС при выборе варианта его продувки по гидрохимическим показателям критерием является удержание показателя по минерализации не выше значения ПДК_{рыб.} = 1000 мг/дм³.

Для выполнения численного моделирования распространения гидрохимического загрязнения в приплотинном участке Цимлянского водохранилища при осуществлении продувки водоема-охладителя использовалась разработанная АО «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б.Е. Веденеева» трехмерная математическая модель гидродинамики с модулем тепло- и массопереноса, в которой, в том числе, применяются современные $k-\epsilon$ и $k-\omega$ модели турбулентности [5-11]. Полнообъемные сведения об описании используемой численной модели, ее тестированию и верификации представлены в [12].

Алгоритм выполнения расчетов при рассмотрении каждого варианта продувки водоема-охладителя Ростовской АЭС в круглогодичном режиме включает в себя:

- расчет солевого баланса водоема-охладителя (по концентрациям сульфатов и меди) для среднего по гидрометеорологическим условиям года ($P = 50 \%$) и для жаркого маловодного года ($P = 95 \%$);

- прогноз изменения концентраций сульфатов и меди в воде водоема-охладителя на перспективу работы станции в 40 лет (чередование 18-ти лет со средними гидрометеорологическими условиями и 4-х жарких и маловодных года) при мощности 4000 МВт;

- численное моделирование дисперсии химических примесей в приплотинной части Цимлянского водохранилища при выпуске продувочных вод из водоема-охладителя для среднего по гидрометеорологическим условиям года ($P = 50 \%$) и для жаркого маловодного года ($P = 95 \%$);

- расчет величин концентрации сульфатов и меди в 500-метровых створах от точки выпуска продувочных вод водоема-охладителя в приплотинную часть Цимлянского водохранилища на перспективу работы станции в 40 лет (чередование 18-ти лет со средними гидрометеорологическими условиями и 4-х жарких и маловодных года) при мощности 4000 МВт.

На основании проведенных расчетов [13] выполняется анализ полученных результатов на предмет соблюдения экологических требований по гидрохимическому загрязнению приплотинного участка Цимлянского водохранилища при выпуске продувочных вод из водоема-охладителя Ростовской АЭС и делается вывод о возможности реализации рассматриваемого варианта продувки водоема-охладителя.

Были рассмотрены два варианта осуществления круглогодичной продувки водоема-охладителя:

Вариант № 1 предусматривает осуществление круглогодичной продувки водоема-охладителя с постоянной величиной продувки, равной 1,6 м³/с, годовой объем продувки ВО по Варианту № 1 составляет 50,5 млн. м³.

Анализ прогноза изменения минерализации воды в водоеме-охладителе Ростовской АЭС при осуществлении его продувки по Варианту № 1 позволяет сделать следующие выводы:

- нормализация минерализации воды в водоеме-охладителе прогнозируется через 3 года осуществления его продувки: среднегодовая минерализация воды в нем составит около 935 мг/дм³, а ее максимальное годовое значение – около 990 мг/дм³;

- в первые 4 года осуществления продувки водоема-охладителя минерализация воды в нем интенсивно снижается и стабилизируется к 6-му году: после 5-ти лет осуществления продувки водоема-охладителя среднегодовая минерализация воды в нем прогнозируется в размере около 920 мг/дм³, а ее максимальное годовое значение – около 980 мг/дм³;

- с первого года 4-летнего маловодного жаркого периода среднегодовая минерализация воды в водоеме-охладителе возрастает до 970 мг/дм³, а ее максимальное годовое значение – до 1045 мг/дм³. После завершения 4-летнего маловодного и жаркого периода среднегодовая минерализация воды в водоеме-охладителе прогнозируется в размере 1010 мг/дм³, а ее максимальное годовое значение – 1080 мг/дм³;

- после маловодного жаркого 4-летнего периода нормализация минерализации воды в водоеме-охладителе прогнозируется через 2 года, а ее стабилизация – через 3 года.

Вариант № 2 предусматривает осуществление круглогодичной продувки водоема-охладителя с переменной величиной продувки, годовой объем продувки по Варианту № 2 составляет 42,6 млн. м³.

Анализ прогноза изменения минерализации воды в водоеме-охладителе Ростовской АЭС при осуществлении его продувки по Варианту № 2 позволяет сделать следующие выводы:

- нормализации минерализации воды в водоеме-охладителе не наступает: если среднегодовая минерализация воды в водоеме-охладителе прогнозируется в размере около 995 мг/дм³ после 3-х лет продувки, то ее максимальное годовое значение со временем опустится только до значения 1020 мг/дм³;

- в первые четыре года осуществления продувки водоема-охладителя минерализация воды в нем интенсивно снижается и стабилизируется к 6-му году: после 5-ти лет продувки водоема-охладителя среднегодовая минерализация воды в нем прогнозируется в размере около 975 мг/дм³, а ее максимальное годовое значение – около 1020 мг/дм³;

- с первого года наступления 4-летнего маловодного и жаркого периода среднегодовая минерализация воды в водоеме-охладителе возрастает до 1025 мг/дм³, а ее максимальное годовое значение – до 1080 мг/дм³. После завершения 4-летнего маловодного и жаркого периода среднегодовая минерализация воды в водоеме-охладителе прогнозируется в размере 1075 мг/дм³, а ее максимальное годовое значение – 1120 мг/дм³;

- после окончания маловодного жаркого 4-летнего периода, нормализация минерализации в водоеме-охладителе до среднегодового значения 990 мг/дм³ прогнозируется через 2 года, при этом ее максимальное годовое значение будет по-прежнему превышать ПДК_{рыб} 1000 мг/дм³.

Подводя итоги рассмотрения данных вариантов, можно сказать, что только Вариант № 1 может рассматриваться как возможный для нормализации минерализации воды в водоеме-охладителе. Однако, даже при таком варианте продувки, при наступлении жарких маловодных лет, минерализация воды в водоеме-охладителе будет превышать ПДК_{рыб}, но это превышение будет незначительным – около 10 %.

По результатам проведенных расчетов гидрохимического режима приплотинного участка Цимлянского водохранилища при осуществлении продувки водоема-охладителя Ростовской АЭС в круглогодичном режиме по Варианту № 1, с расходом продувочной воды 1,6 м³/с (равномерно в течение года), были сделаны выводы:

1. Для годовых периодов, как со средними гидрометеорологическими условиями, так и для жарких маловодных лет, в 500-метровых створах от точки выпуска продувочных вод из водоема-охладителя Ростовской АЭС при его продувке по Варианту № 1 будет наблюдаться превышение ПДК_{рыб} как по сульфатам, так и по меди.

2. Выраженная внутригодовая неравномерность по концентрации сульфатов и меди в акватории приплотинного участка Цимлянского водохранилища свидетельствует о необходимости перераспределения годового объема продувки водоема-охладителя с целью снижения его влияния на гидрохимический режим Цимлянского водохранилища в зимние месяцы.

3. Ввиду отмеченных обстоятельств, был выполнен ряд дополнительных расчетов с целью определения оптимального объема продувки для нормализации минерализации воды в водоеме-охладителе и ее поддержания на перспективу, а также минимально возможного влияния на гидрохимический режим приплотинного участка Цимлянского водохранилища во все фазы годового гидрологического цикла водного объекта.

Таким образом, АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» был предложен к рассмотрению третий дополнительный вариант круглогодичной продувки водоема-охладителя Ростовской АЭС с переменной в разрезе года величиной расхода продувки (табл. 1).

Таблица 1 – Величина продувки водоема-охладителя Ростовской АЭС в разрезе водохозяйственного года и ее годовой объем по дополнительному Варианту № 3 [The amount of blowdown of the cooling pond of the Rostov NPP in the context of the water management year and its annual volume according to the additional Option No. 3]

Месяц	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	Годовой объем продувки V, млн.м ³
Величина продувки Q, м ³ /с	0,4	1,6	3,2	3,2	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	0,4	0,4	0,4	46,3

Как видно из таблицы 1, величина продувки водоема-охладителя Ростовской АЭС в зимние месяцы (декабрь-март) уменьшена в 4 раза – с 1,60 м³/с до 0,40 м³/с. При этом, чтобы сохранить необходимый годовой объем продувки водоема-охладителя Ростовской АЭС, величина продувки в половодные месяцы (май-июнь) увеличена в 2 раза – с 1,60 м³/с до 3,20 м³/с. Также отметим, что годовой объем продувки водоема-охладителя Ростовской АЭС по дополнительному Варианту № 3 составляет 46,3 млн. м³ и является оптимальным (минимально допустимым) объемом продувки ВО для нормализации минерализации ВО и ее поддержания на перспективу эксплуатации АЭС при мощности 4000 МВт с учетом незначительного превышения ПДК_{рыб} в период жарких маловодных лет.

Такой режим продувки водоема-охладителя Ростовской АЭС позволяет снизить нагрузку на гидрохимический режим приплотинного участка Цимлянского водохранилища при осуществлении продувки водоема-охладителя в зимние месяцы (в период ледостава) и в целом сбалансировать нагрузку на гидрохимический режим внутри года.

Анализ водохозяйственных балансов водоема-охладителя Ростовской АЭС позволяет констатировать, что при осуществлении его продувки по дополнительному Варианту № 3 возможность поддержания НПУ в водоеме-охладителе при его подпитке из Цимлянского водохранилища в жаркие маловодные годы сохраняется. В годы со средними гидрометеорологическими условиями из-за низкой величины продувки водоема-охладителя в зимние месяцы, уровень воды в нем весной будет достигать до 36,13 м абс., что незначительно превышает НПУ.

При анализе прогноза изменений минерализации воды в водоеме-охладителе Ростовской АЭС при осуществлении его продувки по дополнительному Варианту № 3 можно сделать следующие выводы:

– нормализация минерализации воды в водоеме-охладителе прогнозируется через 3 года осуществления его продувки: среднегодовая минерализация воды в нем составит около 970 мг/дм³, а ее максимальное годовое значение – около 1000 мг/дм³;

– в первые 4 года осуществления продувки водоема-охладителя минерализация воды в нем интенсивно снижается и стабилизируется к 6-му году: после 5-ти лет продувки водоема-охладителя среднегодовая минерализация воды в нем прогнозируется в размере около 950 мг/дм³, а ее максимальное годовое значение – около 985 мг/дм³;

– с первого года наступления маловодного жаркого 4-летнего периода среднегодовая минерализация воды в водоеме-охладителе возрастает до 995 мг/дм³, а ее максимальное годовое значение – до 1040 мг/дм³. После 4-го года среднегодовая минерализация воды в водоеме-охладителе прогнозируется в размере 1050 мг/дм³, а ее максимальное годовое значение – 1075 мг/дм³;

– после завершения маловодного жаркого 4-летнего периода нормализация минерализации воды в водоеме-охладителе прогнозируется через 2 года, а ее стабилизация – через 4 года.

Таким образом, по критерию нормализации минерализации в водоеме-охладителе и удержания ее при эксплуатации Ростовской АЭС на перспективу 40 лет при мощности 4000 МВт, Вариант № 3 оказался наиболее оптимален к реализации.

Анализ прогноза изменения содержания сульфатов и меди в водоеме-охладителе Ростовской АЭС, а также их превышения ПДК_{рыб} в акватории приплотинного участка Цимлянского водохранилища при осуществлении продувки водоема-охладителя Ростовской АЭС по дополнительному Варианту № 3 позволяет сделать следующие выводы:

По концентрации сульфатов:

– в первый год осуществления продувки водоема-охладителя среднегодовая концентрация сульфатов в акватории приплотинного участка Цимлянского водохранилища (в 500-метровых створах от точки выпуска продувочных вод водоема-охладителя) прогнозируется в размере около 110-115 мг/дм³ (превышение ПДК_{рыб} на 10,0-15,0 %), а ее максимальные за год среднедекадные значения – около 125-135 мг/дм³ (превышение ПДК_{рыб} на 25,0-35,0 %);

– через 4 года осуществления продувки водоема-охладителя концентрация сульфатов в воде приплотинного участка Цимлянского водохранилища стабилизируется: среднегодовая концентрация сульфатов будет составлять около 105 мг/дм³ (превышение ПДК_{рыб} на 5,0 %), а ее максимальные за год среднедекадные значения – около 110-115 мг/дм³ (превышение ПДК_{рыб} на 10,0-15,0 %);

– при наступлении маловодного жаркого 4-летнего периода, среднегодовая концентрация сульфатов в акватории приплотинного участка Цимлянского водохранилища возрастает до 105-115 мг/дм³ (превышение ПДК_{рыб} на 5,0-15,0 %), а ее максимальные за год среднедекадные значения – до 120-140 мг/дм³ (превышение ПДК_{рыб} на 20,0-40,0 %);

– после окончания маловодного жаркого 4-летнего периода концентрация сульфатов в воде приплотинного участка Цимлянского водохранилища восстанавливается до стабильных значений примерно через 3 года.

По концентрации меди:

– в первый год осуществления продувки водоема-охладителя среднегодовая концентрация меди в воде приплотинного участка Цимлянского водохранилища (в 500-метровых створах от точки выпуска продувочных вод водоема-охладителя) прогнозируется в размере около 0,0012-0,0013 мг/дм³ (превышение ПДК_{рыб} на 20,0-30,0 %), а ее максимальные за год среднедекадные значения – около 0,0014-0,0017 мг/дм³ (превышение ПДК_{рыб} на 40-70 %);

– через 3 года осуществления продувки водоема-охладителя концентрация меди в воде приплотинного участка Цимлянского водохранилища стабилизируется: среднегодовая концентрация меди будет составлять около 0,0012-0,0013 мг/дм³ (превышение ПДК_{рыб} на 20,0-30,0 %), а ее максимальные за год среднедекадные значения – около 0,0014-0,0015 мг/дм³ (превышение ПДК_{рыб} на 40,0-50,0 %);

– при наступлении жаркого маловодного 4-летнего периода, который следует после стабилизации концентрации меди в воде приплотинного участка Цимлянского водохранилища, среднегодовая концентрация меди в нем возрастает до 0,0013-0,0015 мг/дм³ (превышение ПДК_{рыб} на 30,0-50,0 %). Максимальные за год ее среднедекадные значения – до 0,0017-0,0021 мг/дм³ (превышение ПДК_{рыб} на 70,0-110 %);

– после окончания маловодного жаркого 4-летнего периода, концентрация меди в воде приплотинного участка Цимлянского водохранилища восстанавливается до стабильных значений через 2 года.

Итоговые выводы для дополнительного Варианта № 3 осуществления продувки в круглогодичном режиме следующие:

1. В целом, для годовых периодов, как со средними гидрометеорологическими условиями, так и для жарких маловодных лет, в 500-метровых створах от точки выпуска продувочных вод из водоема-охладителя Ростовской АЭС при его продувке по дополнительному Варианту № 3 будет наблюдаться превышение ПДК_{рыб} как по сульфатам, так и по меди.

2. Однако, в сравнение с Вариантом № 1, дополнительный Вариант № 3 продувки водоема-охладителя Ростовской АЭС существенно конкурентнее практически по всем параметрам. Ниже представлено детальное сравнение Варианта № 3 с Вариантом № 1 для 40-летнего периода перспективы эксплуатации РоАЭС при мощности 4 000 МВт.

В течение 18-летнего периода со средними по гидрометеорологическим параметрам условиями для гидрохимического режима приплотинного участка Цимлянского водохранилища характерно:

первый год продувки водоема-охладителя:

– среднегодовое превышение ПДК_{рыб} сульфатов снижается на 5 % по сравнению с Вариантом № 1, а по ионам меди – на 20 %;

– максимальные среднедекадные превышения ПДК_{рыб} сульфатов за год снижаются на 35 % по сравнению с Вариантом № 1, а меди – на 60 %;

– период характеризуется относительно равномерным распределением нагрузки на гидрохимический режим приплотинного участка Цимлянского водохранилища, без продолжительных периодов превышения ПДК_{рыб} по содержанию сульфатов и меди;

период стабильного гидрохимического режима (примерно с 4-го года в ряду 18-летнего периода со средними гидрометеорологическими условиями):

– среднегодовые превышения ПДК_{рыб} сульфатов снижены на 5 % по сравнению с Вариантом № 1, а меди – на 10 %;

– максимальные среднедекадные превышения ПДК_{рыб} сульфатов за год снижены на 10 % по сравнению с Вариантом № 1, а меди – на 30 %;

– относительно ровное внутригодовое распределение нагрузки на гидрохимический режим, без затяжных периодов с максимальным превышением ПДК_{рыб} сульфатов и меди.

В течение 4-летнего жаркого и маловодного периода для гидрохимического режима приплотинного участка Цимлянского водохранилища характерно:

– среднегодовые превышения ПДК_{рыб} сульфатов снижены по сравнению с Вариантом № 1 на 5 %, а меди – на 10 %;

– максимальные среднедекадные превышения ПДК_{рыб} по содержанию сульфатов по сравнению с Вариантом № 1 сопоставимы, а меди – увеличены на 15 %.

– относительно равномерное внутригодовое распределение нагрузки на гидрохимический режим, без продолжительных периодов с максимальным превышением ПДК_{рыб} по содержанию сульфатов и меди.

3. При рассмотрении результатов расчетов по Варианту № 3, в части содержания меди и превышения по ПДК_{рыб} в акватории приплотинного участка Цимлянского водохранилища, необходимо учитывать, что этот показатель относится к малым величинам, не превышает точность проведения измерений, а также возможного обеспечения точности численного моделирования. Так, например, превышение ПДК_{рыб} по меди на 40 % означает, что в абсолютных значениях это составляет всего 0,0004 мг/дм³.

4. Дополнительный Вариант № 3 продувки водоема-охладителя Ростовской АЭС с переменной в разрезе года величиной продувочных вод (от 0,40 м³/с до 3,2 м³/с) является наиболее оптимальным из всех возможных вариантов при существующей технологической схеме осуществления продувки водоема-охладителя. Вариант № 3 предполагает минимально допустимый годовой объем продувки водоема-охладителя Ростовской АЭС для нормализации минерализации воды в нем, а также позволяет получить относительно равномерную (внутри года) и наименьшую из возможных в рассматриваемых условиях нагрузку на гидрохимический режим приплотинного участка Цимлянского водохранилища при осуществлении продувки водоема-охладителя.

Учитывая все вышеизложенные факторы Ростовской АЭС был принят Вариант № 3 осуществления продувки в круглогодичном режиме с переменной в разрезе года величиной расхода продувки. 01.09.2020 года Донским бассейновым водным управлением Федерального агентства водных ресурсов Ростовской АЭС было выдано Решение о предоставлении водного объекта в пользование на осуществление круглогодичной продувки водоема-охладителя с разрешенным объемом сброса продувочных вод 46344,96 тыс. м³/год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водный баланс водоема-охладителя Ростовской АЭС, 2020 г. // Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция». – 2020. – 3 с.
2. Горская, О.И. Обеспечение экологически приемлемого состояния системы оборотного водоснабжения атомной станции при применении технологии «продувки» водоема-охладителя Ростовской АЭС / О.И. Горская // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 2(19). – С. 16-28.
3. Отчет о качестве сточных, чистых (без очистки) и поверхностных вод Ростовской АЭС, 2019 г. // Эколого-аналитический центр Филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция». – 2020. – 72 с.
4. Правила использования водных ресурсов Цимлянского водохранилища. Утверждены приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 114 от 02.06.2016 г. – Москва. – 2016. – 105 с.
5. РД 153-34.2-21.144-2003 Методические указания по технологическим расчетам водоемов-охладителей // ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». – Санкт-Петербург, 2004. – 55 с.
6. Churuksaeva V, Starchenko A. Mathematical modeling of a river stream based on a shallow water approach. *Procedia Computer Science*, 2015, vol. 66, pp. 200-209.
7. Fe J., Navarrina F., Puertas J., Vellando P., Ruiz D. Experimental validation of two depth averaged turbulence models. *International journal for numerical methods in fluids*, 2000.
8. Vazquez-Cendon M.E., Cea L., Puertas J. The shallow water model: the relevance of geometry and turbulence. *Monografias de la Real Academia de Ciencias de Zaragoza*, 2009, 31, pp. 217-236.
9. Rodriguez-Cuevas C., Couder-Castaneda C., Flores-Mendez E., Herrera-Diaz I.E., Cisneros-Almazan R. Modelling Shallow Water Wakes Using a Hybrid Turbulence Model. *Hindawi Publishing Corporation Journal of Applied Mathematics*, 2014, article ID 714031, 10 p.
10. Вольцингер, Н.Е. Длинноволновая динамика прибрежной зоны / Н.Е. Вольцингер, К.А. Клеванный, Е.Н. Пелиновский. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1989. – 272 с.

11. Боуден, К. Физическая океанография прибрежных вод / К. Боуден : пер. с англ. – Москва : Мир, 1988. – 324 с.
12. Научно-технический отчет «Определение влияния продувки градилен блоков 3,4 на гидрохимический режим водоема-охладителя РоАЭС блоков №№ 1, 2 и Цимлянское водохранилище, определение оптимального объема продувки водоема-охладителя, согласование увеличения квоты сброса продувочных вод водоема-охладителя с Федеральным агентством водных ресурсов», 2018 г. // АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». – Санкт Петербург, 2018. – 117 с.
13. Научно-технический отчет «Оценка влияния продувки градилен блоков №№ 3 и 4 в круглогодичном режиме на гидрохимический режим водоема-охладителя РоАЭС (Блоки №№ 1 и 2) и Цимлянское водохранилище», 2020 г. // АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». – Санкт Петербург, 2020. – 114 с.

REFERENCES

- [1] Vodnyy balans vodoyoma-okhladitelya Rostovskoy AES, 2020 g. [Water Balance of the Cooling Pond of Rostov NPP, 2020]. Filial AO «Kontsern Rosenergoatom» «Rostovskaya atomnaya stantsiya» [«Rostov nuclear power plant» Branch of Rosenergoatom Concern JSC]. 2020. 3 p. (in Russian).
- [2] Gorskaya O.I. Obespecheniye ekologicheskoi priyemlemogo sostoyaniya sistemy oborotnogo vodosnabzheniya atomnoy stantsii pri primeneniі tekhnologii «produvki» vodoyema-okhladitelya Rostovskoy AES [Ensuring an Environmentally Acceptable State of the Recycling Water Supply System of the Nuclear Power Plant When Using the «Blowdown» Technology of the Cooling Pond of the Rostov NPP]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2016. №2(19). P. 16-28 (in Russian).
- [3] Otchet o kachestve stochnykh, chistyykh (bez ochistki) i poverkhnostnykh vod Rostovskoy AES, 2019 g. [Report on the Quality of Waste, Clean (without Treatment) and Surface Waters of the Rostov NPP, 2019]. Ekologo-analiticheskiy tsentr Filiala AO «Kontsern Rosenergoatom» «Rostovskaya atomnaya stantsiya» [Ecological and Analytical Center of the Branch of Rosenergoatom Concern JSC «Rostov Nuclear Power Plant»]. 2020. 72 p. (in Russian).
- [4] Pravila ispol'zovaniya vodnykh resursov Tsimlyanskogo vodokhranilishcha. Utverzhdeny prikazom Ministerstva prirodnnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii № 114 ot 02.06.2016 g. [Rules for the Use of Water Resources of the Tsimlyansk Reservoir. Approved by order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation No. 114 dated 02.06.2016]. Moskva [Moscow]. 2016. 105 p. (in Russian).
- [5] RD 153-34.2-21.144-2003 Metodicheskiye ukazaniya po tekhnologicheskim raschotam vodoyomov-okhladiteley xRD 153-34.2-21.144-2003 Guidelines for Technological Calculations of Cooling Reservoirs]. OAO «VNIIG im. B.Ye. Vedeneyeva» [JSC «VNIIG im. B.E. Vedenev»]. St. Petersburg, 2004. 5 p. (in Russian).
- [6] Vladislava Churukhaeva, Alexander Starchenko. Mathematical Modeling of a River Stream Based on a Shallow Water Approach. Procedia Computer Science, 2015, vol. 66, pp. 200-209 (in English).
- [7] J. Fe, F. Navarrina, J. Puertas, P. Vellando, D. Ruiz. Experimental Validation of Two Depth Averaged Turbulence Models. International Journal For Numerical Methods in Fluids, 2000 (in English).
- [8] M. Elena Vazquez-Cendon, Luis Cea, Jeronimo Puertas. The Shallow Water Model: Relevance of Geometry and Turbulence. Monografias de la Real Academia de Ciencias de Zaragoza, 2009, 31, pp. 217-236 (in English).
- [9] Clement Rodriguez-Cuevas, Carlos Couder-Castaneda, Esteban Flores-Mendez, Israel Enrique Herrera-Diaz, Rodolfo Cisneros-Almazan. Modelling Shallow Water Wakes Using a Hybrid Turbulence Model. Hindawi Publishing Corporation Journal of Applied Mathematics, 2014, article ID 714031, 10 p. (in English).
- [10] Volzinger N.Ye., Klevanny K.A., Pelinovsky Ye.N. Dlinnovolnovaya dinamika pribrezhnoy zony [Long-Wave Dynamics of the Coastal Zone]. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1989. 272 p. (in Russian).
- [11] Bouden K. Fizicheskaya okeanografiya pribrezhnykh vod: perevod s angliyskogo [Physical Oceanography of Coastal Waters: Translation from English]. Moscow: Mir [Moskva: Mir]. 1988. 324 p. (in Russian).
- [12] Nauchno-tekhnicheskiy otchet «Opredeleniye vliyaniya produvki gradiren blokov 3,4 na gidrokhimicheskiy rezhim vodoyoma-okhladitelya RoAES blokov №№ 1, 2 i Tsimlyanskoye vodokhranilishche, opredeleniye optimal'nogo ob'yoma produvki vodoyoma-okhladitelya, soglasovaniye uvelicheniya kvoty sbrosa produvochnykh vod vodoyoma-okhladitelya s Federal'nym agentstvom vodnykh resursov», 2018 g. [Scientific and technical report «Determination of the Effect

- of Blowing Cooling Towers of Blocks 3,4 on the Hydrochemical Regime of the Cooling Pond of RoNPP of Blocks 1, 2 and Tsimlyansk Reservoir, Determination of the Optimal Volume of Blowdown of the Cooling Pond, Approval of an Increase in the Quota of Blowdown Water Discharge of the Cooling Pond with the Federal Agency for Water Resources», 2018]. AO «VNIIG im. B.Ye. Vedeneyeva» [VNIIG im B.E. Vedeneev]. Sankt Peterburg [St. Petersburg]. 2018. 117 p. (in Russian).
- [13] Nauchno-tekhnicheskiy otchet «Otsenka vliyaniya produvki gradiren blokov №№ 3 i 4 v kruglogodichnom rezhime na gidrokhimicheskiy rezhim vodoyoma-okhladitelya RoAES (Blok №№ 1 i 2) i Tsimlyanskoye vodokhranilishche», 2020 g. [Scientific and Technical Report «Assessment of the Effect of Blowing Cooling Towers of Blocks No. 3 and 4 in a Year-Round Mode on the Hydrochemical Regime of the Cooling Pond of RoNPP (Blocks No. 1 and 2) and Tsimlyanskoe Reservoir», 2020]. AO «VNIIG im. B.Ye. Vedeneyeva» [VNIIG im B.E. Vedeneev]. Sankt Peterburg [St. Petersburg]. 2020. 114 p. (in Russian).

Increase in Purge Modes of the Rostov NPP Water Cooler in Connection with No. 3 and 4 Power Unit Start-Up

O.I. Gorskaya¹, I.V. Medulka²

«Rostov nuclear power plant» branch of Rosenergoatom Concern JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360

¹ORCID iD: 0000-0003-3377-4654

¹e-mail: gorskaya-oi@vdpnp.rosenergoatom.ru

²e-mail: medulka-iv@vdpnp.rosenergoatom.ru

Abstract – The object of research is the cooling pond of the Rostov NPP and the dam section of the Tsimlyansk reservoir. This work carries out the development of the optimal variant of blowing the cooling pond of the Rostov NPP in a year-round mode to provide the normalization of its mineralization, while observing the environmental requirements for thermal and hydrochemical pollution of the dam section of the Tsimlyansk reservoir. The use of a modern method of numerical modeling of hydrodynamics and heat and mass transfer as well as a method for calculating salt balances based on the law of conservation of mass, made it possible to determine the most optimal mode of blowing a cooling reservoir in a year-round mode which will provide the normalization and maintenance of water salinity in the cooling reservoir with the minimum volume of its blowdown and, accordingly, the least degree of influence on the thermal and hydrochemical regimes of the near-dam section of the Tsimlyansk reservoir.

Keywords: Rostov NPP, cooling pond, water salinity, Tsimlyansk reservoir, dam section, cooling tower, blowdown, hydrochemical regime calculation, salt balance, annual volume.