

---

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВОЛГОДОНСКОЙ АЭС НА ВОДОЕМ-ОХЛАДИТЕЛЬ

П.А. Гунин, Н.С. Серпокрылов

Южно-Российский государственный технический университет  
ул. Просвещения, 132, Новочеркасск, Ростовская область, Россия, 346428

Ю.А. Лейкин

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева  
пл. Мусская, 9, Москва, Россия, 125047

Произведен химический анализ и расчет химической нагрузки водоема-охладителя Волгодонской АЭС, определены наиболее агрессивные токсиканты и источники их поступления. Дан прогноз тепловой динамики после введения в эксплуатацию второго энергоблока ВоАЭС. Даны рекомендации по снижению теплового загрязнения и стабилизации экосистемы водоема-охладителя ВоАЭС.

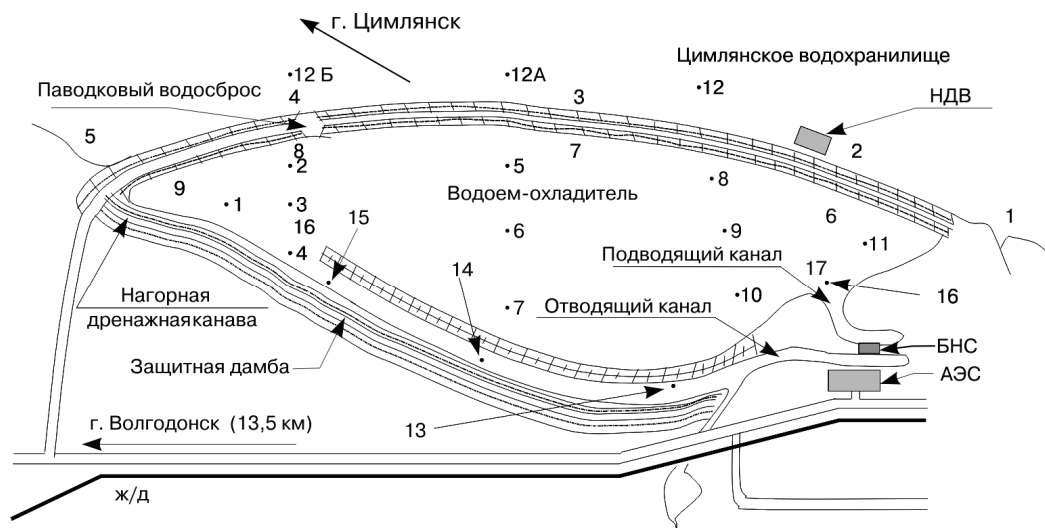
**Ключевые слова:** водоем-охладитель, ВоАЭС, химическая и тепловая нагрузка, токсиканты, агрессивность, экосистема, гидробионты.

При производстве электроэнергии атомными и тепловыми станциями в качестве технологического элемента охлаждения значительных объемов оборотной воды широко используются водоемы-охладители. Поскольку последние чаще всего — зарегулированные водоемы и представляют замкнутые системы, негативное воздействие (тепловое, гидрохимическое) со стороны электрогенерирующей станции рано или поздно проявится в изменении качества воды и экосистемы такого водоема.

Технологические сбросы подогретых вод в водоемах-охладителях (ВО) изменяют продуктивность, трофическую цепь питания, что приводит к ухудшению качества вод и эвтрофизированию водоемов и требует корректировки сложившихся технологий обработки вод. Оценка влияния эксплуатации Волгодонской АЭС (ВоАЭС) на водоем-охладитель основывается на данных гидрохимического анализа и анализа экосистемы.

Водоем-охладитель ВоАЭС (рис. 1) используется для охлаждения технологической воды и является ее источником для бытовых и хозяйственных нужд. С целью определения качества воды и экосистемы водоема-охладителя регулярно проводятся гидрохимические и гидробиологические анализы по определенным точкам, как показано на рис. 1. В ходе анализа данных проводились сравнения показателей в Цимлянское водохранилище (ЦВ), в ВО и отводящем канале, куда сбрасываются сточные воды (СВ) ВоАЭС.

Химический анализ воды в водоеме-охладителе по данным ВоАЭС за 2008 г. (табл. 1—3) показывает повышенное содержание в водоеме-охладителе сульфатов в 4 раза, и меди в 7,4 раз больше ПДК<sub>рыб</sub>. Динамика химического состояния показывает тенденцию к накоплению сульфатов, хлоритов и меди, а также к повышению общей минерализации.



**Рис. 1.** Схема точек отбора проб из Цимлянского водохранилища и водоема-охладителя:

•1 — точки отбора проб гидробионтов; •5 — точки отбора для химанализа и замеры температуры; БНС — блочная насосная станция; НДВ — насосная (станция) добавочной воды

Таблица 1

**Среднеголетнее содержание компонентов солевого состава воды в водоеме-охладителе и Цимлянском водохранилище**

Место отбора проб	Показатели, мг/дм <sup>3</sup>						
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	∑
Цимлянское водохранилище, 300 м от дамбы, левый берег	46,7 ± ± 7,5	24,6 ± ± 5,0	55,9 ± ± 8,2	185 ± ± 23	54,2 ± ± 5,4	92 ± ± 21,6	483 ± ± 59
Цимлянское водохранилище, правый берег	49,0 ± ± 11,4	25,8 ± ± 5,3	55,5 ± ± 7,9	184 ± ± 28	53,6 ± ± 6,3	97,7 ± ± 22,3	494 ± ± 69
Водоем-охладитель, среднее	75,4 ± ± 4,2	75,2 ± ± 4,3	204 ± ± 21	238 ± ± 15	171 ± ± 23	398 ± ± 32	1210 ± ± 55
Превышение в водоеме-охладителе	1,6	3,1	3,6	1,3	3,2	4,3	2,5
ПДКвр	180	40	120	—	300	100	1000

Таблица 2

**Среднеголетнее содержание органических веществ тяжелых металлов и микроэлементов в воде водоема-охладителя и Цимлянского водохранилища**

Место отбора проб	Показатели, мг/дм <sup>3</sup>							
	ХПК	БПК <sub>5</sub>	Нефте-пр-ты	Cu, 10 <sup>-3</sup>	Zn, 10 <sup>-2</sup>	Mn, 10 <sup>-2</sup>	Ni, 10 <sup>-2</sup>	Cd, 10 <sup>-4</sup>
Цимлянское водохранилище, среднее	26,6 ± ± 3,4	2,55 ± ± 0,54	41 ± ± 16	20 ± ± 0,9	2,2	15,8 ± ± 16,6	2,1 ± ± 1,0	0,4 ± ± 0,03
Водоем-охладитель, среднее	29,8 ± ± 4,4	2,10 ± ± 0,62	45 ± ± 18	74 ± ± 2,2	2,94 ± ± 0,85	12,1 ± ± 8,2	4,7 ± ± 1,0	0,8 ± ± 0,08
Превышение в водоеме-охладителе	1,1	0,8	1,1	3,7	1,3	0,8	2,2	2,0
ПДКвр	30	2,0	50	1	1	1	1	5

Таблица 3

**Динамика химического состава воды в водоеме-охладителе**

Год	Показатели, мг/дм <sup>3</sup>					
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Медь	Цинк	Минерализация, ΣU	
					водоем-охладитель	Цимлянское водохранилище, вдоль дамбы
1989					420	400
2003	280	145	2,92	2,45	850	400
2004	310	147	3,69	2,56	900	390
2005	330	150	3,5	2,56	950	410
2006	340	155	3,41	2,28	1 000	430
2007	350	165	5,45	2,94	1 100	450
2008	400	170	7,4	2,40	1 210	460

Уровень экологического воздействия ВоАЭС на экосистему водоема-охладителя можно определить через показатель контроля биосферы (КБ), равного отношению концентрации компонента к его ПДК и индекса загрязнения воды (ИЗВ), равного отношению суммы КБ учитываемых компонентов к их количеству. Показатели качества воды в Цимлянском водохранилище и водоеме-охладителе в 2008 г. приведены в табл. 4.

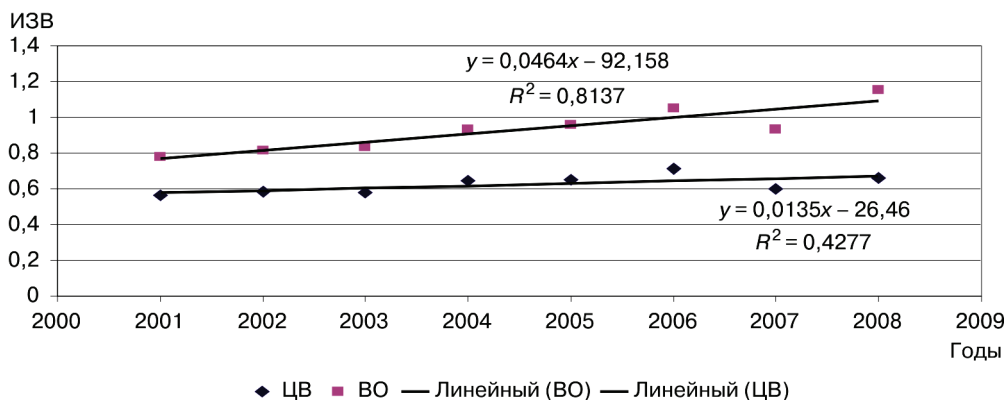
Таблица 4

**Показатели качества воды в Цимлянском водохранилище и водоеме-охладителе в 2008 г.**

(г/дм<sup>3</sup>)

Вещество	Конц ЦВ	Конц ВО	ПДК ВР	КБ ЦВ	КБ ВО
Взвешенные в-ва	5,3	8,5	0,75	7,010	11,330
Cu <sup>2+</sup>	0,0028	0,0072	0,001	2,800	7,200
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	92	398	100	0,920	3,980
Mg <sup>2+</sup>	24,6	75,2	40	0,615	1,880
Na <sup>+</sup>	55,9	204	120	0,466	1,700
У	483	1 210	1000	0,483	1,210
БПК	2,55	2,1	2	1,275	1,050
ХПК	26,6	29,8	30	0,887	0,993
NH <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0,28	0,41	0,5	0,560	0,820
Нефтепродукты	41	45	50	0,820	0,900
Cl <sup>-</sup>	54,2	171	300	0,181	0,570
Ca <sup>2+</sup>	46,7	75,4	180	0,259	0,419
HCO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	34	18	50	0,680	0,360
Zn <sup>2+</sup>	0,0022	0,003	0,01	0,220	0,300
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,006	0,003	0,02	0,300	0,150
NO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0,65	0,71	9,1	0,071	0,078
КБ				17,55	32,94
ИЗВ				1,097	2,059
ИЗВ <sub>доп</sub>					0,88

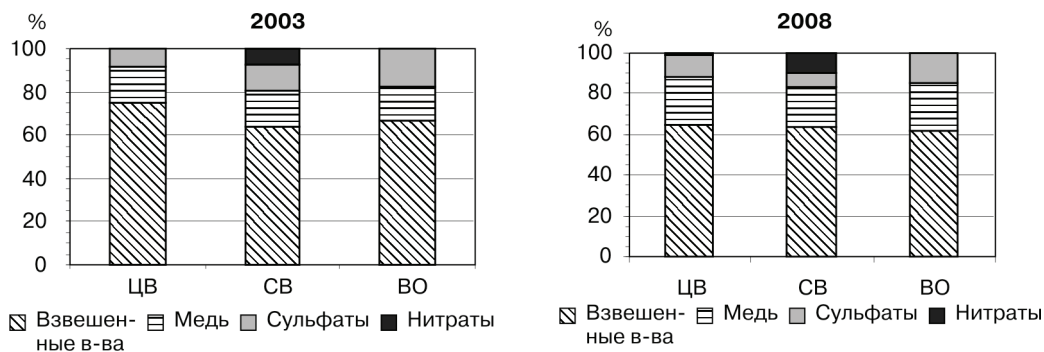
Расчет ИЗВ в водоеме-охладителе и его превышение по сравнению с Цимлянским водохранилищем для 2001—2008 гг. позволил построить графики значений ИЗВ. Сравнение значений ИЗВ показывает, что количество токсиканов в Цимлянском водохранилище колеблется незначительно, а в водоеме-охладителе имеется явная тенденция к увлечению химической нагрузки (рис. 2).



**Рис. 2.** Химическая нагрузка для Цимлянского водохранилища и водоема-охладителя 2001—2008 гг.

Для определения агрессивности токсиканты были разделены на две группы: 1) взвешенные вещества, ХПК, БПК,  $\text{NO}_3^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NPO}_4^{2-}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ; 2)  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\Sigma\text{U}$  — общая минерализация,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ . Для двух групп составлены графики сезонного изменения. Для первой группы характерно резкое возрастание химической нагрузки в весенний и осенние периоды. Химическая нагрузка во второй группе носит постоянный характер, и колебания незначительны.

Наибольшей агрессивностью в химической нагрузке водоема-охладителя обладают взвешенные вещества, медь, сульфаты и нитраты. Для определения динамики изменения агрессивности произведено сравнение показателей в 2003 и 2008 гг., представленные на рис. 3. Из рисунка 3 видно, что в 2008 г. по сравнению с 2003 г. увеличилось содержание меди, нитратов и взвешенных веществ в отводящем канале.



**Рис. 3.** Доля токсикантов в воде ЦВ, ВО и отводящего канала (СВ)

Для определения источников поступления основных токсикантов были проанализированы сезонные данные изменения их концентраций в Цимлянском водохранилище, водоеме-охладителе и СВ. Содержание взвешенных веществ в СВ достигает максимума в апреле—июне — в период, который не связан с паводком (рис. 4). Содержание сульфатов в СВ выше фонового и практически не колеблется (рис. 5), поэтому источник их поступления связан с эксплуатацией ВоАЭС.

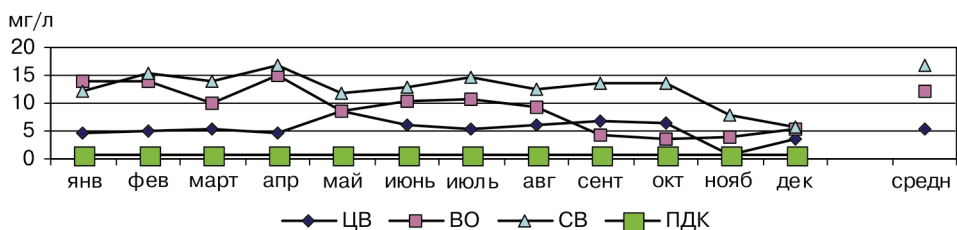


Рис. 4. Содержание взвешенных веществ в водных объектах

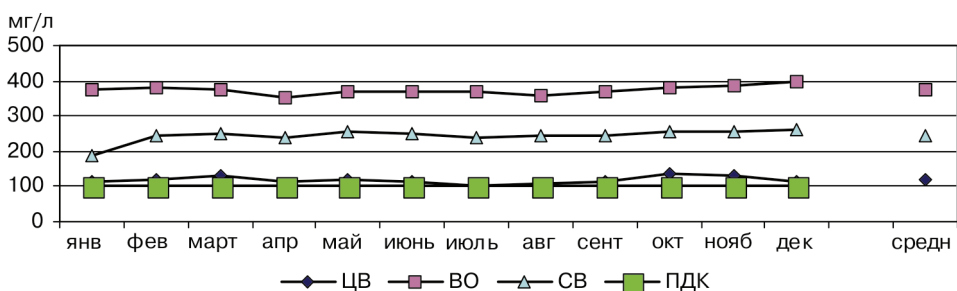


Рис. 5. Содержание сульфатов в водных объектах

Содержание нитратов в отводящем канале подвержено сезонным изменениям, связанными с паводком (весной) и осадками (осенью), поэтому источник их поступления не связан с эксплуатацией ВоАЭС (рис. 6).

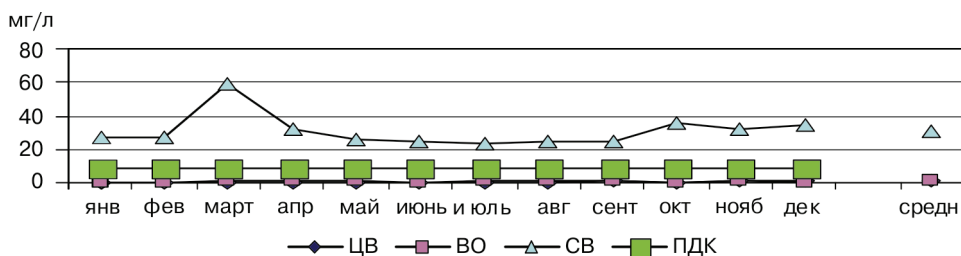


Рис. 6. Содержание нитратов в водных объектах

Поступление меди в водоем-охладитель на протяжении 2001—2008 гг., как показано выше, связано с ее вымыванием из медного конденсатора второго контура, а резкий скачок концентрации меди в водоем-охладителе в 2008 г. (рис. 7) связан с проведением планово-предупредительного ремонта, когда производилась очистка каналов конденсатора.

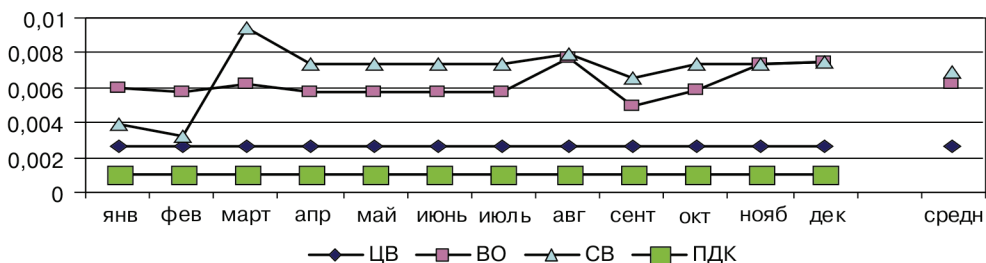


Рис. 7. Концентрация меди в водных объектах в 2008 г.

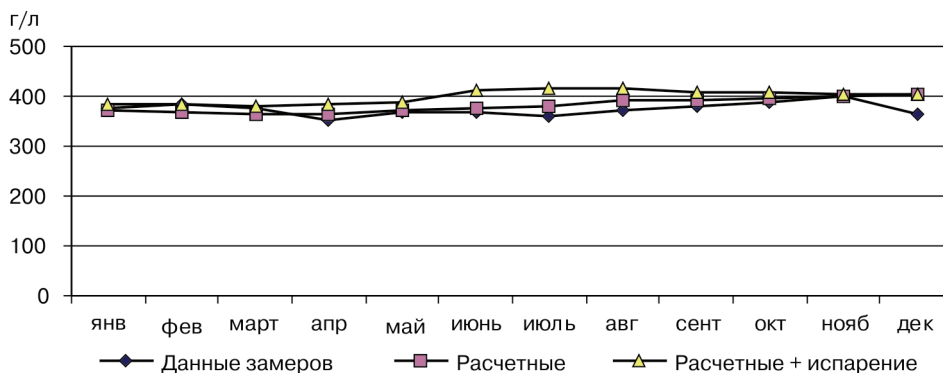
Таким образом, поступление взвешенных веществ в водоеме-охладителе обуславливается неэффективностью очистки ливневой канализации: повышение общей минерализации, содержания сульфатов и хлоридов в водоеме-охладителе происходит за счет стоков химводоочистки ВоАЭС, а поступление меди связано с ее технологическим вымыванием из оборудования ВоАЭС. Поступление нитратов в водоем-охладитель происходит от источников, не связанных с эксплуатацией ВоАЭС. Можно констатировать, что наибольшую часть дополнительных загрязнений в водоем-охладитель вносит эксплуатация ВоАЭС. По значению ИЗВ для Цимлянского водохранилища и водоема-охладителя эти водоемы можно отнести к умеренно загрязненным.

Для определения расчетных значений концентраций токсикантов в водоеме-охладителе было составлено следующее уравнение материального баланса:

$$C_{\text{ВО}}^{i+1} = C_{\text{ВО}}^0 + W_{\text{СВ}} C_{\text{СВ}} + W_{\text{П}} C_{\text{ЦВ}} - W_{\text{Ф}} C_{\text{ВО}}^i,$$

где  $C_{\text{ВО}}^0$ ,  $C_{\text{ВО}}^i$ ,  $C_{\text{ВО}}^{i+1}$ ,  $C_{\text{СВ}}$ ,  $C_{\text{ЦВ}}$  — соответственно начальная, текущая, расчетная концентрация в водоеме-охладителе, концентрации в сточной воде отводящего канала и Цимлянского водохранилища.

На примере содержания сульфатов в водоеме-охладителе построены графики значений концентраций по данным замеров и расчетные с учетом и без учета испарения. Все три графика имеют хорошую сходимость результатов в пределах погрешности в 10% (рис. 8).



**Рис. 8.** Содержание сульфатов в водоеме-охладителе по материальному балансу

Для определения теплоотдачи ВО и изменения ее при различных нагрузках со стороны ВоАЭС при эксплуатации одного и двух энергоблоков были получены уравнения теплового баланса. При этом учитывались следующие источники поступления тепла в водоем-охладитель: а) приход тепла с водами хозяйственной канализации и технологическими водами Волгоградской АЭС —  $Q_1$ ; б) приход тепла с солнечной радиацией  $Q_p$ . Кроме этого необходимо отметить следующий расход тепла из водоема-охладителя: а) подпитка водоема-охладителя из Цимлянского водохранилища —  $Q_{\text{ЦВ}}$ ; б) испарение воды с поверхности водоема-охлади-

теля —  $Q_{и}$ ; в) фильтрация нагретой воды через плотину —  $Q_{ф}$ ; г) теплообмен с дном —  $Q_{г}$ .

В качестве пограничных условий можно принять предельно допустимую по поверхности температуру воды для географической широты  $48^\circ$  в соответствии с РД-52.26-161-88, равную  $29,7^\circ\text{C}$ .

Уравнение теплового баланса водоема-охладителя будет выглядеть следующим образом:

$$Q_{\text{ВО}}(t) = Q_{\text{т}}(t) + Q_{\text{р}}(t) - Q_{\text{цв}}(t) - Q_{\text{с}}(t) - Q_{\text{и}}(t) - Q_{\text{к}}(t) - Q_{\text{ф}}(t) - Q_{\text{гв}}(t) + \zeta(t),$$

где  $Q_{\text{с}}(t)$  — приход тепла с осадками и стоком,  $Q_{\text{и}}(t)$  и  $Q_{\text{к}}(t)$  — соответственно теплообмен с испарением и конвекцией,  $Q_{\text{гв}}(t)$  — теплообмен с грунтом,  $\zeta(t)$  — невязка.

Тепловая динамика рассчитывалась на основе данных водного баланса, метеорологических данных и данных замера температуры воды по месяцам. Тепловое загрязнение рассчитывалось как  $Q_{\text{ВО}}(t)$ . При работе двух блоков увеличивается сброс подогретых вод, за счет этого увеличивается тепловое загрязнение, соответственно средняя температура водоема-охладителя  $t_{\text{ср}}$ . Значения  $t_{\text{ср}}$  получены как прямая пропорция между  $Q_{\text{ВО}}$  для 1-го и 2-го блоков. Прирост  $t_{\text{ср}}$  для двух блоков — это разность между  $t_{\text{ср}}$  для 2-го и для 1-го блоков. Значения ожидаемого прироста температур приведем в табл. 5.

Таблица 5

**Прирост средней температуры водоема-охладителя при работе двух блоков**

Месяц	$Q_{\text{т}}(t)$ 1 блока, ТДж/мес.	$\Delta t$ или $t_{\text{ср}}$ , $^\circ\text{C}$	$Q_{\text{т}}(t)$ 2 блока, ТДж/мес.	$\Delta t$ или $t_{\text{ср}}$ , $^\circ\text{C}$	Прирост температуры, $^\circ\text{C}$
Декабрь	355,5	2,3	711	4,3	2
среднее	329,5	2,5	659	4	1,5
Июль	355,5	26,8	711	28,8	2
лето, 2бл	579,6	27,5	1 159,2	30	3,5

Анализ теплового состояния водоема-охладителя показал значительное тепловое воздействие ВоАЭС. При работе двух блоков тепловое загрязнение увеличивается на 50%. Средняя температура водоема-охладителя увеличивается в среднем в год на  $1,5^\circ\text{C}$ , а при максимальной нагрузке в летние месяцы температура увеличивается на  $3,5^\circ\text{C}$  по сравнению с работой одного блока. Это приведет в летние месяцы к средней температуре воды  $30^\circ\text{C}$ , что выше установленной предельно допустимой по поверхности температуры воды для географической широты  $48^\circ$  в  $29,7^\circ\text{C}$ .

Данные ВоАЭС по тепловому режиму водоема-охладителя за 2008 г. показывают, что уже при работе одного энергоблока средняя температура воды в водоеме-охладителе почти достигает предельно допустимых значений (рис. 9). Следовательно, для 2-го энергоблока возрастает необходимость решения отвода избыточного тепла.

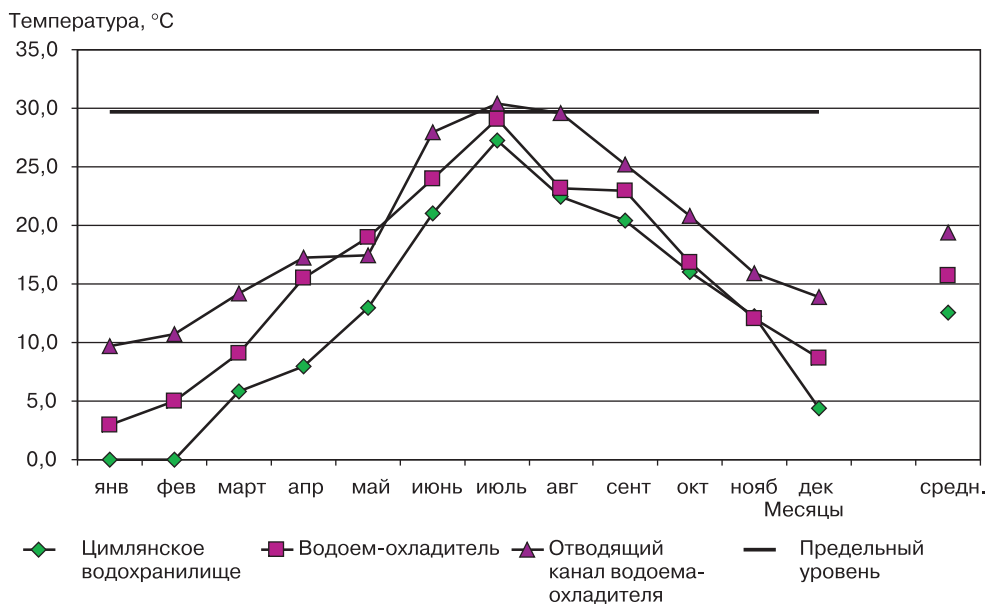


Рис. 9. Температурный режим водных объектов в 2008 г.

Значения термического загрязнения ВоАЭС в долях, показывают, что максимум приходится на холодные месяцы (рис. 10).

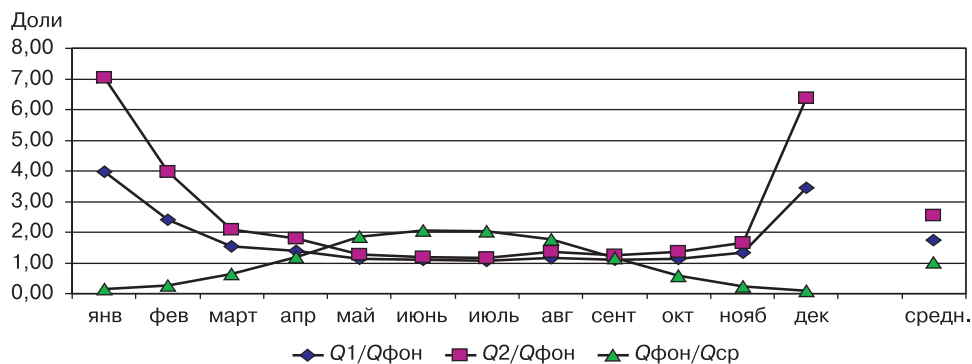


Рис. 10. Температурная нагрузка и минимальные температуры воды

Таким образом, гидрохимический и тепловой анализ показывают хорошую сходимость результатов с экспериментальными замерами искомым значений и показывают значимое воздействие ВоАЭС на ВО.

Как показывают данные гидробиологического анализа (табл. 6), имеется разбалансированность трофических связей, высокая продуктивность анаэробов экосистемы водоема-охладителя по сравнению со сложившимся сообществом в Цимлянском водохранилище, что требует разработки технологических решений по обеспечению устойчивости экосистемы водоема-охладителя в условиях постоянного поступления в него подогретой воды. В таблице 6 показано значение варьирования биомассы как отношение содержание гидробионтов водоема-охладителя к фоновому значению (Цимлянское водохранилище). Индекс изменения экосистемы определялся как отношение биомасс показательных трофических уровней: биомассы рыбы травоядной к биомассе фитопланктона.

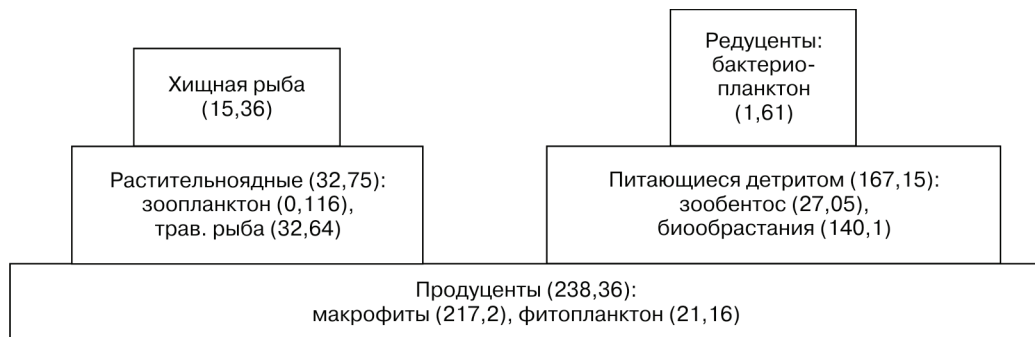


Таблица 6

**Содержание гидробионтов в водоеме-охладителе и Цимлянском водохранилище**

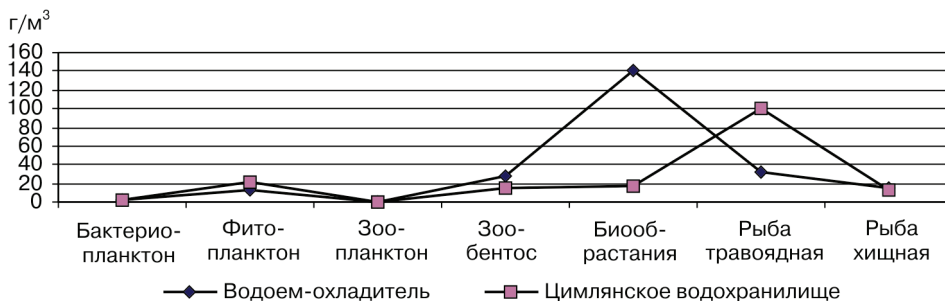
Группа гидробионтов	Водоем-охладитель	Цимлянское водохранилище	Размах варьирования
Бактериопланктон	1,61	1,24	0,3
Фитопланктон	13,5	21,16	-0,4
Зоопланктон	0,116	0,034	2,4
Зообентос	27,05	15	0,8
Биообрастания	140,1	16,8	7,3
Макрофиты	732,8	952,6	-0,2
Рыба травоядная	32,26	100	-0,7
Рыба хищная	15,74	12	0,3
ИТОГО	963,18	1 058,83	-0,1
Индекс изменения	0,42	0,21	

Выстраивание трофической цепи показывает избыток хищной рыбы и особенно зообентоса и биообрастаний, что приводит к необходимости стабилизации экосистемы (рис. 11). В связи с пуском ВоАЭС видовой состав высшей водной растительности изменился незначительно. Площадь зарастания водоема-охладителя составила в 2002 г. 11,36 км<sup>2</sup> (70,6%), т.е. уменьшилась по отношению к 1999 г. в 1,3 раза. Индекс сапробности позволяет отнести исследуемую водную систему к β-мезосапробному составу и умеренно загрязненным водоемам.



**Рис. 11.** Пирамида биомасс. Содержание групп в г/м<sup>3</sup>

Более наглядно превышение отдельных групп гидробионтов в водоеме-охладителе по сравнению с Цимлянским водохранилищем представлено на рис. 12.



**Рис. 12.** Сравнение биомасс гидробионтов

Таким образом, можно констатировать, что для мелководного водоема в степной климатической зоне в условиях техногенного подогрева воды, развитие организмов и зарастание растительностью, является нормой. При работе двух блоков с увеличением подогрева воды экосистема становится нестабильной, могут исчезнуть отдельные виды, что приведет к разбалансировке движения вещества и энергии в экосистеме. В конечном итоге это может привести к вырождению экосистемы.

Одной из ключевых проблем, выявленных в ходе анализа водоема-охладителя, является его термическое загрязнение. По нашему мнению, оптимальным вариантом снижения тепловой нагрузки является строительство и введение в эксплуатацию градирни. На ВоАЭС предполагается введение в эксплуатацию 3-го и 4-го энергоблоков, проектом строительства которых предусмотрена эксплуатация градирен. На каждый новый энергоблок предполагается строительство градирни с естественной тягой, площадью орошения 10 000 м<sup>2</sup>, расходом воды 122,5 тыс. т/ч, высотой 150 м. Две подобные градирни установлены на Калининской АЭС (Тверская область).

Рекомендации по снижению химического воздействия, а именно предварительной обработки стока химического цеха заключаются в применении мембранной фильтрации — достаточно дешевой и эффективной технологии. Кроме того, необходимо усовершенствование очистки ливневой канализации, а для исключения поступления меди в водоем-охладитель необходима замена медного конденсатора на титановый, как это сделано для строящегося 2-го блока ВоАЭС.

Рекомендации по необходимости выстраивания трофической сети путем искусственного внесения хищных и детритоядных рыб для предотвращения эвтрофикации водоема-охладителя: белый толстолобик — 20 т, белый амур — 20 т, пиленгас — 52 т. Также необходимо вселение штамма ИФР № С-111 *Chlorella vulgaris* — биоингибитора развития сине-зеленых водорослей, зарекомендовавший себя в Волгоградском и Цимлянском водохранилищах.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Оценка воздействия на окружающую среду. Энергоблоки 1—4. Т. I—X: Атомэнергопроект (Арх. № А-94338 пм). — Н. Новгород, 2008.
- [2] Гидрохимические показатели состояния окружающей среды: справочные материалы / Под ред. Т.В. Гусевой. — М.: Социально-экологический Союз, 2000.
- [3] Отчет по теме «Выполнение работ по проведению анализа состояния экосистемы водоема-охладителя Волгоградской АЭС (мониторинг водоема-охладителя Волгоградской АЭС: гидрохимический, гидробиологический, ихтиологический) с выдачей рекомендаций по биомелиорации на 2007 год. — Ростов н/Д, 2006.
- [4] Ростовская АЭС. Проект. Оценка воздействия на окружающую среду (Доработанный по замечаниям и предложениям Госэкспертизы Минприроды РФ): Т. III: Атомэнергопроект (Арх. № А-65288). — Н. Новгород, 1999.

## **THE ANALYSIS OF INFLUENCE VOLGODONSK NPP ON A RESERVOIR-COOLER**

**P.A. Gunin, N.S. Serpokrylov**

The Southern-Russian state technical university  
*Prosvechenia str., 132, Novocherkask, Rostovskay obl., Russia, 346428*

**J.A. Leykin**

D. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia  
*pl. Miusskay, 9, Moscow, Russia, 125047*

The chemical analysis, the analysis ecosystem is made and calculation reservoir-cooler chemical loading of the Volgodonsk atomic power station, the most aggressive toxic agent are determined and sources of their receipt. The forecast of thermal dynamics after introduction in operation of second power unit VoNPP is given. Recommendations on decrease of thermal pollution and stabilization ecosystem reservoir-cooler VoNPP are given.

**Key words:** Reservoir-cooler, VoNPP, chemical and thermal loading, toxic agent, aggression, ecosystem, hydro organisms.