

УДК 621.187.11

## Анализ технологической эффективности схем химического обессоливания воды в условиях промышленной эксплуатации

Ларин А.Б. аспирант

Рассмотрены пути совершенствования технологии химического обессоливания природных вод на ТЭС. Показано количественно на примере химводоочистки ТЭЦ-ЭВС-2 ОАО «Северсталь», как можно сокращать расходы кислоты на регенерацию в сток на традиционных установках химобессоливания, на примерах ХВО ТЭЦ-21 ОАО «Мосэнерго» и ХВО Пермской ТЭЦ-1, и как можно реконструировать существующие установки для повышения технологических и экологических характеристик.

Наибольшее распространение в нашей стране получила технология химического обессоливания воды на базе ионитных фильтров при проточной регенерации, схема которой изображена на рис.1. Эта технология применяется уже несколько десятилетий и показала себя вполне надежной для вод малой и средней минерализации.

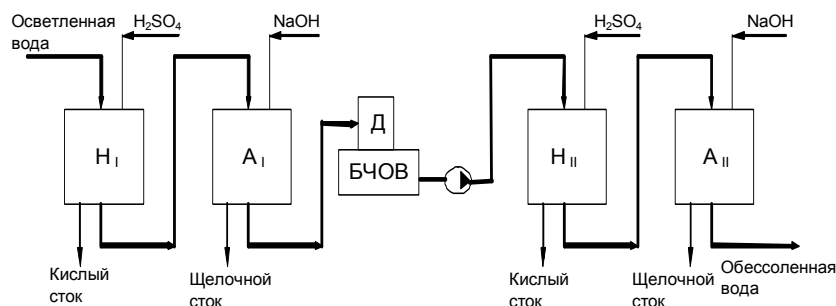


Рис. 1. Схема традиционного двухступенчатого химического обессоливания:

$H_I, H_{II}$  – Н-катионитные фильтры I и II ступени;  $A_I, A_{II}$  – ОН-анионитные фильтры I и II ступени

Ужесточение экологических требований к водоподготовке с одной стороны, ухудшение качества обрабатываемой воды с другой [1], удорожание реагентов, ионитов и высокие эксплуатационные затраты привели к совершенствованию традиционных и созданию новых схем обессоливания.

Разнообразные предложения по совершенствованию технологии химического обессоливания воды на ТЭС можно разделить на 2 группы:

- совершенствование технологии химического обессоливания на базе действующих установок с целью сокращения расхода реагентов и стоков;
- разработка схем химобессоливания на основе новых фильтров и методов ионного обмена.

**Отечественные технологии совершенствования ВПУ на базе действующих установок.** Одним из простых способов уменьшения расхода реагентов является повторная регенерация, когда регенерационный раствор подается сначала на вторую ступень, а затем этот же раствор - на первую.

Н-катионитный фильтр I-ой ступени, принимает наибольшую ионную нагрузку при обессоливания воды, поэтому его часто конструируют как ступенчато-противоточный фильтр, т.е. в двухкорпусном исполнении ( $H_I^{np}$  - предвключенный и  $H_I^{och}$  - основной). Это дает значительную экономию кислоты на регенерацию.

Одним из эффективных путей сокращения расхода щелочи на регенерацию и в сток в подобных случаях является использование в  $A_{II}$  средней дренажной системы по типу среднего дренажа стандартных ФСД с внутренней регенерацией. При этом регенерация ведется двумя потоками: сверху и снизу с отводом отработанного раствора и отмывочной воды через средний дренаж. Технология такой регенерации была опробована Фейзиевым Г.К. [2]. Схема химобессоливания с противоточным  $H_I$  и с двухпоточно-противоточным  $A_{II}$  представлена на рис.2 и применяется длительное время (с 1989 г.) на ТЭЦ-21 ОАО «Мосэнерго» (БФ-6). Эксплуатация схемы показала значительное сокращение реагентов на регенерацию, по сравнению с традиционной схемой химобессоливания. Данная схема является одним из лучших технологических решений, реализованных на действующем водоподготовительном оборудовании при его минимальной реконструкции.

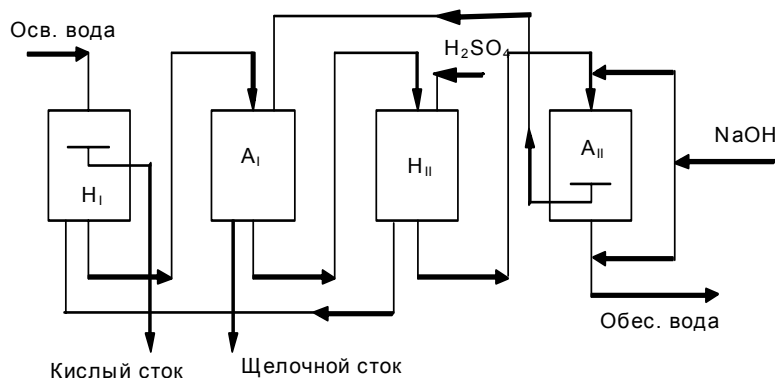


Рис.2. Технологическая схема БФ-6 ТЭЦ-21 АО «Мосэнерго» с двухпоточно-противоточным А<sub>II</sub> («усовершенствованное» химобессоливание)

Нами проведена сравнительная оценка эксплуатационных затрат и расхода реагентов в традиционной технологии (рис.1) и усовершенствованной (рис.2) для блоков фильтров №1 и №6 ХВО ТЭЦ-21 ОАО «Мосэнерго».

Блок фильтров (БФ-1) ХВО ТЭЦ-21 отличается от схемы традиционной технологии (рис.1) лишь установкой дополнительного анионитного фильтра второй ступени (А<sub>II</sub>) для глубокого обескремнивания воды. БФ-6 ХВО ТЭЦ-21 точно отвечает схеме на рис. 2. Оба блока фильтров питаются известкованной водой следующего качества (мг-экв/л): Ж<sub>0</sub>=1,6; [Na<sup>+</sup>]=0,61; Щ<sub>0</sub>=0,95; [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]=1,05; [Cl<sup>-</sup>]=0,21; [SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>]=0,1.

Работы по установке БФ-6 выполнены силами химцеха ТЭЦ-21 в рамках планового ремонта. Характеристики загруженных в фильтры ионитов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристика ионитов в фильтрах БФ-1 и БФ-6 ХВО ТЭЦ-21 ОАО «Мосэнерго»

Название фильтра	Марка ионита		Объем ионита, (м <sup>3</sup> )	
	БФ-1	БФ-6	БФ-1	БФ-6
H <sub>I</sub> <sup>пр</sup>	СК-1	---	12,8	---
H <sub>I</sub> <sup>очн</sup>	Ку-2	КУ-2	9,2	15,2
A <sub>I</sub>	АН-31	АН-31	10,7	13,5
H <sub>II</sub>	СК-1	СК-1	7,4	10,6
A <sub>II</sub> <sup>пр</sup>	АТ 660+А 101	---	8,7	---
A <sub>I</sub> <sup>очн</sup>	Варион+АТ 660	Костел+Зеролит	7,7	18,2

Анализ работы БФ-1 и БФ-6 за один год показал, что при следующем качестве обессоленной воды:

БФ-1:  $\chi=0,7 \div 1,1$  мкСм/см; [SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>]=100 мг/л;

БФ-6:  $\chi=1,1 \div 1,9$  мкСм/см; [SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>]=25 мг/л.

Получены среднегодовые расходы реагентов, приведенные в табл. 2.

Таблица 2. Среднегодовые и предельные значения удельных расходов реагентов на регенерацию ионитов ХВО ТЭЦ-21 «Мосэнерго»

Блоки фильтров	Серная кислота (г-экв/г-экв)			Едкий натр (г-экв/г-экв)		
	средний	миним.	максим.	средний	миним.	максим.
БФ-1	2,20	1,86	2,69	1,80	1,43	2,13
БФ-6	1,66	1,45	2,12	1,48	1,07	1,87

Среднегодовой расход реагентов для БФ-6 по сравнению с БФ-1, значительно снижен (табл. 2) за счет применения противоточной регенерации фильтра А<sub>II</sub>, и вследствие этого, уменьшения количества фильтров.

Исключение из схемы декарбонизатора, наряду с сокращением количества фильтров, дает значительное снижение приведенных затрат на производство обессоленной воды лучшего качества по кремниевой кислоте.

Таким образом, внедрение противоточной технологии на действующем оборудовании позволяет получить воду требуемого качества при меньшем числе ступеней ионирования (меньшем числе фильтров цепочки).

Наряду с приведенным примером повышения эффективности водоподготовительной установки (ВПУ) путем реконструкции фильтров и установок водоподготовки улучшение технологических показателей может быть достигнуто оптимизацией действующей технологии. В 2003 г. нами проведены лабораторные исследования ионитов и промысленные испытания ионитных фильтров ТЭЦ-ЭВС-2» ОАО «Северсталь» (г. Череповец).

ВПУ обеспечивает обработку исходной воды из р. Шексна путем известкования и коагуляции сернокислым железом в двух установленных осветлителях ВТИ-400и, очистку коагулированной воды в напорных насыпных антрацитных двухкамерных механических фильтрах (осветление воды) и последующее двухступенчатое обессоливание. Фильтры обессоливания включены по параллельной схеме. Декарбонизаторы установлены после катионитных фильтров первой ступени.

Химическое отделение ТЭЦ-ЭВС-2 ОАО «Северсталь» использует следующие ионообменные смолы:

- слабоосновные аниониты: МР-64, А-100;
- сильноосновные аниониты: АВ-17; М 510;
- катиониты: СК-1, КУ-2-8, С-100; ИР 120.

Восстановление рабочих обменных емкостей ионитов производится растворами серной кислоты и едкого натра. На рис.3 представлена динамика изменения стоимости этих реагентов за период 2000 – 2002 гг.

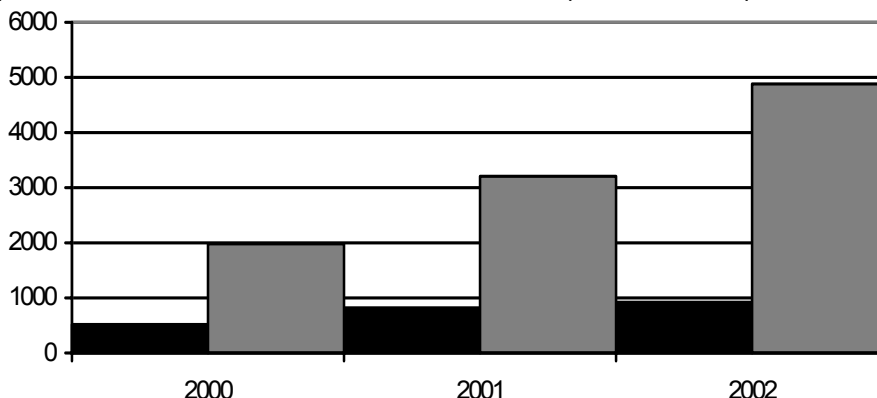


Рис.3. Динамика изменения стоимости реагентов, используемых на ТЭЦ-ЭВС-2 ОАО «Северсталь» для восстановления рабочей обменной емкости ионитных фильтров: - стоимость едкого натра, руб/т; - стоимость серной кислоты, руб/т

В табл. 3 приведены данные по расходу серной кислоты и едкого натра за 2001 г.

Таблица 3. Расход H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и NaOH за 2001 г.

Реагент	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	87,8	47,1	72,6	62,7	62,6	54,4	54,5	59,3	59,1	68,0	65,3	71,2
NaOH	15,5	14,9	25,0	19,1	15,6	15,8	16,8	18,0	17,0	9,0	12,0	11,0

По данным табл. 3 были рассчитаны фактические удельные расходы реагентов на собственные нужды обессоливающей установки. Расчет был произведен в соответствии с рекомендациями РД 34.37.526-94.

Расчет удельных расходов 100 %-й серной кислоты (г/м<sup>3</sup>) для двухступенчатого обессоливания с параллельным включением фильтров проводился по формуле

$$P_k = [q_k (Kt - 0,3) + 150 \cdot 0,3] \cdot K_{сн} ,$$

где q<sub>к</sub> – удельный расход серной кислоты, г/г-экв; Kt – суммарная концентрация катионов в осветленной воде, мг-экв/дм<sup>3</sup>; K<sub>сн</sub> – коэффициент, учитывающий расход H-катионированной воды на собственные нужды установки.

Расчет удельных расходов 100 %-го едкого натра (г/м<sup>3</sup>) для двухступенчатого обессоливания с параллельным включением фильтров проводился по формуле

$$P_k = (q_{щ} \cdot An) \cdot K_{сн}$$

где q<sub>щ</sub> – удельный расход едкого натра, г/г-экв; An – суммарная концентрация анионов в осветленной воде, мг-экв/дм<sup>3</sup>; K<sub>сн</sub> – коэффициент, учитывающий расход частично обессоленной воды на собственные нужды установки.

Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4. Удельные расходы кислоты и щелочи на регенерацию ионитных фильтров

Кислота (100 %), г/м <sup>3</sup>		Едкий натр (100 %), г/м <sup>3</sup>	
норма	факт	норма	факт
319,2	400,0	277,2	150,0

Приведенные данные показывают, что при невысокой минерализации (сухой остаток – С.О.≤170 мг/л) и общей жесткости ЖО≤2,5 мг-экв/л речная вода содержит повышенную (вдвое) концентрацию органических примесей (Ок – до 10 – 11 мгО/л) с периодическим увеличением содержания железа до 500÷600 мкг/л, что позволяет отнести ее к типу вод с повышенной сложностью ионитной обработки.

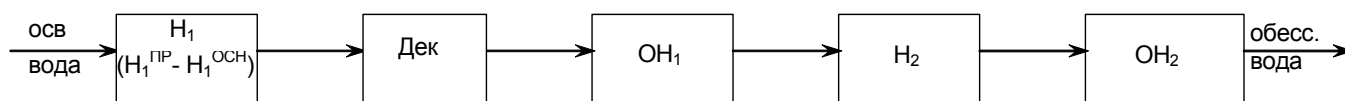


Рис. 4. Схема ионитной обработки осветленной воды ТЭЦ-ЭВС-2

Такую схему обработки воды для подпитки барабанных котлов СВД (p<sub>б</sub>=13,8 МПа) можно считать типовой, за исключением места установки декарбонизатора, который обычно ставят за ОН<sub>1</sub> или за Н<sub>2</sub>.

Целью данного этапа работы была разработка нового регламента эксплуатации узла регенерации. Проведенное исследование показало, что принятый на ХВО ТЭЦ-ЭВС-2 ОАО «Северсталь» регламент

эксплуатации ионитных фильтров обеспечивает нормальную работу анионитных фильтров обеих ступеней, но реализуется с повышенным расходом кислоты на регенерацию Н-катионитных фильтров первой ступени (табл. 5).

Таблица 5. Результаты химического анализа проб регенерационных растворов при ступенчатой регенерации фильтра Н<sub>1</sub>-10 от 10.09.03.

№ пробы	Время отбора проб	Вход Н <sub>1</sub> -10			Выход Н <sub>1</sub> -10			
		К, мг-экв/л	t, °С	χ <sub>t</sub> , мСм/см	К, мг-экв/л	Ж <sub>о</sub> , мг-экв/л	t, °С	χ <sub>t</sub> , мСм/см
1	17 <sup>45</sup>	346	24,7	9,651/10	-	-	-	-
2	17 <sup>50</sup>	347	27,0	10,57/10	21,4	25,4	24,0	7,228
3	17 <sup>55</sup>	350	30,1	10,63/10	98,6	141	28,0	21,02
4	18 <sup>05</sup>	352	31,0	10,69/10	114	263	30,4	4,805/10
5	18 <sup>10</sup>	533	31,0	15,33/10	128	269	32,5	5,303/10
6	18 <sup>15</sup>	714	32,6	19,97/10	148	280	32,6	5,910/10
7	18 <sup>20</sup>	720	30,0	20,20/10	170	256	32,5	6,434/10
8	18 <sup>25</sup>	720	30,0	20,24/10	266	330	31,6	9,049/10
9	18 <sup>30</sup>	720	31,2	20,27/10	334	375	32,5	10,84/10
10	18 <sup>35</sup>	720	32,7	20,02/10	374	366	30,4	11,74/10
11	18 <sup>40</sup>	722	33,3	19,88/10	458	369	32,0	13,94/10
12	18 <sup>45</sup>	716	33,0	19,73/10	478	370	32,3	14,58/10
13	18 <sup>55</sup>	-	-	-	536	268	33,8	15,60/10
14	19 <sup>05</sup>	-	-	-	244	85	33,2	7,904/10
15	19 <sup>45</sup>	-	-	-	4,0	3,5	32,4	1,879/10

**Примечание:** показания кондуктометра сняты при фактической температуре пробы χ<sub>t</sub> (t °С); значение χ<sub>t</sub>=10,75/10 отвечает значению удельной электропроводности 10,75 мСм/см (10750 мкСм/см) пробы разбавленной в 10 раз при фактической температуре

В этой связи в рамках данной работы было проведено исследование ступенчатой регенерации Н-катионитных фильтров первой ступени, выполненное на фильтре Н<sub>1</sub>-10, путем последовательной реализации двух регенераций по следующей программе:

- взрыхление катионита – 30 мин;
- включение насоса разбавления кислоты Q=(75-85) м<sup>3</sup>/ч;
- включение первого насоса-дозатора H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,5·V<sup>92%</sup><sub>H2SO4</sub> (концентрация рабочего раствора 1,5 %);
- включение второго насоса-дозатора H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,5·V<sup>92%</sup><sub>H2SO4</sub> (концентрация рабочего раствора 1,5 %);
- выключение обоих насосов-дозаторов при срабатывании всего объема кислоты, предназначенного для регенерации;
- проведение отмывки по линии регенерации Н-катионированной водой в течении 60 минут;
- домывка по основной линии осветленной водой до значения кислотности на 0,3-0,5 мг-экв/дм<sup>3</sup> превышающей кислотность рабочего режима эксплуатации.

Концентрация рабочего раствора H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в первой фазе регенерации составила 1,6 %, во второй фазе-3,4 %. Когда сработал весь бак мерник (h<sub>БМ</sub>=1,5 м; S<sub>БМ</sub>=0,785 м<sup>2</sup>), объем кислоты, пошедшей на регенерацию, V<sup>92%</sup><sub>H2SO4</sub>=1,178 м<sup>3</sup>.

Выходные кривые регенерации представлены на рис. 4.

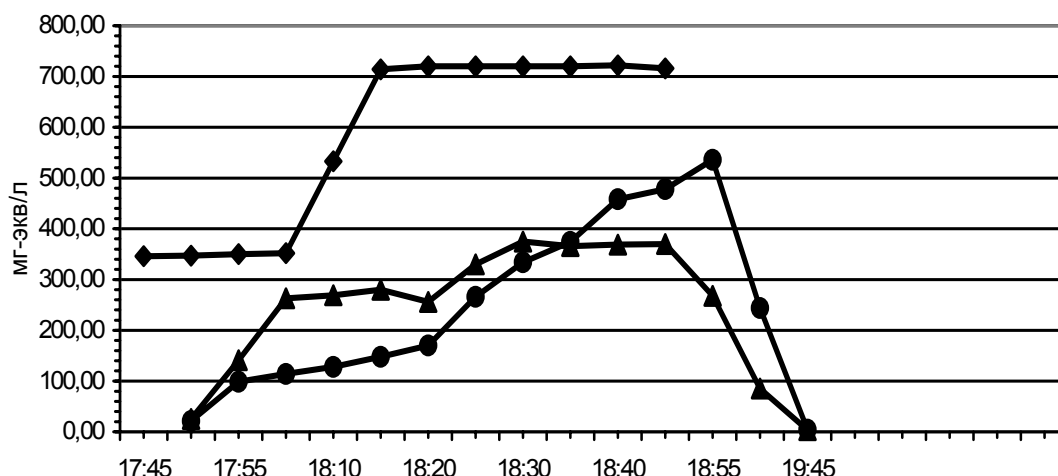


Рис. 4. Графическая зависимость характеристик опытной ступенчатой регенерации № 1 Н-катионитного фильтра I ступени № 10 от 10.09.03: - вход: кислотность, ■ мг-экв/л; - выход: кислотность, ● мг-экв/л; - выход общая жесткость, ▲ мг-экв/л.

Анализ проб отработанного регенерационного раствора показал, что в сток вышло 26653 г-экв H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Тогда, при расходе кислоты из бака-мерника массой G<sub>H2SO4</sub>=40288 г-экв вытеснено в процессе регенерации катионов Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>2+</sup> массой 40 288–26 653=13625 г-экв.

Удельный расход серной кислоты на регенерацию в этом случае составил:  $q_{H_2SO_4} = 2,9$  г-экв/г-экв, что существенно ниже полученного удельного расхода при обычной регенерации фильтра Н-4, равного 4,9 г-экв/г-экв.

Рабочая обменная емкость ( $E_p$ ) катионита в этом случае составила 832 г-экв/м<sup>3</sup>. Это существенно больше, таковой для обычной регенерации.

Таким образом, проведенные исследования ступенчатой регенерации катионита в фильтре Н-10 дали положительные результаты и показали возможность сокращения расхода серной кислоты на регенерацию на 15–20 % от существующего уровня.

Лабораторные исследования динамической обменной емкости проб катионитов из фильтра Н-10 показали возможность увеличения обменной емкости катионита до 50 % за счет изменения регламента регенераций.

#### Отечественные технологии совершенствования ВПУ на базе новых ионитных фильтров.

Совершенствование технологии химобессоливания путем разработки новых ионитных фильтров основано на применении в схемах ионообменного обессоливания и умягчения воды противоточных фильтров [3]. Основная особенность противоточной технологии заключается в том, что обрабатываемая вода и регенерационный раствор пропускается через ионитную загрузку во взаимно противоположных направлениях (рис. 5). При этом обрабатываемая вода перед выходом из фильтра соприкасается с глубокоотрегенерированными слоями ионита, вследствие чего обеспечивается повышенное качество фильтрата. Такая технология регенерации позволяет интенсифицировать работу оборудования, повысить эффективность использования ионитов, сократить число ступеней обработки (одна ступень фильтров обеспечивает качество двух традиционных ступеней), а, следовательно, и количество оборудования, снизить расход реагентов на регенерацию, уменьшить расход воды на собственные нужды и объем стоков. Однако при противоточной регенерации по схеме  $H_{про} - A_{про}$  усложняется конструкция фильтров, увеличивается интенсивность регенерации и, как следствие, количество переключений, что требует высокой культуры обслуживания таких установок, надежной арматуры, средств автоматизации и контроля.

ВНИИАМ совместно с ВТИ разработали противоточный фильтр, который успешно был опробован на Средне-Уральской ГРЭС [4] (рис.5).

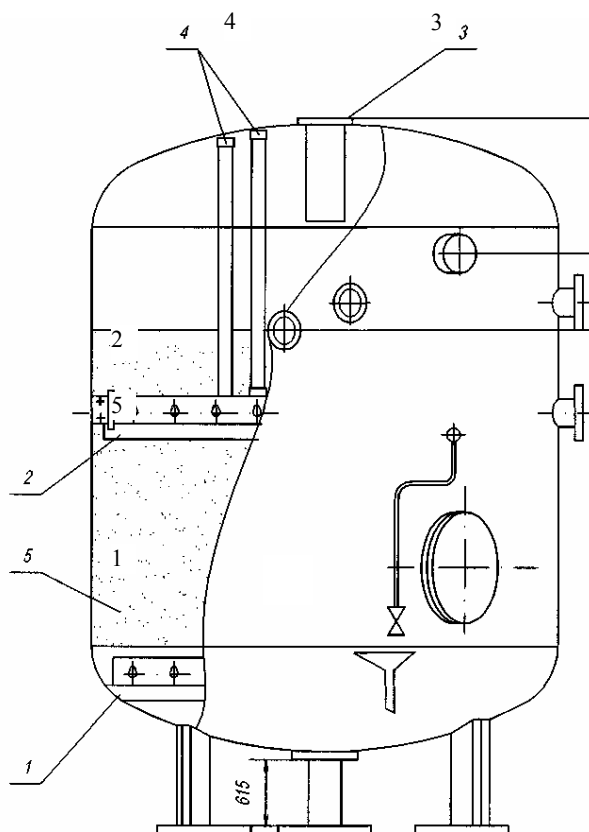


Рис. 5. Конструкция противоточного фильтра ВНИИАМ:  
1 – нижнее РУ; 2 – среднее РУ; 3 – верхнее РУ; 4 – тяги; 5 – фильтрующий слой

При работе противоточных фильтров в одну ступень обессоливания удалось получить обессоленную воду по качеству, соответствующему 2-х ступенчатому обессоливанию, но со скоростями выше, чем при работе обычных фильтров. Использовались отечественные иониты марок КУ-2 и АВ-17. Удельный расход реагентов составил 1,5÷1,8 г-экв/г-экв.

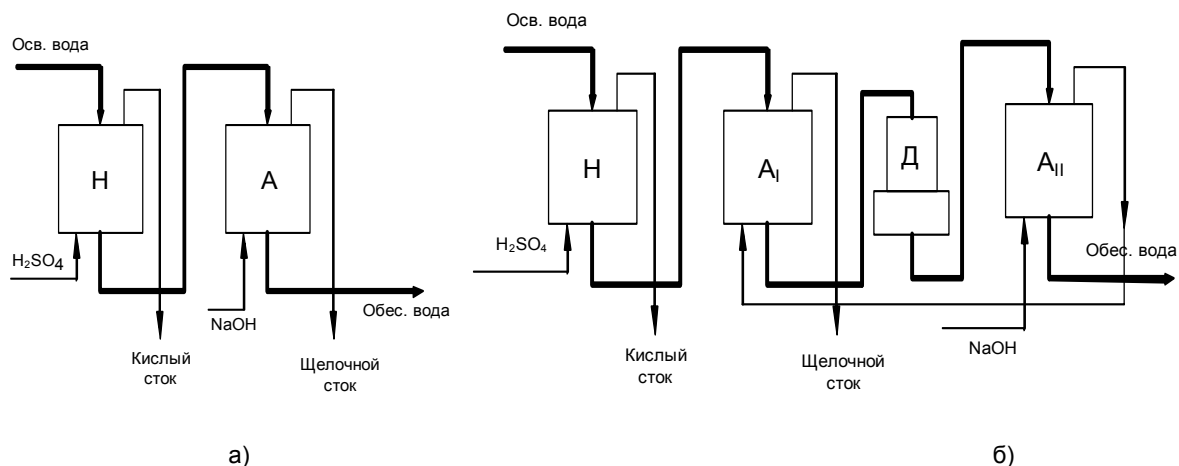


Рис. 6. Схемы химобессоливания с противоточной регенерацией:  
Д - декарбонизатор

Для Пермской ТЭЦ-9 ВНИИАМ была предложена новая технологическая схема на базе противоточной технологии ионирования.

На ХВО-2 Пермской ТЭЦ-9 существующая установка, работающая по схеме  $H_{пред}-H_{осн}-A_1-DH_2-A_2$ , может быть переоборудована за счет реконструкции параллельноточных фильтров в противоточные. Тогда схема будет существенно упрощена:  $H_{про}-D-A_{про}$ . В каждой цепочке ХВО-2 вместо 5 фильтров останется 2, а объем ионитовой загрузки уменьшится: по катиониту – с 35 до 15 м<sup>3</sup>, по аниониту – с 30 до 15 м<sup>3</sup>.

Конкретные показатели сокращения количества оборудования и объема ионитов ХВО-2 представлены в табл. 6,7.

Таблица 6. Экономическая эффективность реконструкции ХВО-2 на базе противоточной технологии

Показатели	Расчетная формула или источник информации	Прямоточная схема	Противоточная схема
Производительность Q, т/ч	Данные ПТЭЦ-9	900	900
Время работы установки t, час/год	Данные ПТЭЦ-9	8000	8000
Выработка ХВО-2 W, т/год	$W=Q \cdot t$	7200000	7200000
Количество фильтров катионитных/анионитных n, шт.	Данные ПТЭЦ-9 Рекомендации ВНИИАМ	32/26	12/12
Загружено смолы V, м <sup>3</sup> :	Данные ПТЭЦ-9 Рекомендации ВНИИАМ		
КУ-2 и аналоги		450	180
АН-31		80	-
АВ-17 и аналоги		320	180
Ионная нагрузка j, г-экв/м <sup>3</sup>	Данные НК НПЗ	4	4
Количество поглощенных ионов J, г-экв/год	$J=j \cdot W$	$28,8 \cdot 10^6$	$28,8 \cdot 10^6$
Удельный расход кислоты на регенерацию $i_k$ , г-экв/г-экв	Данные ПТЭЦ-9 Рекомендации ВНИИАМ	2,31	2,0
Удельный расход щелочи на регенерацию $i_{щ}$ , г-экв/г-экв	Данные ПТЭЦ-9 Рекомендации ВНИИАМ	2,06	1,5
Расход кислоты G <sub>к</sub> , т/год	$G_k = J \cdot i_k \cdot 10^{-6}$	3260	2820
Расход щелочи G <sub>щ</sub> , т/год	$G_{щ} = J \cdot i_{щ} \cdot 10^{-6}$	2373	1728
Расход воды на собственные нужды, (% от объема обессоленной воды) p <sub>в</sub> , %	Данные ПТЭЦ-9 Рекомендации ВНИИАМ	30	12,7
Расход воды на собственные нужды P <sub>в</sub> , т/год	$P_v = p_v \cdot W$	2160	914,4
Среднегодовая температура исходной воды t <sub>ив</sub> , °С	По опытным данным	10	10
Среднегодовая температура аппаратах ХВО t <sub>об</sub> , °С	По опытным данным	30	30
Потери тепла со сбросными водами Q <sub>т</sub> , Гкал/год	$Q_t = P_v \cdot \rho \cdot (t_{об} - t_{ив}) \cdot c$	4320	1830

Таблица 7. Сокращение объемов ионитов

Наименование	Количество	Примечание
Сокращение объема загрузки КУ-2, м <sup>3</sup>	270	табл. 8.10
Насыпная масса товарного КУ-2, т/м <sup>3</sup>	0,75	
Сокращения веса загрузки, т	202,5	
Цена КУ-2, тыс.руб./т	23,25	Данные «Аквахима»
Экономия на ионите КУ-2, тыс.руб.	4708	
Сокращение объема загрузки АВ-17, м <sup>3</sup>	140	табл. 8.10
Насыпная масса товарного АВ-17, т/м <sup>3</sup>	0,72	
Сокращения веса загрузки, т	100,8	
Цена АВ-17, тыс.руб./т	32,5	
Экономия на ионите АВ-17, тыс.руб.	3276	
Сокращение объема загрузки АН-31, м <sup>3</sup>	80	табл. 8.10
Насыпная масса товарного АН-31, т/м <sup>3</sup>	0,72	
Сокращения веса загрузки, т	57,6	
Экономия на ионите АН-31, тыс.руб.	1296	

Из приведенных данных видно, что реконструкция обеспечивает значительное уменьшение эксплуатационных затрат при переходе на противоточную технологию ионирования. Однако следует иметь в виду, что равную надежность получения требуемого качества обессоленной воды при реконструкции ХВО-2 ПТЭЦ-9 с прямоточной на противоточную технологию можно получить лишь при глубокой автоматизации управления и контроля технологии обессоливания. Действительно, при срабатывании  $H_{\text{про}}$  или  $A_{\text{про}}$  начинается пропуск сорбируемых ионов непосредственно в обессоленную воду. Несвоевременное отключения блока фильтров в регенерацию может вызвать недопустимое ухудшение качества обессоленной воды. Экономия реагентов при усложнении регламента регенерации также может быть обеспечена лишь автоматизацией управления.

#### Список литературы

1. **Ларин Б.М., Бушуев Е.Н., Бушуева Н.В.** Технологическое и экологическое совершенствование водоподготовительных установок на ТЭС // Теплоэнергетика. – 2001. – № 8. – С. 23–27.
2. **Фейзиев Г.К.** Высокоэффективные методы умягчения, опреснения и обессоливания воды. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
3. **Водоподготовительное** оборудование для ТЭС и промышленной энергетики: Отраслевой каталог / Е.Б. Юрчевский, И.Г. Берсенева, В.А. Берсенев и др.; ЦНИИТЭИТдЭК Маш – М., 1988.
4. **Юрчевский Е.Б.** Разработка, исследование и внедрение водоподготовительного оборудования для ТЭС с улучшенными экологическими характеристиками: Автореф. дис. ... д-р техн. наук. – Иваново, 2004. – С. 10–22.