

Для безопасной эксплуатации действующих и строящихся АЭС и разработки проектов новых типов ЯЭУ работа в области водно-химических режимов и химической технологии теплоносителей в ближайшие годы должна идти по следующим основным направлениям:

оптимизация водно-химических режимов АЭС с РБМК и ВВЭР для уменьшения отложений продуктов коррозии и радионуклидов в контурах, уменьшения количества дренируемого из первого контура теплоносителя и создания полностью замкнутых систем (включая оборот борсодержащих вод), уменьшения количества радиоактивных отходов и улучшения радиационной обстановки;

промышленная отработка режимов пассивации и консервации контурного оборудования из перлитных сталей, включающая «кислородный» водно-химический режим, для более широкого использования в контурах перлитных сталей;

освоение промышленного производства мелкодисперсных ионитов ядерного класса (для намывных фильтров) и высокотемпературных сорбентов; усовершенствование водоподготовительного оборудования;

разработка фильтров смешанного действия с «расщепленным» слоем и намывных фильтров большой производительности;

разработка промышленных образцов высокотемпературных фильтров как электромагнитных, так

и с термостойким сорбентом, в том числе разработками систем расколаживания фильтров, их взрыхления и перегрузки, а также регенерации.

Успешная реализация этих предложений сможет повысить надежность и безопасность эксплуатации АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петросьянц А. М. Атомная энергетика. М., «Наука», 1976.
2. Брусаков В. П. и др. Некоторые закономерности поведения продуктов коррозии в контурах АЭС с кипящими канальными реакторами. Докл. на советско-английском семинаре. Уинфрит, декабрь 1977.
3. Рыбальченко П. Л. и др. Опыт поддержания водно-химического режима и эксплуатации систем очистки теплоносителя Ленинградской АЭС. — Там же.
4. Еперин А. П. Опыт эксплуатации Ленинградской АЭС с реакторами РБМК-1000. Докл. на советско-английском семинаре. Уинфрит, октябрь 1976.
5. Ананьев Е. П. Атомные установки в энергетике. Под ред. чл.-кор. АН СССР Г. Н. Кружилина. М., Атомиздат, 1978, с. 94.
6. Алексеев Б. А. Водные режимы и водоочистка на энергетических реакторах с водой под давлением. — В кн.: Докл. III симп. СЭВ «Водный режим, водоподготовка и проблемы КГО твэлов на АЭС». Т. 1. Нойбранденбург, 1976.
7. Ермаков В. А. и др. Исследование водного режима реакторов ВВЭР-1000 и коррозионной стойкости материалов в петле реактора МР. — Там же.

Поступила в Редакцию 04.06.79

УДК 621.039.5.53:621.039.534.44

Химико-технологические режимы сопутствующих реактору систем АЭС с РБМК-1000

СЕДОВ В. М., КРУТИКОВ П. Г., ВОЛОГДИНА Г. П.,
ЛОШКОВА Л. И., ЕПЕРИН А. П., РОГОВ К. Д., ШАВЛОВА Т. С.

Водно-химический режим в системах АЭС определяет надежность и эффективность работы как этих систем, так и всей станции. Основные факторы водно-химического режима — свойства водной среды и физико-химические характеристики внутренней металлической поверхности [1,2].

Целью настоящей работы явилось изучение водных сред сопутствующих реактору систем (система охлаждения СУЗ, система охлаждения бассейнов выдержки — БВ, система охлаждения биологической защиты, промежуточные контуры доохлаждателей продувки) на действующей АЭС с РБМК-1000. Анализы проводили ежемесячно с апреля 1977 г. по март 1978 г. по общепринятым методикам [3—5], пробы отбирали из штатных устройств.

В качестве характеристик рабочей среды были использованы следующие химические показатели, определяющие коррозионную активность водных

растворов по отношению к конструкционным материалам систем: концентрации ионов водорода (рН), хлора и фтора, содержание солей кальция и магния (H_0), различных соединений железа, перекиси водорода, аммиака, нитрит- и нитрат-ионов, ионов кремневой кислоты, двуокиси углерода и кислорода [1, 2, 6]. Число исследуемых показателей рабочей среды варьировалось в зависимости от специфики изучаемых систем — конструкционных материалов (табл. 1), условий работы, радиационных полей.

Все системы заполняются и подпитываются оборотной водой от сети повторного использования очищенных стоков. Показатели качества оборотной воды следующие: рН = $6,5 \div 8,5$; $\kappa = 1,0$ мксм/см; $\text{H}_0 = 3$ мкг·экв/кг; $\text{Cl}^- = 30$ мкг/кг. Эксплуатационные нормы качества воды, разработанные и используемые на Ленинградской АЭС для рассматриваемых систем, приведены в табл. 2.

Таблица 1

Конструкционные материалы сопутствующих реактору систем

Материал	Охлаждение СУЗ	Охлаждение бассейнов выдержки	Охлаждение биологической защиты	Промежуточный контур доохладителей продувки
X18H10T	Все трубопроводы и поверхности баков. Верх и низ каналов СУЗ Трубные доски и трубный пучок теплообменников Средняя часть каналов СУЗ на высоту активной зоны	Поверхность бассейнов		Трубные доски, камеры продувочной воды и трубный пучок доохладителей
Сплав 125				
Сплав САВ-1	Оболочки стержней поглотителей и вытеснителей	Теплообменники и арматура бассейнов	Трубные доски и корпус теплообменников	
ВМ сталь 3сп				
Сталь 3	Днище теплообменников	Трубные доски теплообменников		
Сталь 20к				
МНЖ-5-1		Трубный пучок теплообменников	Трубный пучок теплообменников	Корпус доохладителей, камеры охлаждающей воды, крышки, трубопроводы промежуточного контура и теплообменники морской воды
10ХСНД				
			Металлоконструкции бака биологической защиты и трубопроводы	

Обобщенные результаты химического контроля указанных систем в течение наблюдаемого периода представлены в табл. 3—6, ежемесячные данные приведены на рис. 1—3.

Согласно данным анализа систем охлаждения СУЗ (см. табл. 3), показатели качества воды изме-

нялись в пределах нормы. Содержание железа в воде перед байпасной очисткой колебалось в пределах 1—30 (блок I) и 1—20 мкг/кг (блок II). Степень очистки воды на ионообменных фильтрах по Fe, SiO₃²⁻, Al незначительна (от 1,1 до 2,2), несколько выше степень очистки по NO₃⁻ (от 4,2 до 7,5). При отключении насосов в системе охлаждения СУЗ наблюдалось резкое возрастание содержания хлорид-ионов (до 500 мкг/кг), увеличение электропроводности до 4,4 мкСм/см и жесткости до 10 мкг·эquiv/кг. Подобные изменения в составе охлаждающей воды можно объяснить поступлением морской воды из теплообменников в тот момент, когда при отключении насосов падает давление в системе охлаждения СУЗ.

При достижении удельной радиоактивности воды в системе охлаждения СУЗ 10 мкКи/кг ионообменные смолы заменялись. Такая смена была проведена три раза по блоку I и два раза по блоку II. После каждой замены в течение 1—2 сут наблюдались повышенная электропроводность воды контура охлаждения СУЗ до 3,6 и 4,6 мкСм/см и рост содержания хлоридов до 8 и 26 мкг/кг для блоков I и II соответственно. Постепенно эти показатели снижались до среднего значения ($\bar{x} = 0,9 \div \div 1,0$ мкСм/см и $Cl^- = 1 \div 2$ мкг/кг). При экспериментальном отключении байпасной очистки системы охлаждения СУЗ-1 в течение 17 сут повы-

Таблица 2
Качество воды по системам

Показатель	Охлаждение СУЗ		Охлаждение бассейнов выдержки	Охлаждение биологической защиты	Промежуточный контур доохладителей продувки
	до очистки	после очистки			
pH	5,5—6,5		6,5—8,5	7,0—8,5	7,0—9,0
\bar{x} , мкСм/см	*		—	—	—
Cl ⁻ , мкг/кг	< 50	< 10	< 1000	< 300	< 300
Fe, мкг/кг	< 100	*	—	*	*
Al, мкг/кг	< 100	*	—	—	—
Ж _о , мкг·эquiv/кг	—	—	—	—	*
Коэффициент очистки от радионуклидов	—	< 10	—	—	—
Прозрачность, см	—	—	< 20	—	—

* Показатели контролируемые, но ненормируемые.

Таблица 3

Характеристика воды системы охлаждения СУЗ

Место пробоотбора	ж, мкСм/см	pH	ЖО, мкг·экв/кг	Cl ⁻ , мкг/кг	Fe, мкг/кг	Al, мкг/кг	SiO ₃ ⁻² , мкг/кг	F ⁻ , мкг/кг	H ₂ O ₂ , мкг/кг	NH ₃ , мкг/кг	O ₂ , мг/кг	CO ₂ , мг/кг	NO ₂ ⁻ , мкг/кг	NO ₃ ⁻ , мкг/кг
До байпасной очистки														
блок I	0,7-1,8* 1,0	5,4-6,6 6,0	1,0-2,5 1,0	1,0-6,0 1,3	1,0-30 8	10-23 14	25-540 220	< 20	4100-8840 5520	< 100	6,5-8,3 7,3	-	< 10	130-790 420
блок II	0,7-1,5 0,9	5,5-6,6 5,85	1-2,5 1,3	1,0-12 1,8	1-20 7	10-25 12	60-320 160	< 20	4100-7400 5140	< 100	7,4-9,3 7,9	-	< 10	80-640 300
После байпасной очистки:														
блок I	-	5,4-6,5 5,9	1-2,7 1,3	1-35 2,6	1-22 5	10-16 10	25-330 100	< 20	530-6080 2600	< 100	4,3-13,2 7,6	1,2-2,2 1,8	< 10	70-130 100
блок II	-	6,4-6,5 6,1	1-3,0 1,3	1-35 2,6	1-23 6	10-21 11	25-180 110	< 20	2560-6500 4780	< 100	8,5-12,1 9,7	1,65-2,9 2,0	< 10	10-60 40

* Здесь и в табл. 4 - 6 числитель - минимальное и максимальное значения, знаменатель - среднее значение. В этой таблице средние результаты рассчитывались как среднеарифметическое по всем проведенным анализам.

Таблица 4

Характеристика воды бассейнов выдержки кассет

Место пробоотбора	pH	ЖО, мкг·экв/кг	Cl ⁻ , мкг/кг	Fe, мкг/кг	F ⁻ , мкг/кг	H ₂ O ₂ , мкг/кг	NH ₃ , мкг/кг	NO ₂ ⁻ , мкг/кг	NO ₃ ⁻ , мкг/кг
БВ-1	6,15-7,5 7,06	140-990 590	150-2580 1140	120-800 560	170-340 230	5-330 130	100-200 130	-	-
БВ-2	5,7-7,2 6,6	10-180 60	40-890 300	190-1200 590	20-190 80	760-4800 2970	100-520 200	-	-
БВ-3 *	6,0-8,1 7,0	35-160 85	40-710 230	470-2400 1140	70-340 210	960-4000 2100	100-480 290	60 (2)	37-250 160 (3)
БВ-4 (с января 1978 г.)	6,2-6,9 6,5	43-54 48 (2)	40-280 200	190-700 390	20-410 190 (3)	1760-2000 1880 (2)	200-330 250 (3)	21-72 54 (3)	290-300 230 (3)

* При небольшом числе анализов в знаменателе (в скобках) указано число определений по данному показателю.

Таблица 5

Характеристика воды системы охлаждения биологической защиты

Место пробоотбора	pH	ЖО, мкг·экв/кг	Cl ⁻ , мкг/кг	Fe, мкг/кг	F ⁻ , мкг/кг	H ₂ O ₂ , мкг/кг	NH ₃ , мкг/кг	O ₂ , мг/кг	CO ₂ , мг/кг	NO ₂ ⁻ , мкг/кг	NO ₃ ⁻ , мкг/кг
Блок I	7,5-9,3 8,6	140-430 335	42-410 240	195-1000 460	60-530 325	5-320 70	100-240 170	0,0025-0,600 0,130	0,1	10-12 11	26-130 60
Блок II	7,05-9,3 8,8	60-320 110	70-400 230	385-2040 1000	70-750 520	30-240 130	-	0,0025-0,040 0,010	1,1-2,4 1,5	10-32 17	45-260 130

шались электропроводность (от 1,0 до 1,8 мкСм/см) и pH (от 6,1 до 6,5). Остальные контролируемые показатели находились в следующих пределах: Fe = 2 ÷ 4; Al = 10 ÷ 12,5; H₂O₂ = 4100 ÷ 4600 мкг/кг.

Для определения совокупности влияния наиболее агрессивных (по отношению к стали X18H10T) ионов проводилась корреляционная обработка [7] данных по качеству воды в системах охлаждения СУЗ и биологической защиты. В первом прибли-

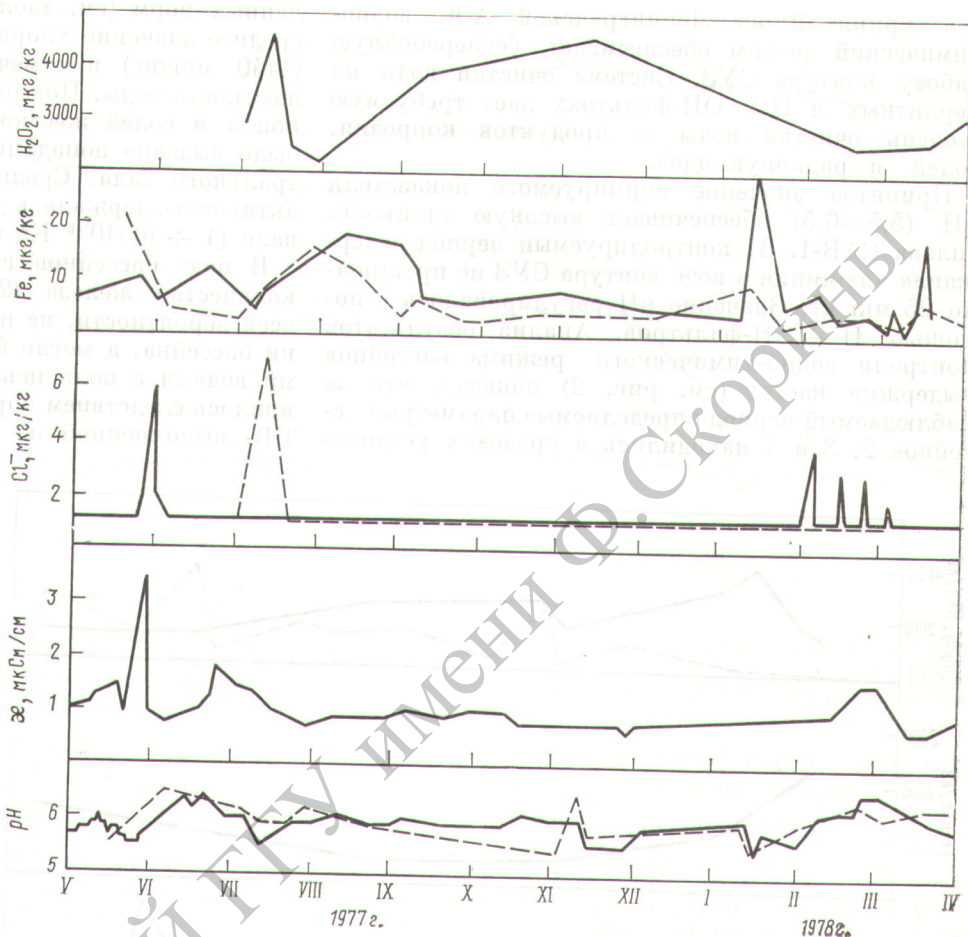
жени предполагалось, что существует прямолинейная зависимость между коррелируемыми параметрами. В качестве переменных значений были взяты: рН (X_1), концентрация хлорид-ионов (X_2 , мкг/кг) и концентрация перекиси водорода (X_3 , мкг/кг); в качестве функции — концентрация железа в водной среде (Y , мкг/кг).

По системе охлаждения СУЗ-1 корреляционная обработка проводилась по результатам восьми одновременных определений рН, Cl^- , H_2O_2 , Fe. При обработке результатов получено уравнение регрессии $Y = 93,6 - 14,3X_1 + 0,30X_2$, с учетом которого можно сделать следующие выводы:

при нормируемых значениях рН (5,5—6,5) и концентрации хлорид-ионов до 50 мкг/кг концентрация железа в воде будет в пределах 15—29 мкг/кг, т. е. меньше нормы (100 мкг/кг); при нормируемых значениях рН недопустимо повышение концентрации хлорид-ионов в системе СУЗ более 280 мкг/кг, в противном случае содержание железа в воде будет больше нормы;

зависимости между концентрациями перекиси водорода и железа в воде выявить не удалось, что, по нашему мнению, говорит о незначительном взаимодействии H_2O_2 с аустенитными сталями.

Содержание H_2O_2 , являющейся продуктом радиолиза, в системе охлаждения СУЗ до байпасной очистки составляло 4100—8840 мкг/кг. Эти данные свидетельствуют о благоприятных условиях для накопления H_2O_2 в системе СУЗ (действие



Р и с. 1. Изменение качества теплоносителя до (—) и после (---) очистки в системе охлаждения каналов СУЗ в эксплуатационном режиме (блок I):

ионизирующего излучения, сравнительно низкая температура и малая величина термоллиза H_2O_2). Корреляционная обработка результатов химического контроля по системам охлаждения СУЗ-2 и биологической защиты не удалась из-за недостаточного числа данных. Среднегодовые значения удельной радиоактивности для блоков близки и составляют до системы очистки $(1,7 \div 1,9) \cdot 10^{-5}$ и после системы очистки $(2,1 \div 3,0) \cdot 10^{-6}$ Ки/кг. Обобщая результаты химического контроля в системе охлаждения СУЗ, можно сделать выводы,

Таблица 6

Характеристика воды промежуточных контуров доохладителей продувки

Место пробоотбора	рН	$Ж_0$, мкг·экв/кг	Cl^- , мкг/кг	Fe, мкг/кг	SiO_3^{2-} , мкг/кг	CO_2 , мг/кг	O_2 , мг/кг
Блок I	5,8—8,3	1—50	1—80	100—4100	25—210	1,4—3,7	0,0025—0,0050
	6,8	17	29	1150	110	2,65	0,003
Блок II	6,2—9,1	1—38	1—180	8—3800	25—260	0,75—1,8	0,0025—0,0050
	7,2	10	27	1170	140	1,2	0,004

что принятый на Ленинградской АЭС водно-химический режим обеспечивает бесперебойную работу контура СУЗ. Система очистки воды на перлитных и Н — ОН-фильтрах дает требуемую степень очистки воды от продуктов коррозии, солей и радионуклидов.

Принятое значение нормируемого показателя рН (5,5—6,5) обеспечивает высокую стойкость сплава САВ-1. За контролируемый период содержание алюминия в воде контура СУЗ не превышало 25 мкг/кг. Значение рН регулировалось с помощью Н — ОН-фильтров. Анализ результатов контроля водно-химического режима бассейнов выдержки кассет (см. рис. 2) показал, что за наблюдаемый период определяемые параметры бассейнов 2, 3 и 4 находились в пределах установ-

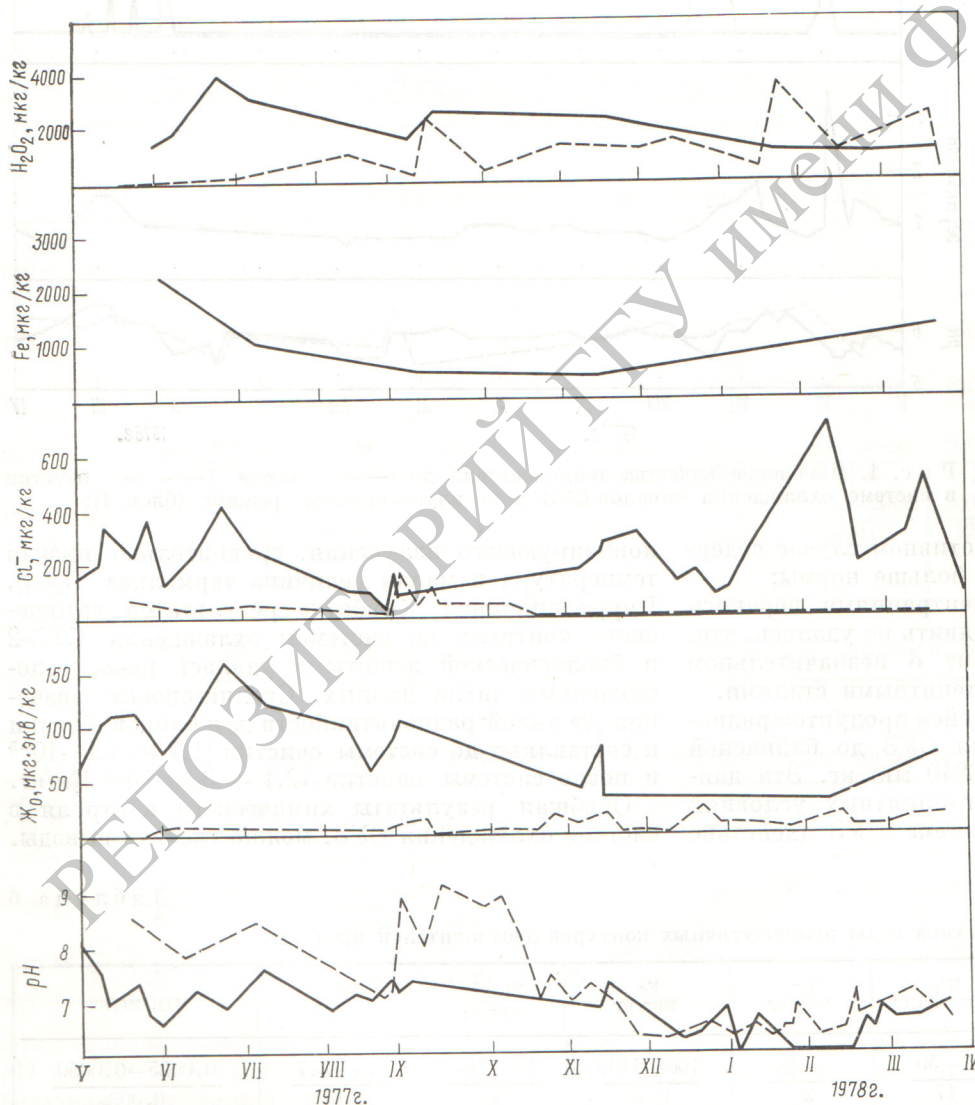
ленных норм (см. табл. 4). В бассейне 1 (БВ-1) среднее значение хлорид-ионов было выше нормы (1140 мкг/кг) и отмечена значительно большая жесткость воды. Повышенное содержание хлорид-ионов и солей жесткости в БВ-1, по-видимому, было вызвано попаданием различных вод из центрального зала. Среднегодовая удельная радиоактивность держалась для всех бассейнов в интервале $(1 \div 6) \cdot 10^{-6}$ Ки/кг.

В воде бассейнов выдержки имеется большое количество железа (2400 мкг/кг), которое, по всей вероятности, не продукт коррозии облицовки бассейна, а могло быть принесено обмывочными водами с пола центрального зала и частично явилось следствием коррозии системы охлаждения БВ, выполненной из перлитной стали. Так как БВ служит не только для временного хранения кассет, но и для перегрузки рабочих кассет, повышение содержания хлорид-ионов в воде БВ является нежелательным, поскольку может привести к коррозионному растрескиванию чехлов кассет, выполненных из стали Х18Н10Т. В системе охлаждения БВ необходимо предусмотреть очистку воды от продуктов коррозии, солей и радионуклидов.

Анализ данных водно-химического режима системы биологической защиты (рис. 3) показал:

рН, в основном, составляет 8,8—8,9, но со временем заметна тенденция к повышению до 9,2—9,3 (см. табл. 5);

среднее значение хлорид-ионов было в пределах нормы. Но отмечены разовые подъемы содержания хлорид-ионов в водной среде до 410 и 2660 мкг/кг. Содержание хлорид-ионов и рН регулировалось путем частичного опорожнения системы охлаждения биологической защиты и подпитки оборотной водой; при этом уровень рН, как правило, не снижался менее чем до 8,5. В течение месяца рН вновь поднимался до 9—9,2. Среднегодовая удельная радиоактив-



Р и с. 2. Изменение качества теплоносителя в бассейне выдержки кассет (—) и в промежуточном контуре доохладителей продувки (---) в эксплуатационном режиме (блок II).

ность воды равна $2,9 \cdot 10^{-7}$ и $6,1 \cdot 10^{-7}$ Ки/кг для блоков I и II соответственно. Система охлаждения биологической защиты находится в эксплуатации с 1973 г. (блок I) и с 1975 г. (блок II). За весь период работы опорожнение отсеков биологической защиты не проводилось. Содержание продуктов коррозии в системе охлаждения биологической защиты достигало 2000 мкг/кг.

Анализ данных контроля водно-химического режима промежуточного контура доохладителей продувки (см. табл. 6 и рис. 2) показал:

pH в контуре был несколько ниже нормы: по блоку I $pH = 5,8 \div 8,3$ (среднее 6,8), по II блоку $pH = 6,2 \div 9,1$ (среднее 7,2);

вода промежуточного контура содержит большое количество продуктов коррозии (до 4100 мкг/кг);

среднегодовая удельная радиоактивность равна $1,6 \cdot 10^{-7}$ и $1,4 \cdot 10^{-7}$ Ки/кг для блоков I и II соответственно.

Исследования водно-химических режимов сопутствующих РБМК систем показали, что необходимо дальнейшее усовершенствование выполненных из низколегированных сталей системы охлаждения биологической защиты и системы промежуточных контуров доохладителей продувки. Для более детальных выводов следует исследовать рабочие металлические поверхности этих систем, что и выполняется в настоящее время.

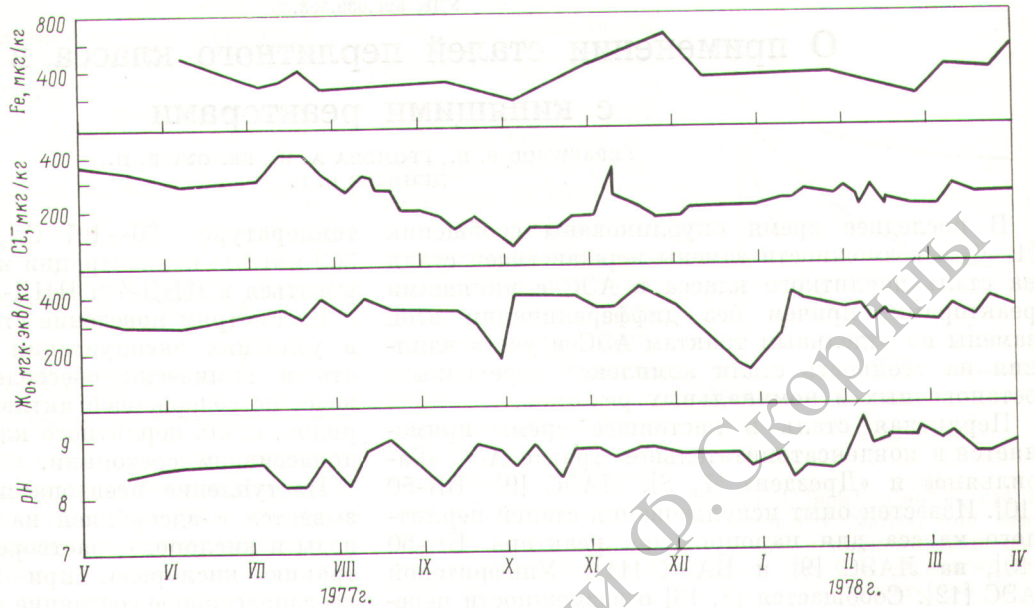


Рис. 3. Свойства воды системы охлаждения биологической защиты блока I: 26—27.VI и 22.VI.77 — перегрузка ионообменной смолы; 9.X.77 — шок и намыв перлитных фильтров; 1—6.II.78 — планово-предупредительный ремонт; 14.II — 3.III.78 — отключена байпасная очистка (23—24.II.78 — перегрузка ионообменной смолы)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Манькина Н. Н. Физико-химические процессы в пароводяном цикле электростанций. М., «Энергия», 1977.
2. Мартынова О. И., Герасимов В. В., Касперович А. И. Водный режим атомных электростанций. М., Атомиздат, 1976.
3. Маргулова Т. Х. и др. «Теплоэнергетика», 1977, № 4.
4. Лурье Ю. Ю., Рыбникова А. И. Химический анализ производственных сточных вод. М., «Химия», 1974.
5. Лурье Ю. Ю. Унифицированные методы анализа вод. М., «Химия», 1973.
6. Громова А. И. и др. Коррозионная стойкость реакторных материалов. М., Атомиздат, 1976.
7. Батунер Л. М., Позин М. Е. Математические методы в химической технике. Л., «Химия», 1960.

Поступила в Редакцию 12.03.79