

УДК 621.187.11

## Совершенствование технологии обработки воды с высоким содержанием железо-органических примесей для энергоблока ОАО «Ивановские ПГУ»

Ларин Б.М. д-р техн. наук, Коротков А.Н., Опарин М.Ю., Ларин А.Б. кандидаты техн. наук

Дан анализ схемы водоподготовки в ОАО «Ивановские ПГУ» для природной воды с высоким содержанием железо-органических соединений. Приведены результаты лабораторных опытов по повышению эффективности предварительной очистки природной воды различными коагулянтами и показано преимущество сернокислого алюминия с флокулянтом AN 923 VH 14. Предложена и обоснована новая схема деминерализации осветленной воды.

Ключевые слова: обработка воды, железо-органические примеси, коагуляция, фильтрация, тепловые электростанции.

### The improvement of water treatment IV PGU for natural waters with high contents of iron-organic substances

Results of laboratory experiments by cleaning natural water with high contents of iron-organic substances are given. New scheme of water treatment is offered.

Keyword: water treatment, iron-organic substances, coagulation, filtration, thermal power plants.

В настоящее время для выработки электроэнергии и получения тепла все более широкое применение находят тепловые электростанции (ТЭС) с комбинированными циклами на базе парогазовых установок (ПГУ). На таких ТЭС производство электроэнергии осуществляется при использовании газовых и паровых турбин.

Для энергоблоков с ПГУ в России выпускаются котельные установки различных типов, однако нормы качества воды для них не разработаны. Поэтому далее приведены зарубежные нормы качества воды и пара (табл. 1), разработанные EPRI и фирмой General Electric (GE) для КУ с ПГУ [1].

Для подпитки котла-утилизатора (КУ) должна использоваться добавочная вода высокого качества. Это относится к контурам КУ как высокого, так и низкого давления. Это связано с тем, что в обоих контурах циркулирует один и тот же теплоноситель (рис. 1) и в турбину поступает пар как от контура низкого, так и от контура высокого давлений. Смешиваясь в проточной части паровой турбины, общий поток пара поступает в конденсатор. Поэтому схема подготовки добавочной воды должна быть единой для всех контуров КУ на данной ТЭС и ориентирована на подготовку добавочной воды для контура высокого давления.

Если исходная вода содержит органические примеси в высоких концентрациях, то часто в схеме подготовки добавочной воды используются органопоглотители, например активированный уголь, и применяются мембранные методы обработки воды.

Таблица 1. Требования к качеству добавочной воды для двухконтурных КУ (контур КУ низкого давления – барабанного типа; высокого давления – прямоточного типа) на ТЭС с ПГУ

Характеристики теплоносителя	Показатели нормальной эксплуатации	Рекомендованные показатели
Удельная электропроводность добавочной воды, мкСм/см: *после БЗК	< 0,1 < 1	0,1-0,2 ≥ 1
$C_{SiO_2}$ , мкг/дм <sup>3</sup>	<10	10-20
$C_{Na^+ + K^+}$ , мкг/дм <sup>3</sup>	<10	–
$C_{Fe}$ , мкг/дм <sup>3</sup>	<20	–
Общий органический углерод, мкг/дм <sup>3</sup>	<300	–
$C_{O_2}$	Насыщенный при данной температуре	–

\*включает  $CO_2$

Проектные организации России, выполняющие проекты энергоблоков с ПГУ, часто ориентируются на зарубежные нормы качества добавочной воды (табл. 1). Обеспечить столь высокое качество добавочной воды можно обработкой исходной (осветленной) воды по схеме трехступенчатого химического обессоливания или альтернативной схеме глубокой деминерализации воды.

Принципиальная тепловая схема энергоблока № 1 ОАО «Ивановские ПГУ» почти не отличается от схемы для зарубежных ПГУ (рис. 1). Проектная схема глубокого обессоливания добавочной воды приведена на рис. 2 и включает следующие стадии обработки:

- предочистка сырой воды в осветлителях и механических фильтрах;

- одноступенчатое умягчение осветленной воды на Na-катионитных фильтрах;
- удаление железоорганических примесей из умягченной воды на фильтрах-органопоглотителях (ФОП), загруженных анионом;
- обессоливание умягченной воды на установке обратного осмоса (УОО) с предварительной фильтрацией на фильтрах тонкой очистки (ФТО);
- глубокое дообессоливание воды на фильтрах смешанного действия.

Проектная схема водоподготовительной установки (ВПУ) может обеспечить требуемое качество добавочной воды для «среднего» качества исходной (сырой, или природной) воды.

Однако качество исходной воды в ОАО «Ивановские ПГУ» существенно ниже «среднего», что не позволило выйти на проектные показатели качества добавочной воды в период пуско-наладочных и пробных испытаний.

В табл. 2 приведены показатели качества воды по стадиям обработки, полученные штатным химическим анализом в период испытаний (по данным химцеха). Согласно данным табл. 2 и данным эксплуатации в течение года, при устойчивой работе ВПУ может давать обессоленную воду, отвечающую высоким требованиям даже зарубежных стандартов, для обеспечения качества подпиточной воды котлов-утилизаторов энергоблоков ПГУ.

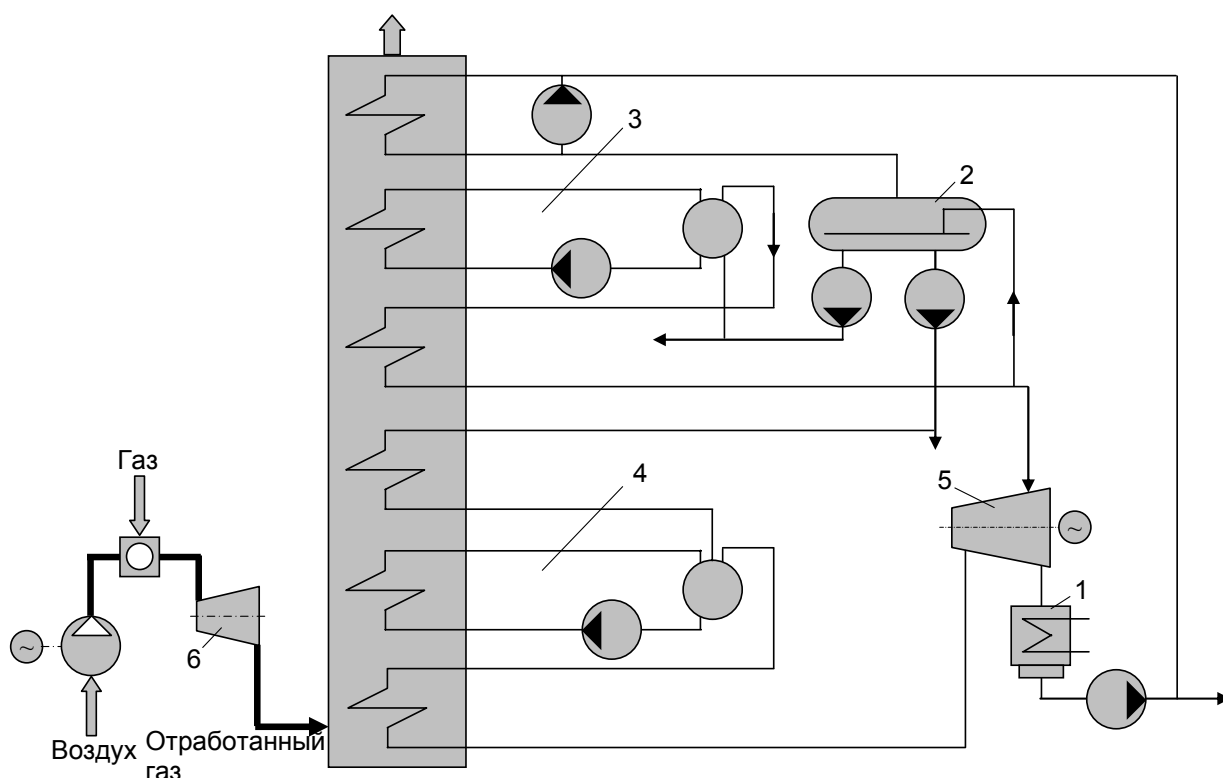


Рис. 1. Принципиальная схема ПГУ с двухконтурным КУ барабанного типа [8]: 1 – конденсатор; 2 – бак питательной воды и деаэрактор; 3 – контур низкого давления; 4 – контур высокого давления; 5 – паровая турбина; 6 – газовая турбина

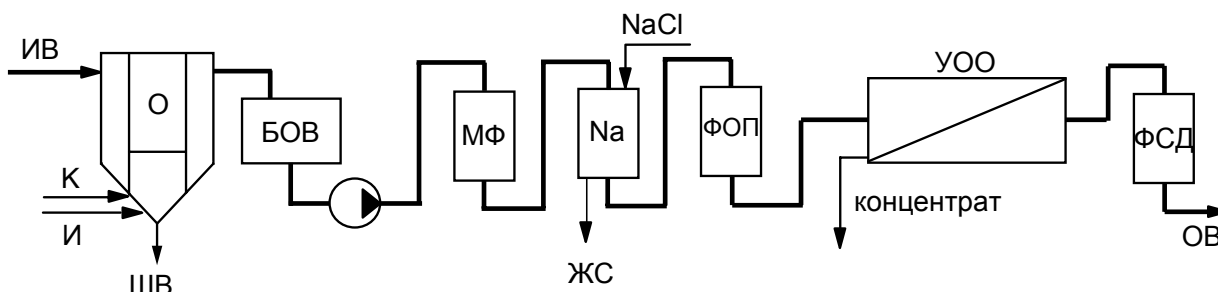


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема обработки воды ПГУ: ИВ – исходная вода; О – осветлитель; К – коагулянт; И – известь; ШВ – шламовые воды; БОВ – бак осветленной воды; МФ – механический фильтр; Na – Na-катионитный фильтр; ФОП – фильтр-органопоглотитель; ЖС – жесткий сток; УОО – установка обратного осмоса; ФСД – фильтр смешанного действия; ОВ – обессоленная вода

Таблица 2. Показатели качества обрабатываемой воды на водоподготовительной установке ОАО «Ивановские ПГУ»

Точка отбора пробы 6.05.08.	Контролируемый показатель									
	Ж, мкг-экв/л	Щ, мкг-экв/л	pH	Na, мкг/л	SiO <sub>2</sub> , мкг/л	Fe, мкг/л	Ок, мгО/л	Cl, мг/л	SO <sub>4</sub> , мг/л	с/с, мг/л
Исходная вода	2550	1600	7,62	7100	1126,6	2548,7	21,3	5,6	24,86	397
Известкованно-коагулированная вода, тч.№6	1600	500/ 1000	10,53	–	–	2264	13,44	–	–	–
Вход осветлительных фильтров	–	–	–	–	–	2248	–	–	–	–
Выход осветлительных фильтров	–	–	10,43	–	–	1140	–	–	–	–
Выход Na-катионитных фильтров	85	365/ 700	10,52	–	–	952	13,44	–	–	–
Выход ФОП	–	–	10,33	–	–	758	0,31	–	–	–
УОО вход	–	–	10,35*	36400	1112,1	752	0,27	20	10,26	297
УОО выход	–	–	9,3	3240	250,8	130	Отс	3,6	9,52	50,7
Вход ФСД	–	–	7,75	1410	144,7	48	Отс	–	–	44,4
Выход ФСД	–	–	–	1,1	10	36	отс	–	–	0,5

\* – значение pH воды до подкисления.

Однако качество умягченной воды на входе в установку обратного осмоса (УОО вход) часто не отвечает требованиям производителя по содержанию железа и окисляемости. Нормы качества воды на входе в установку обратного осмоса (УОО) не регламентируются руководящим документом (РД), обязательным для электростанций России, в том числе для ОАО «Ивановские ПГУ», что осложняет эксплуатацию аппаратов ВПУ в условиях частого изменения качества исходной воды, получаемой в осветлителе коагуляцией с известкованием.

Результаты лабораторных исследований показывают, что качество исходной (сырой) и осветленной воды в ОАО «Ивановские ПГУ» характеризуется значительными изменениями значений ряда основных показателей во времени. К числу таких показателей относятся, прежде всего, окисляемость и содержание железа. Так, в период перехода от весны к лету, с 06.05.2008 по 02.06.2008, значения перманганатной окисляемости и содержания железа в сырой и осветленной воде находились в пределах, приведенных в табл. 3.

Таблица 3. Изменение окисляемости (ПО) и содержания железа в сырой и осветленной воде в период испытаний (06.05.2008–02.06.2008)

Проба воды	ПО, мгО/л	Fe <sub>общ</sub> , мкг/л
Сырая вода	21,3–43,0	2430–1120
Осветленная вода	13,4–28,0	1060–5795

При этом средние значения окисляемости и железа характеризуются как высокие и трудно снижаемые при осветлении коагуляцией с известкованием, что подтверждено лабораторными исследованиями и промышленными испытаниями, выполненными фирмой ОРГРЭС.

Нами проведены лабораторные исследования по коагуляции природной (сырой) воды

Ивановских ПГУ с использованием различных коагулянтов и флокулянтов. Исследования показали, что наибольший эффект дает использование сернокислого алюминия с дозой от 2,0 до 2,5 мг-экв/л (в зависимости от качества сырой воды) в присутствии анионоактивного среднемолекулярного флокулянта с дозой 0,1±0,2 мг/л, а также при подщелачивании в случае значительного снижения щелочности (рис. 3).

Близким по коагулирующей способности оказался другой коагулянт – хлорное железо, в присутствии этого же флокулянта и при таких же дозировках, однако проявляющий склонность к образованию всплывающего шлама.

Для условий осветления исходной (сырой) воды сернокислым алюминием с флокулянтном AN 923 VHM проведено лабораторное исследование эффективности последующей очистки воды по схеме, предлагаемой на рис. 4.

Исследования показали, что в качестве фильтрующего материала механического фильтра (МФ) лучшие сорбционные свойства проявил фильтрующий материал Purolite, несколько хуже – гидроантрацит и еще хуже – кварцевый песок. Фильтрация осветленной воды на Na-катионитных фильтрах позволяет получить глубокоумягченную воду и обеспечивает благоприятные условия для удаления из воды органических примесей на ФОП, загруженном смолой Lewatit S 63-28 A. В среднем нормативная окисляемость воды после ФОП не превышает 2 мгО/л. При работе одной ступени умягчения (Na<sub>I</sub> при отключении Na<sub>II</sub>) пропуск жесткости в фильтрат Na<sub>I</sub> вызывает ухудшение качества фильтрата ФОП по окисляемости. Поэтому целесообразно один из трех установленных фильтров перевести в режим работы Na-катионирования II ступени.

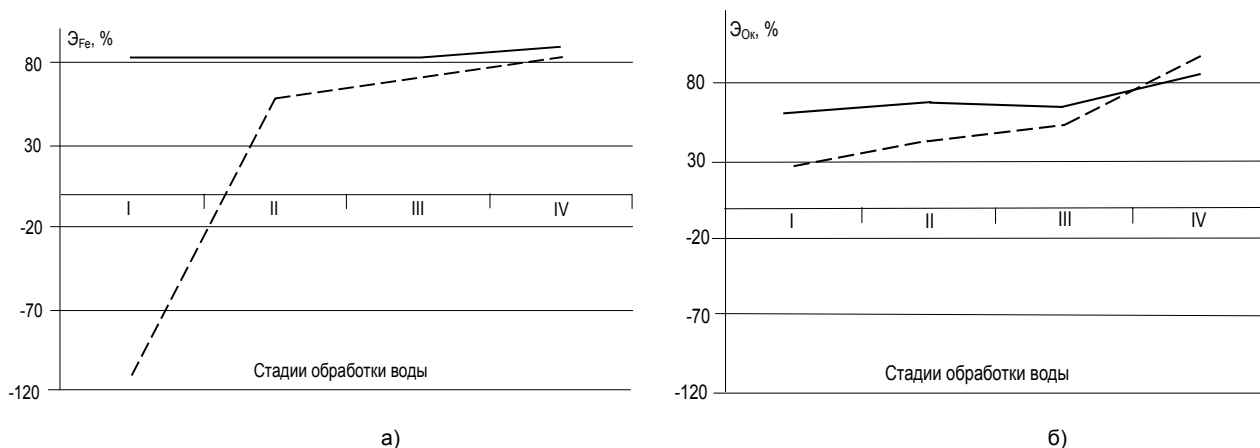


Рис. 3. Эффективность очистки воды от соединений железа (а) и окисляемости (б) по стадиям обработки: — —  $Al_2(SO_3)_3+AN923$ ,  $D_k=2,1$  мг-экв/л,  $D_{\phi}=0,2$  мг/л; - - -  $FeSO_4+Ca(OH)_2$ ; I – исходная вода; II – после осветлителя; III – после Na-фильтров; IV – после ФОРП

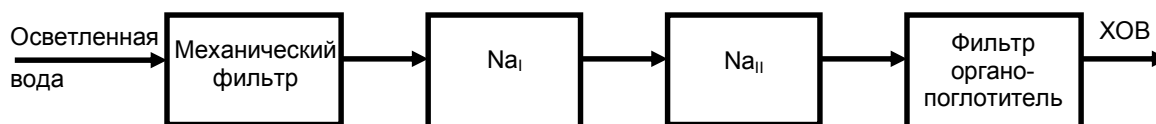


Рис. 4. Схема фильтрационной части ВПУ ПГУ

Анализ смолы-органонесителя из ФОРП ВПУ ОАО «Ивановские ПГУ» показал, что в рабочих условиях сорбционная емкость анионита Lewatit S 63-28 A по соединениям железа составила 94 мг/л смолы, тогда как по органическим веществам – перманганатная окисляемость составила 10368 мгО/л смолы (или более 10 гО/л смолы), что является максимальным значением по данным фирм-производителей смол-органопоглотителей. Как положительное свойство следует отметить хорошую регенерируемость данной смолы раствором смеси NaCl (10 %) и NaOH (2 %).

Программа проведения промышленных испытаний составлена нами и согласована с руководством ОАО «Ивановские ПГУ». Испытания проводились в период с 21.08.2008 по 02.09.2008 со средним расходом воды 25 м<sup>3</sup>/ч на осветлителе ВТИ-100. Доза коагулянта устанавливалась на уровне 2÷2,5 мг-экв/л. Доза флокулянта составляла 0,1 мг/л. Анализы проб исходной и осветленной воды, выполнялись авторами по принятым в энергетике методикам [2, 3]. Оперативный персонал химического цеха выполнял анализы в штатном режиме эксплуатации предочистки.

По результатам проведенных испытаний выполнено сравнение качества исходной воды, коагулированной сернокислым алюминием (режим испытания), и воды, коагулированной сернокислым железом совместно с известково-

ванием (по ранее полученным эксплуатационным данным) (табл. 4).

Установлено следующее: за период испытаний технологии коагуляции воды сернокислым алюминием с флокулянтном AN-923 наблюдалось значительное снижение значений ряда основных показателей в коагулированной воде по сравнению с исходной. Сравнение полученных результатов подтверждает эффективность выбранного метода. Так, в соответствии с данными табл. 4, достигнуто изменение показателей качества воды:

- содержания железа (общ.) – в 4,8 раза;
- окисляемости – в 4,8 раза;
- щелочности (общ.) – в 3,0 раза;
- кремнекислых соединений – в 1,5 раза;
- pH коагулированной воды – до 6,7 ед.
- прозрачности коагулированной воды –  $\geq 42$  см. по «кресту».

Жесткость (общ.) практически не изменялась, по сравнению с исходной водой.

Проведенные испытания подтверждают большую эффективность коагуляции сернокислым алюминием с дозировкой флокулянта по сравнению с ранее использованной технологией коагуляции с известкованием.

Снижение величины pH с 7,2 в исходной до 6,5–6,9 единиц в осветленной воде и снижение общей щелочности являются закономерными при данной технологии коагуляции и не имеют негативных последствий.

Таблица 4. Сравнительный анализ основных показателей качества исходной и осветленных вод ВПУ ОАО «Ивановские ПГУ»

Показатель	Исходная вода	Осветленная вода после коагуляции FeSO <sub>4</sub> + известкование	Осветленная вода после коагуляции Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 18H <sub>2</sub> O
Щ <sub>с</sub> мкг-экв/дм <sup>3</sup>	3700±100	1800±100	1400±100
Ж <sub>с</sub> мкг-экв/дм <sup>3</sup>	4100± 100	1500±200	4100± 100
pH ед.	7,6±0,2	10,6±0,2	6,6±0,2
Fe <sup>общ.</sup> мкг/дм <sup>3</sup>	1800±200	2300±200	550±100
Ок мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	28,0±2,0	24,0±2,0	6,8±2,0
SiO <sub>2</sub> мкг/дм <sup>3</sup>	1100	400,0±50,0	735±30,0
Прозр (+) см.	<5,0	<15	>42
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> мкг/дм <sup>3</sup>	1000	-	1700± 100

### Заключение

Анализ работы промышленной ВПУ ОАО «Ивановские ПГУ» и лабораторные исследования показывают, что удаление железа представляет наибольшую сложность при очистке воды, подаваемой на установку обратного осмоса (УОО), что заставляет искать альтернативный метод не только осветления, но и обессоливания умягченной воды в периоды ухудшения ее качества.

Нами рекомендована схема получения добавочной воды для энергоблоков 1,2 электрической мощностью 325 МВт каждый ОАО «Ивановские ПГУ» (рис. 5).

Предлагаемая схема подготовки добавочной воды базируется на установке водоподготовки, выполненной для первого блока ПГУ, требует минимальной реконструкции и позво-

ляет устойчиво получать обессоленную воду высокого качества. Проведенные лабораторные исследования показали возможность снижения окисляемости и содержания железа на стадии осветления до 80 %, а на стадии фильтрации, включая ФОП, – до 85–90 % от исходных значений в сырой воде. Наряду со снижением pH до 6,5–7,0, такое качество воды может удовлетворять требованиям к исходной воде УОО. Установка одной пары Н-ОН-фильтров параллельно УОО повышает маневренность установки при гарантированном качестве частично обессоленной воды. Рекомендуемая загрузка – катионит Purolite C-100 (КУ-2), анионит Purolite A-847. В схеме целесообразно предусмотреть декарбонизатор, возможно, совместив его с воздухоотделителем при предварительном вводе в трубопровод сырой воды коагулянта в дозах около 2,0 мг-экв/л.

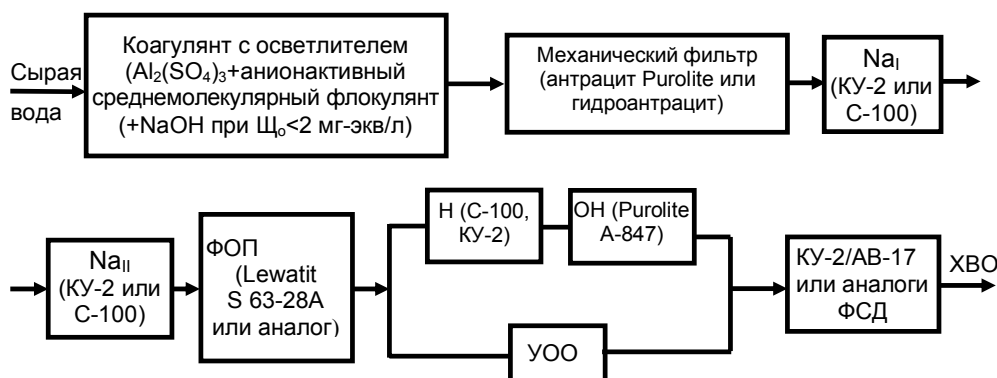


Рис. 5. Предлагаемая схема обработки сырой воды на ВПУ

Таблица 5. Показатели работы блока фильтров HR-ROH на Na-катионированной воде ПГУ

№ фильтроцикла	Качество Na-катионированной воды					Качество обессоленной воды (работа/отключение в регенерацию)				Объем воды за фильтроцикл, л	Сорбировано за фильтроцикл (на 1 л ионита)	
	Х, мкСм/см	Ок, мг/л	Fe, мг/л	Щф/Що, мг-экв/л	pH	Х, мкСм/см	Ок, мг/л	Fe, мг/л	pH		Ок, мг/л	Fe, мг/л
1	200	7,1	0,46	0,35/0,7	10,36	27/28	1,5/1,9	0,08	6,9	63,5	5636	365,6
2	239	5,8	0,25	0,05/0,7	9,93	26/29	1,3/2,1	0,05	6,7	68,5	4966,2	214,1
3	287	5,9	0,23	0,45/0,71	10,23	34/44	2,4/2,7	0,04	6,5	58	4278	166,8

Таблица 6. Показатели степени десорбции анионитов А-847, Амберлит IRA-67 и МР-64

Опытные данные		Степень десорбции ОВ, %	Степень десорбции ОВ, %, для Амберлит IRA-67 и МР-64
Количество ОВ, мг сорбированных	десорбированных		
555	294,4	52,3	55,3
355,6	295,6	83,1	71,0
308,3	333	108,0	68,0
203	296	145,8	64,8

\* избыточный расход щелочи на регенерацию.

Выбор типа ионитов для загрузки в блок фильтров обессоливания (Н (катионит) – ОН (анионит)) определен из опыта их использования в промышленных ионообменных установках [4, 5, 6]. Нами проведены лабораторные исследования названной пары ионитов на умягченной воде в условиях ВПУ ОАО «Ивановские ПГУ».

Согласно полученным результатам (табл. 5, 6), сорбционная емкость по органическим веществам (Ок, мгО/л) находится на уровне 5 гО/л смолы в анионитном фильтре, что является рекомендуемым фирмой-производителем значением. Содержание железа в обессоленной воде невысокое и вполне приемлемое для эффективной работы «полирующего» фильтра смешанного действия (ФСД). Следует отметить хорошую регенерируемость анионита от органических веществ при удельном расходе щелочи на регенерацию 100 г/л анионита (табл. 6), по сравнению с ре-

генерацией анионитов IRA-67 и МР-64 в аналогичных условиях [6].

#### Список литературы

1. Копылов А.С., Лавыгин В.М., Очков В.Ф. Водоподготовка в энергетике: Учеб. пособие для вузов. – М.: МЭИ, 2003.
2. Руководящие указания по коагуляции воды на ТЭС: РД 34.37.502 / СЦ НТИ ОРГРЭС. – М., 1973.
3. Воронов В.Н., Ларин Б.М., Сенина В.А. Химико-технологические режимы АЭС с ВВЭР: Учеб. пособие для вузов. – М.: МЭИ, 2005.
4. Опыт работы автоматизированной установки ионообменного умягчения природной воды / Е.В. Барочкин, М.Ю. Опарин, А.А. Ильичев и др. // Теплоэнергетика. – 2005. – № 10. – С. 18–23.
5. Ларин А.Б. Анализ технологической эффективности схем химического обессоливания воды в условиях промышленной эксплуатации.
6. Гостьков В.В. Совершенствование технологии обработки водного теплоносителя на тепловых и атомных электростанциях с использованием перспективных ионитов: Автореф. дис... канд. техн. наук / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2008.

Ларин Борис Михайлович,  
Ивановский государственный энергетический университет,  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химии и химических технологий в энергетике,  
e-mail: [admin@xxte.ispu.ru](mailto:admin@xxte.ispu.ru)

Коротков Александр Николаевич,  
Ивановский государственный энергетический университет,  
кандидат технических наук, доцент кафедры химии и химических технологий в энергетике,  
телефон (4932) 38-57-83.

Опарин Михаил Юрьевич,  
Ивановский государственный энергетический университет,  
кандидат технических наук, доцент кафедры химии и химических технологий в энергетике,  
e-mail: [admin@xxte.ispu.ru](mailto:admin@xxte.ispu.ru)

Ларин Андрей Борисович,  
Ивановский государственный энергетический университет,  
кандидат технических наук,  
телефон (4932) 38-57-83.