

## ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

### ТЭЦ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ: ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ И СИСТЕМЫ ЕГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ<sup>1</sup>

© 2022 г. А. Б. Ларин<sup>а, \*</sup>, Б. М. Ларин<sup>а</sup>, А. В. Кирилина<sup>б</sup>,  
С. Ю. Сулов<sup>б</sup>, Е. Ф. Нартя<sup>б</sup>, В. В. Козловский<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Ивановский государственный энергетический университет, Рабфаковская ул., д. 34, г. Иваново, 153003 Россия

<sup>б</sup>ООО “Водные технологии – инжиниринг”, Автозаводская ул., д. 14, Москва, 115280 Россия

\*e-mail: yaandy\_81@mail.ru

Поступила в редакцию 21.04.2021 г.

После доработки 08.05.2021 г.

Принята к публикации 23.06.2021 г.

Повышения качества теплоносителя ТЭЦ можно достичь путем модернизации водно-химического режима (ВХР) и систем его обеспечения. В рамках этой задачи необходимо выполнить анализ накопленного опыта эксплуатации оборудования, определить преимущества и недостатки применяемых технологий и аппаратов, предложить перспективные решения с максимальным использованием надежных и экологичных материалов и технологических разработок. На российских ТЭЦ освоен новый водно-химический режим на основе аминоксодержащих реагентов. В статье приведены примеры использования отечественных комплексных реагентов марки ВТИАМИН при организации ВХР основного и вспомогательного контуров теплоносителя, отличающихся от импортных аналогов составом и прошедших испытания в конкретных условиях эксплуатации ТЭЦ. Наряду с традиционными на ТЭЦ эксплуатируются водоподготовительные установки (ВПУ), на которых используются мембранные технологии. Представлены результаты обследования нескольких ВПУ ТЭЦ и предложены комбинированные схемы ионообменной и мембранной технологий, обеспечивающие снижение расхода реагентов и стоков при высокой технологической надежности оборудования. На ТЭЦ широко применяются перспективные информационные технологии. Показана возможность разработки цифровых систем химико-технологического мониторинга ВХР на базе отечественных анализаторов нового поколения.

*Ключевые слова:* модернизация ТЭЦ, аминоксодержащий водно-химический режим, перспективная водоподготовка, химический контроль водного теплоносителя, система мониторинга нового поколения

DOI: 10.1134/S0040363622020035

Результаты исследования ИНЭИ РАН [1] показали, что 60% оборудования ТЭЦ России находится в работе более 40 лет, причем выработка электроэнергии на ТЭЦ на 01.01.2017 составила 55% общей выработки электроэнергии на тепловых электростанциях. Отмечено, что следствием эксплуатации устаревших ТЭЦ являются большие производственные расходы и загрязнение окружающей среды, необходимо техническое перевооружение ТЭЦ, которое должно осуществляться на базе отечественного оборудования. В настоящее время обсуждается научно-технический проект “ТЭЦ нового поколения”, содержащий программу технического обновления ТЭЦ, включая разработку технологических решений, схем и нового оборудования с интегрированными

системами аккумулирования энергии (тепловые аккумуляторы и др.), а также инструментальной и методологической основы создания цифровых систем интеллектуального мониторинга и оценки качества режимов работы ТЭЦ.

За последние десятилетия широкое распространение на электростанциях России получили органические аминоксодержащие реагенты для коррекции ВХР основного и вспомогательных контуров, установки мембранной технологии водоподготовки, перспективные системы химико-технологического мониторинга (СХТМ) качества воды и пара [2–12]. В рамках задачи модернизации ТЭЦ необходимо выполнить анализ накопленного опыта эксплуатации оборудования, определить преимущества и недостатки применяемых технологий и аппаратов, предложить перспективные решения с максимальным использованием отечественных материалов и технологических разработок. Изло-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-08-00432).

женные далее материалы не претендуют на полноту решения обозначенной задачи, но представляют разработки и предложения авторов по данному направлению.

### ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКИХ АМИНОВ

Традиционный гидразин-аммиачный водный режим с дозировкой фосфатов в барабан котла [13] стал терять свои позиции с начала эксплуатации энергоблоков парогазовых установок (ПГУ) с котлами-утилизаторами. Возникли сложности с поддержанием нормативных значений pH [14] в конденсатно-питательном тракте, котловой воде и паре, концентрации аммиака – в питательной воде, щелочности – в котловой воде [2, 15]. Появились ВХР с дозированием едкого натра в котловую воду и режим на основе аминокислотсодержащих реагентов [3–5]. Такие реагенты стали использоваться и во вторых контурах энергоблоков атомных электростанций [9]. Обладая меньшим, по сравнению с аммиаком, коэффициентом распределения между паром и котловой водой, органические амины способны поддерживать щелочную реакцию среды в питательной и котловой воде. В то же время компоненты комплексного реагента обеспечивают вынос значительной части их в пар и пассивацию парового тракта энергоблока.

Наибольшее распространение в России получили импортные комплексные реагенты торговых марок Helamin BRW-150Н, Helamin-906Н,

Stemin-V211. Обладая преимуществами при применении на энергоблоках ПГУ, по сравнению с фосфатным и гидратным ВХР, аминокислотсодержащий режим имеет некоторые недостатки. Прежде всего это высокая стоимость и значительный расход комплексного реагента. Производители не раскрывают состав компонентов, входящих в комплексные реагенты, что затрудняет разработку нормативных документов по их использованию.

В России на энергоблоке ПГУ-325 филиала Ивановские ПГУ “Интер РАО–Электрогенерация” были проведены опытно-промышленные испытания (ОПИ) отечественного реагента ВТИАМИН КР-11.

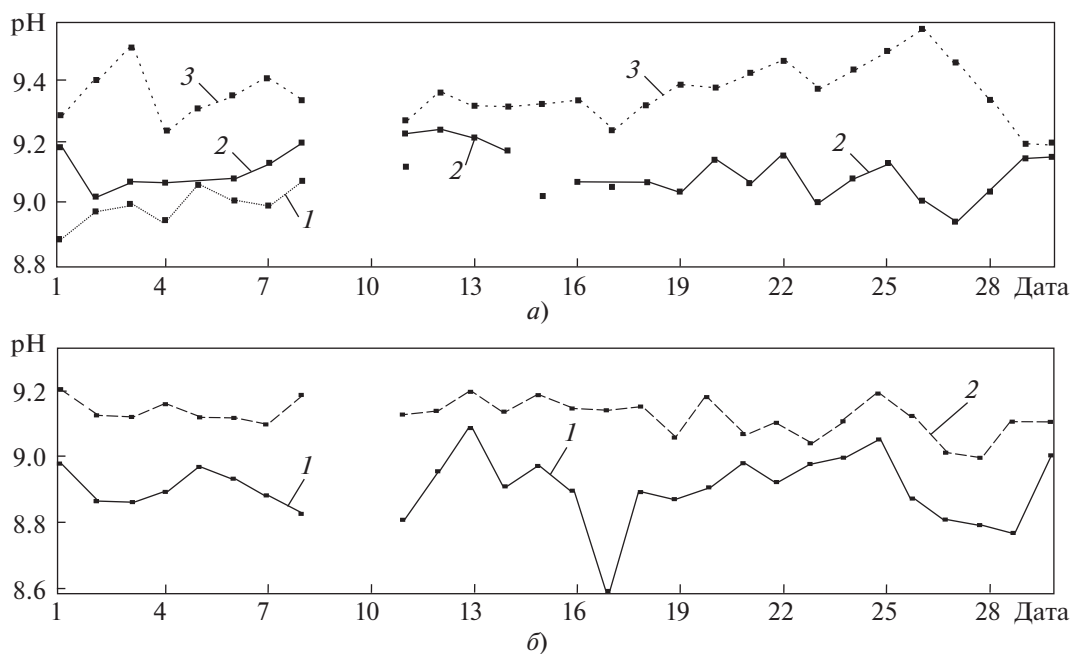
Полномасштабные испытания реагента ВТИАМИН КР-33 были выполнены на энергоблоке ПГУ-60. Организацию сопровождения водно-химического режима проводили при работе энергоблока с 14 марта до конца 2017 г. Аналитический контроль за показателями водно-химического режима осуществляли специалисты производственной химической аналитической лаборатории. При организации водно-химического режима реагент ВТИАМИН КР-33 дозировали от штатного узла, его расход должен был обеспечить нормируемые показатели водно-химического режима в контурах низкого (НД) и высокого (ВД) давлений согласно режимной карте (табл. 1).

Как видно из данных аналитического контроля за состоянием водно-химического режима в сентябре 2017 г., представленных на рис. 1, 2, значения

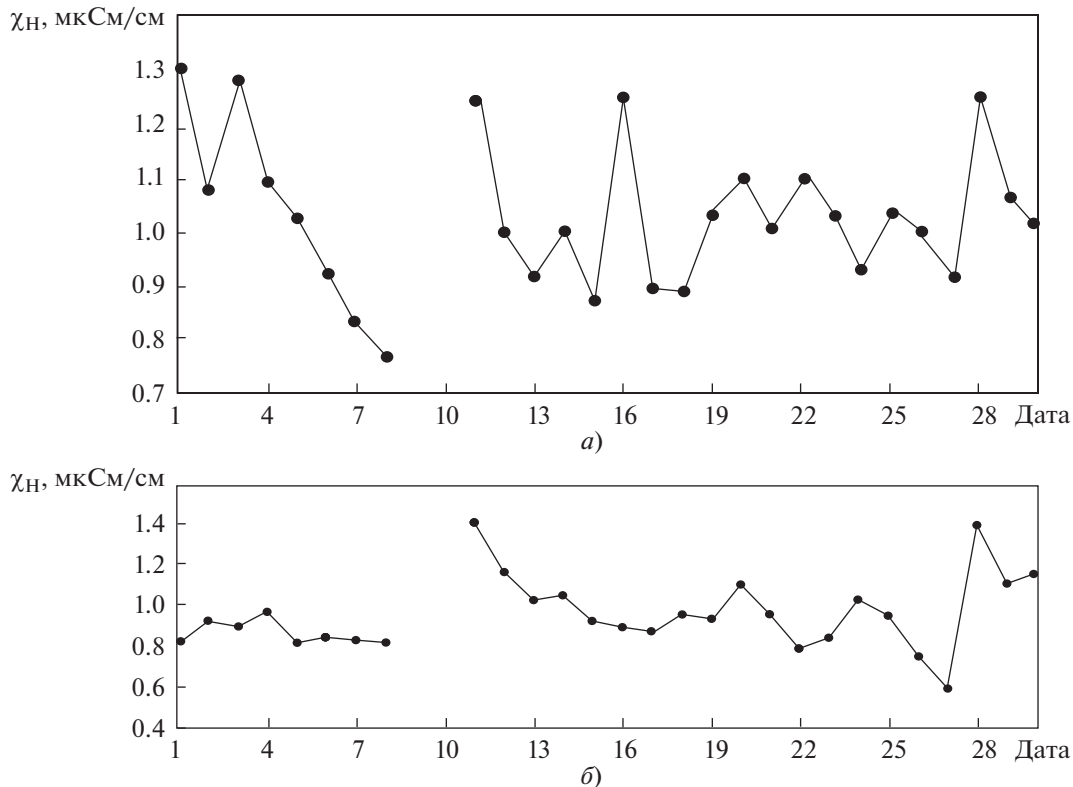
**Таблица 1.** Режимная карта водно-химического режима котла-утилизатора энергоблока ПГУ-60

Показатель	Поток теплоносителя	Значение
$D$ , т/ч	Контур НД	11.5
	Контур ВД	57.5
$H$ , мм (от среднего)	Контур НД	240
	Контур ВД	140
pH	Перегретый пар	Не менее 8.5
	Питательная вода перед котлом, котловая вода НД	9.1–9.5
	Котловая вода ВД	9.2–9.6
$C_{SiO_2}$ , мкг/дм <sup>3</sup>	Питательная вода	Не более 30
	Перегретый пар	Не более 15
$\chi_H$ , мкСм/см	Питательная вода, перегретый пар	Не более 1.0
$C_{ПОА}$ , мкг/дм <sup>3</sup>	Питательная вода	Не менее 20
	Котловая вода НД, ВД	Не менее 15
$p_H$ , %		0.5–1.0
$p_P$ , %		По результатам химического контроля

Примечание.  $D$  – паропроизводительность;  $H$  – уровень воды в барабане котла;  $C_{SiO_2}$  – кремнесодержание;  $\chi_H$  – удельная электрическая проводимость Н-катионированной пробы;  $C_{ПОА}$  – концентрация пленкообразующих аминов;  $p_H$ ,  $p_P$  – пропуск непрерывная и периодическая.



**Рис. 1.** Значение рН питательной воды низкого давления (1), котловой воды низкого (2) и высокого (3) давлений (а), насыщенного (4) и перегретого (5) пара высокого давления (б) на энергоблоке ПГУ-60 при дозировании реагента ВТИАМИН КР-33 в сентябре 2017 г.



**Рис. 2.** Удельная электрическая проводимость питательной воды низкого давления (а), перегретого пара высокого давления (б) на энергоблоке ПГУ-60 при дозировании реагента ВТИАМИН КР-33 в сентябре 2017 г.

показателей находятся в нормируемых пределах, установленных режимными картами и в [13].

В период ОПИ, в частности 5 сентября 2017 г., были получены следующие концентрации веществ, мкг/дм<sup>3</sup>:

В питательной воде НД:

$C_{Fe}$ .....	8.4
$C_{Cu}$ .....	5.0
$C_{ПОА}$ .....	72.9

В котловой воде НД  $C_{Fe}$ .....5.0

В перегретом паре ВД  $C_{ПОА}$ .....9.1

Во время останова энергоблока ПГУ-60 при визуальном осмотре барабанов низкого и высокого давлений котла-утилизатора было отмечено наличие на их внутренних поверхностях гидрофобной защитной пленки, которая обладает коррозионной стойкостью более 5 мин, что по шкале устойчивости соответствует характеристике “высшая”.

При применении импортных комплексных реагентов для коррекции ВХР систем оборотного охлаждения (СОО) на ТЭС России возникают дополнительные сложности, связанные с большими расходами циркуляционной воды, разным качеством подпиточной воды, а также с различными условиями сброса (использования) продувочной воды и коэффициентами упаривания. В настоящее время прошли промышленные испытания и получили высокую оценку отечественные комплексные реагенты марки ВТИАМИН для СОО конденсаторов паровых турбин ТЭЦ [4–6]. Состав реагентов подбирали, исходя из параметров эксплуатации каждого объекта, после проверки их эффективности в лабораторных и промышленных условиях. Основные инновационные разработки охраняются авторским правом Российской Федерации [16].

В [5] приводятся результаты исследований ВХР СОО ТЭЦ с ПГУ-450. В целях предотвращения накипеобразования на внутренних поверхностях конденсатора и теплообменного оборудования на ТЭЦ применяли коррекционную обработку теплоносителя с добавлением в него серной кислоты и дозированием оксиэтилидендифосфоновой кислоты (ОЭДФК). Высокая щелочность подпиточной воды обуславливала значительный расход серной кислоты (не менее 36 т/год) для снижения щелочности исходной воды. При этом наблюдались повышенная коррозия отдельных элементов системы оборотного охлаждения, а в продувочной воде – периодическое превышение значений показателей по некоторым веществам, в том числе производным серной кислоты, что влекло за собой штрафные санкции на ТЭЦ.

В результате стендовых испытаний была установлена оптимальная концентрация реагента

ВТИАМИН ЭКО-1 в циркуляционной воде, при которой скорость коррозии углеродистой стали снизилась в 3.7 раза, латуни в 1.4 раза, а скорость образования отложений – в 27.5 раза по сравнению с режимом безреагентной обработки. В июле–ноябре 2018 г. отмечалось присутствие органических фосфатов в подпиточной (речной) воде. При работе системы оборотного охлаждения с коэффициентом упаривания, равным 2.5, содержание фосфатов в оборотной воде увеличилось до 0.875 мг/дм<sup>3</sup>, при коэффициенте упаривания 3.0 – до 1.05 мг/дм<sup>3</sup>. В процессе эксплуатации системы оборотного охлаждения ТЭЦ с использованием ОЭДФК для коррекционной обработки воды содержание органических фосфатов возрастало до 1.43 мг/дм<sup>3</sup>, что превышает существующие нормативы. При проведении стендовых испытаний с подбором оптимальной дозировки реагента ВТИАМИН ЭКО-1 средняя концентрация органических фосфатов составила 1.1 мг/дм<sup>3</sup>.

Из полученных данных можно сделать вывод, что основными факторами, влияющими на качество продувочной (сточной) воды системы оборотного охлаждения, являются качество подпиточной воды и коэффициент упаривания, при котором работает система.

## ПОДГОТОВКА ДОБАВОЧНОЙ ВОДЫ

Модернизация ВПУ ТЭС обусловлена физическим износом традиционных ионообменных установок и производится обычно на базе мембранных технологий в условиях ужесточения требований к использованию реагентов и сбросу стоков электростанции, большую часть которых составляют стоки химических цехов. При использовании в качестве исходной природной маломинерализованной воды, качество которой характерно для значительной части водоисточников России, применение установок обратного осмоса (УОО) существенно повышает себестоимость обессоленной воды, не уменьшая объема сточных вод. В этих условиях требуются тщательный анализ состояния оборудования ВПУ, оценка возможности эффективного применения мембранных технологий и разработка рациональных технологических схем, обеспечивающих модернизацию ВПУ [12, 17, 18].

В данной работе на примере типовых водоподготовительных установок Костромской ГРЭС, Владимирской ТЭЦ-2, а также водоподготовительной установки Ивановских ПГУ проведено исследование эксплуатационных характеристик оборудования и предложены схемы комбинированных установок, обеспечивающих снижение расхода реагентов и существенное сокращение сброса солей со стоками [19]. Для анализа состояния ВПУ ТЭС была применена программа режимных испытаний

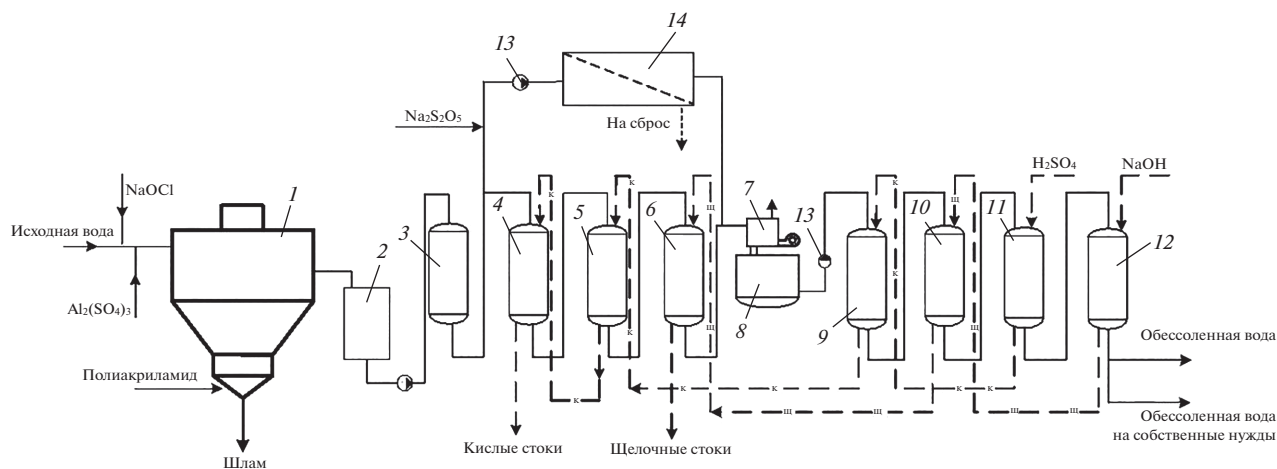


Рис. 3. Предлагаемая схема модернизации ВПУ подпитки котлов Костромской ГРЭС.

1 – осветлитель ВТИ-350; 2 – бак коагулированной воды; 3 – осветлительный фильтр; 4, 5 – Н-катионитные предвключенный и основной фильтры I ступени; 6, 10, 12 – анионитные фильтры I, II и III ступени; 7 – декарбонизатор; 8 – бак частично обессоленной воды; 9, 11 – Н-катионитные фильтры II и III ступени; 13 – насос; 14 – установка обратного осмоса; - - к - - к – регенерационный раствор кислоты; - - щ - - щ – регенерационный раствор щелочи

действующего оборудования водоподготовительной установки, разработанная во Всероссийском теплотехническом институте (ВТИ). Такую работу проводили сотрудники ВТИ и Ивановского государственного энергетического университета в 2012–2014 гг. [12]. Проведение подобных испытаний в 2018–2020 гг. позволило выполнить сравнительную оценку работоспособности действующего оборудования на сегодняшний день.

На основании исследований для Костромской ГРЭС была предложена схема модернизации ВПУ, которая включает в себя очистку коагулированной воды на УОО номинальной производительностью 60 м<sup>3</sup>/ч и I ступени блока фильтров с последующей доочисткой пермеата и фильтрата на второй и третьей ступенях химического обессоливания производительностью 110–120 м<sup>3</sup>/ч (рис. 3). Такое решение обусловлено тем, что при физическом износе оборудования и ионитов I ступени II и III ступени водообработки находятся в хорошем состоянии и способны работать при существующей и, при необходимости, повышенной нагрузках.

При технологическом расчете схемы ВПУ были определены следующие основные показатели [19]:

Коэффициент собственных нужд, %	.....23.8
Расход, кг/сут:	
коагулянта	.....561
гипохлорида натрия NaOCl	.....3.6
серной кислоты H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	.....581
едкого натра NaOH	.....409
Удельный сброс минеральных солей, г/м <sup>3</sup>	...461
Коэффициент экологичности, г/г	.....1.86

Анализ результатов расчета показывает, что при непрерывной работе предлагаемой ВПУ производительностью 120 м<sup>3</sup>/ч по сравнению с действующей схемой:

расход кислоты и щелочи на получение обессоленной воды высокого качества уменьшится в 2 раза и существенно сократится сброс солей со стоками;

повысится надежность работы ВПУ в целом при выработке обессоленной воды для покрытия текущей потребности Костромской ГРЭС.

На Владимирской ТЭЦ-2 эксплуатируются три ВПУ для подпитки барабанных котлов, автономно работающих по следующим схемам:

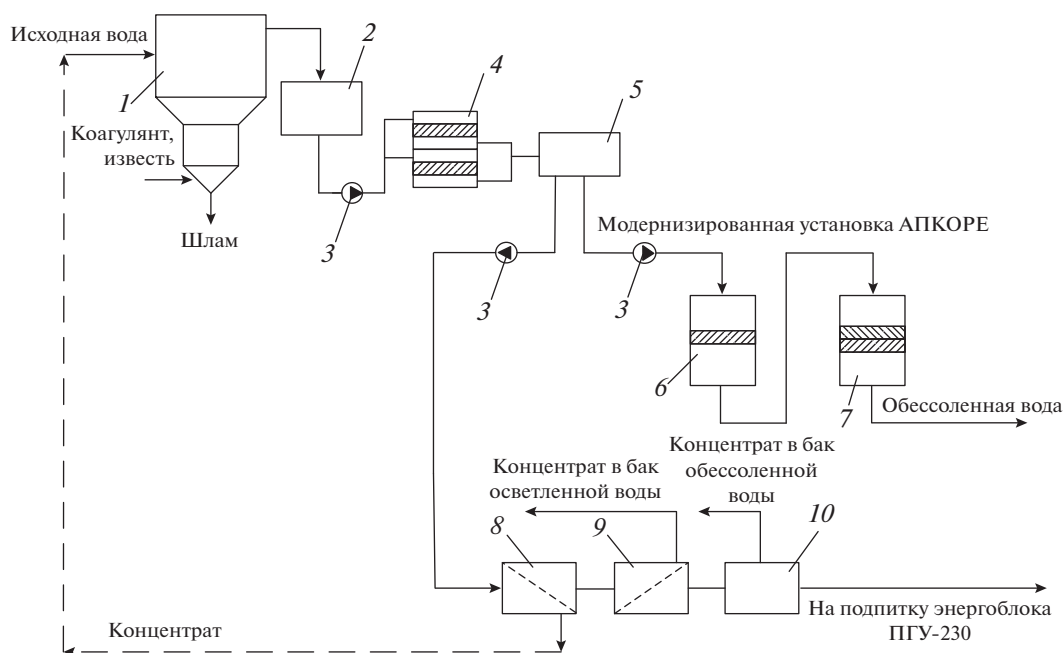
двухступенчатая схема химического обессоливания воды (ХОВ) с прямоточными ионитными фильтрами;

установка химического обессоливания с противоточной технологией АПКОРЕ;

водоподготовительная установка глубокого обессоливания воды на основе мембранных методов для ПГУ-230.

Анализ работы ионитных фильтров установки двухступенчатого химического обессоливания в 2018 г., по сравнению с данными 2014 г., показал, что объем обработанной воды за полугодие 2018 г. уменьшился почти в 4.0 раза (от 879 793 до 224 830 м<sup>3</sup>). При этом общий объем выработанной воды на электростанции снизился в 4.2 раза. Удельный расход реагентов для каждой установки за 2014 и 2018 гг. представлен в табл. 2.

Из данных табл. 2 видно, что расход H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и NaOH на установке АПКОРЕ больше, чем на двухступенчатой установке ХОВ, что свидетельствует о ее неэффективной эксплуатации при ре-



**Рис. 4.** Схема модернизации ВПУ Владимирской ТЭЦ-2.

1 – осветлитель; 2 – бак известкованной и коагулированной воды; 3 – насос; 4 – осветлительный фильтр; 5 – бак осветленной воды; 6, 7 – фильтры катионитный и анионитный с противоточной регенерацией; 8, 9 – установка обратного осмоса I и II ступени; 10 – установка электродеионизации

жиге с малой производительностью. Удельные расходы реагентов на ВПУ для ПГУ-230 в 2018 г. существенно увеличились по сравнению с 2014 г., а это означает что необходимо провести замену мембранных элементов. Поэтому было решено отказаться от работы установки по противоточной технологии.

При работе установки химического обессоливания воды образуются кислые и щелочные стоки, а при эксплуатации мембранной технологии – концентрат и стоки химических очисток. В 2014 г. суммарные стоки мембранной установки были больше суммарных стоков установок ХОВ и АПКОРЕ. Аналогичная ситуация наблюдалась и в 2018 г. Стоки ВПУ для ПГУ-230 в 2018 г. возросли до 50% производительности, тогда как в 2014 г. составляли примерно 16%.

Представленные материалы характеризуют работу ВПУ конкретной ТЭЦ в условиях снижения потребности в обессоленной воде, однако показы-

вают и недостаточную маневренность трех отдельных установок в данных условиях, в результате чего теряются преимущества новых установок. Такая ситуация может наблюдаться и на других ТЭЦ.

В целях совершенствования технологии очистки воды можно предложить схему модернизации ВПУ Владимирской ТЭЦ-2, показанную на рис. 4. Установка противоточного ионирования АПКОРЕ в настоящее время имеет неудовлетворительные показатели работы и требует капитального ремонта. Необходим подбор ионитов, рекомендованных для противоточного ионирования.

Водоподготовительная установка для ПГУ-230 обеспечивает получение воды высокого качества, но имеет малую производительность и большой объем стоков. Повышение производительности до 50 м<sup>3</sup>/ч не обеспечит потребность всей ТЭЦ-2 в обессоленной воде, но увеличит объем стоков. Целесообразно использовать УОО для восполнения потерь воды и пара на ПГУ-230. Избыток глу-

**Таблица 2.** Удельный расход реагентов, г/м<sup>3</sup> обессоленной воды, на ВПУ Владимирской ТЭЦ-2

ВПУ	2014 г.		2018 г.	
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	NaOH	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	NaOH
Двухступенчатая установка ХОВ	73.6	123.9	387.8	325.7
Установка АПКОРЕ	147.0	220.5	Не эксплуатировалась	
ВПУ для ПГУ-230	13.9	0.002	70.1	0.0091

**Таблица 3.** Показатели качества обрабатываемой воды на водоподготовительной установке Ивановских ПГУ в период испытаний (03.04.2019–11.12.2019)

Контролируемый показатель	Точка отбора пробы					
	исходная вода	осветленная вода	NaR (выход)	ФОП (выход)	УОО (пермеат)	ФСД (выход)
Ж <sub>о</sub> , мкг-экв/дм <sup>3</sup>	3200–5000	–	2–10	2–10	0.2	Менее 0.2
Щ <sub>о</sub> , мкг-экв/дм <sup>3</sup>	2800–4250	1700–3350	–	–	112–140	2–4
pH	7.4–7.8	6.6–7.0	7.0–7.2	7.1–7.3	5.8–6.1	6.7–7.4
Концентрация, мкг/дм <sup>3</sup> :						
Na <sup>+</sup>	1800–6400	–	20000–64200	20000–64200	120–181	0.1–0.15
SiO <sub>2</sub>	2050–2800	1680–1920	–	–	54–120	Менее 5.0
Fe	922–6974	340–500	202–258	155–196	40–45	23–27
Cl <sup>-</sup>	17.2–18.7	–	–	8.2–13.8	–	–
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	16.2–16.4	38.8–48.6	–	–	–	–
Окисляемость, мг О/дм <sup>3</sup>	12.8–16.4	6.8–8.6	6.7	1.5–2.1	–	–

Примечание. Ж<sub>о</sub> – жесткость общая; Щ<sub>о</sub> – щелочность общая.

боко обессоленной воды может быть направлен в бак запаса конденсата или в бак химически обессоленной воды. Утилизация стоков возможна в рамках комбинированной установки водоподготовки.

Таким образом, предложенный вариант модернизации установки водоподготовки Владимирской ТЭЦ-2 позволит повысить эксплуатационную надежность и экологические показатели электростанции на основе существующих на данный момент на ТЭЦ ВПУ.

Проектная схема глубокого обессоливания добавочной воды Ивановских ПГУ включает в себя следующие стадии обработки:

предварительную очистку исходной воды в осветлителях и осветлительных фильтрах;

умягчение осветленной воды в Na-катионитных фильтрах (NaR);

удаление железоорганических примесей из умягченной воды в фильтрах-органопоглотителях (ФОП);

обессоливание на установках обратного осмоса;

глубокое дообессоливание воды в фильтрах смешанного действия (ФСД).

Качество исходной (природной) воды характеризуется высоким содержанием железоорганических соединений при средней жесткости и отличается значительными сезонными изменениями (табл. 3).

Ввиду частых и длительных остановов энергоблока № 1 ПГУ-325, а затем и энергоблока № 2 и неустойчивой работы водоподготовительной установки в 2009–2012 гг., при участии авторов была

проведена реконструкция ВПУ путем перевода установки предварительной очистки воды в режим коагуляции сернокислым алюминием, последовательного включения Na-катионитных фильтров и двух установок обратного осмоса, доукомплектования схемы одной ступенью H–ОН-ионирования в качестве резерва обессоливающей части с выбором ионитов для обработки воды, характеризующейся высоким содержанием железоорганических веществ (рис. 5) [20].

Наладка режима коагуляции в осветлителе ВТИ-100И и рабочего режима в других аппаратах ВПУ при замене элементов УОО каждые три года позволила организовать работу при показателях качества воды по ступеням, приведенных в табл. 3, без включения резервной группы H–ОН-ионирования. Однако при этом себестоимость обессоленной воды, рассчитанная по данным на 2012 г., составила около 300 руб/м<sup>3</sup>, а в 2019 г. она стала существенно выше.

По данным отчета ВТИ по обследованию ВПУ ТЭС “ИнтерРАО-Электрогенерация” водоподготовительные установки с УОО имеют самую малую производительность при самой высокой себестоимости обессоленной воды [12].

## ХИМИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Нормы качества теплоносителя [13, 14] предполагают организацию лабораторного химического контроля (ЛХК) и автоматического (стендового) химического контроля (АХК). Если ЛХК осуществляется путем анализа широкого спектра показателей отдельных охлажденных проб воды и

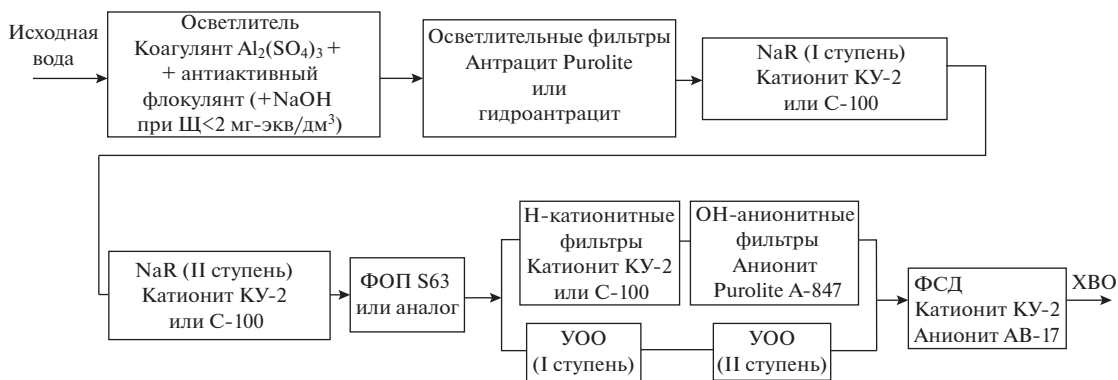


Рис. 5. Принципиальная схема модернизации ВПУ ПГУ-325

конденсата пара, включая измерения на лабораторных приборах, в том числе таких высокоорганизованных, как ионные жидкостные хроматографы, то АХК выполняется измерениями в непрерывном потоке охлажденного теплоносителя некоторых физико-химических показателей, основными из которых являются удельная электрическая проводимость и рН. Такие измерения обеспечивают оперативный химический контроль суммарного содержания солей, кислот и оснований и нормируются практически во всех потоках воды и пара на ТЭС [14]. Надежность и доступность этих измерений, возможность измерять в одном потоке удельную электрическую проводимость прямой  $\chi$  и Н-катионированной  $\chi_N$  пробы позволяют рассчитать общее солесодержание и концентрации отдельных примесей, таких как аммиак или органические амины – в питательной воде, фосфаты или гидраты при фосфатном (гидратном) режиме – в котловой воде, натрий, хло-

риды (условные), аммиак и уголекислота – в паре [11, 21, 22].

Для этой цели предназначен анализатор примесей конденсата и питательной воды “Лидер-АПК”, разработанный при участии авторов в ООО “Техноприбор” (Москва). Принцип его работы основан на измерении удельной электрической проводимости прямой и Н-катионированной проб с последующим расчетом рН и концентрации аммиака  $C_{NH_3}$ , а также условных концентраций натрия  $C_{Na}^{ycl}$  и хлоридов  $C_{Cl}^{ycl}$  (табл. 4). Анализатор “Лидер-АПК” удостоен золотой медали Международного инновационного салона в Женеве в 2017 г., проверен разработчиками на Петрозаводской ТЭЦ, Костромской ГРЭС и Калининской АЭС и реализован в эксплуатации на Смоленской ГРЭС. Принципиальная схема и внешний вид анализатора показаны на рис. 6, 7.

Промышленные испытания показали, что измеренные анализатором “Лидер-АПК” значения рН отличаются от результатов измерений стационарными рН-метрами в пределах 0.05–0.10 рН, что можно считать вполне приемлемым. Расчетные концентрации аммиака, полученные по программе “Лидер-АПК”, соответствуют результатам измерений системой химико-технологического мониторинга Петрозаводской ТЭЦ с отклонением в пределах 5%. Однако на Костромской ГРЭС имеются существенные различия, связанные, вероятно, с тем, что ее СХТМ не учитывает содержание минеральных примесей, что для сверхчистой воды делать необходимо. Достаточно высокие концентрации натрия обусловлены тем, что этот показатель носит интегральный характер – концентрации катионов в питательной воде суммируются.

Возможность использования анализатора “Лидер-АПК” для контроля концентрации аммиака, этаноламина (ЭТА) и их смеси, приготовленных на обессоленной воде ( $\chi_{H_2O} < 0.1$  мкСм/см), проверяли в лабораторных условиях на мембранно-ионообменном стенде (табл. 5).

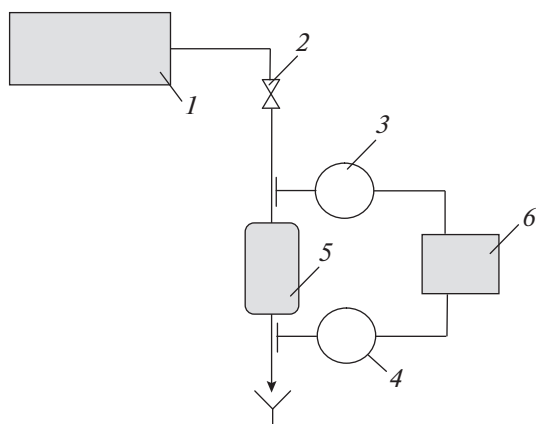


Рис. 6. Принципиальная схема анализатора “Лидер-АПК”.

1 – устройство подготовки пробы; 2 – регулирующий клапан; 3, 4 – датчики измерения удельной электрической проводимости и температуры; 5 – Н-катионитный фильтр; 6 – блок обработки и вывода информации



**Таблица 4.** Данные измерений показателей качества питательной воды и обессоленной добавочной воды системой мониторинга ТЭС и анализатором “Лидер-АПК”

Объект	Система мониторинга ТЭС				Анализатор “Лидер-АПК”					
					$\chi$ , мкСм/см	$\chi_{\text{Н}}$ , мкСм/см	рН	концентрация, мкг/дм <sup>3</sup>		
	$C_{\text{NH}_3}$	$C_{\text{Na}^+}^{\text{усл}}$	$C_{\text{Cl}^-}^{\text{усл}}$							
Петрозаводская ТЭЦ	4.070	0.205	9.11	501	4.09	0.222	9.17	492	8.4	12
	4.100	0.144	9.15	495	4.13	0.238	9.17	499	9.0	13
	3.810	0.150	9.11	451	3.82	0.256	9.14	445	9.7	14
	0.559*	—	8.28*	—	0.557*	0.134*	8.31*	—	57*	8*
Костромская ГРЭС	0.692	0.106	8.00	81	0.689	0.183	7.98	50	6.8	10
	0.702	0.105	7.98	83	0.696	0.163	8.00	51	6.0	9
	0.698	0.102	7.97	83	0.692	0.161	8.00	50	5.6	8
	0.220*	—	6.51*	—	0.218*	0.388*	6.55*	—	32*	33*

\* Показатели качества обессоленной воды.

**Таблица 5.** Расчетные значения рН и концентрации модельных растворов, полученные по результатам измерения удельной электрической проводимости анализатором “Лидер-АПК”

Модельный раствор	Концентрация модельного раствора		$\chi$ , мкСм/см	$\chi_{\text{Н}}$ , мкСм/см	Расчет по программе “Лидер-АПК”		
	мкг/дм <sup>3</sup>	мкмоль/дм <sup>3</sup>			рН	мкг/дм <sup>3</sup>	мкмоль/дм <sup>3</sup>
NH <sub>3</sub>	305	17.9	2.85	0.308	8.96	301	17.7
	610	35.9	4.52	0.363	9.22	571	33.6
ЭТА	517	8.48	1.64	0.325	8.75	524	8.59
	1034	17.0	2.87	0.342	8.95	1087	17.8
	4136	67.8	7.13	0.409	9.42	4194	68.8
NH <sub>3</sub> + ЭТА	732 + 413	49.8	5.48	0.377	9.25	770*	45.6
	1472 + 1664	113.9	9.98	0.398	9.58	1952*	114.8

\* В пересчете на концентрацию NH<sub>3</sub>.

Из табл. 5 следует, что в монорастворах аммиака и этаноламина и в их смеси возможно косвенное (расчетное) определение их концентраций (для раствора смеси NH<sub>3</sub> + ЭТА в пересчете на концентрацию аммиака) по результатам измерения удельной электрической проводимости прямой и Н-катионированной проб с погрешностью менее 10%, что можно считать приемлемым для условий оперативного химического контроля.

В табл. 6 представлены результаты химических анализов качества теплоносителя II контура энергоблока № 3 Калининской АЭС по данным химического цеха и расчета по программе “Лидер-АПК”. Из табл. 6 следует, что расчет по программе “Лидер-АПК” дает значения рН, в среднем не отличающиеся от данных химического цеха

АЭС более чем на 0.06, т.е. в пределах паспортной погрешности измерений рН-метра.

Таким образом, анализатор “Лидер-АПК” или ему подобные автоматические анализаторы могут использоваться для автоматического (оперативного) химического контроля качества водных и паровых потоков по данным измерения  $\chi$  и  $\chi_{\text{Н}}$  с расчетом рН и концентрации примесей в теплоносителе. Существенным преимуществом анализатора “Лидер-АПК” по сравнению с импортными аналогами является использование преобразованной математической модели ионных равновесий в анализируемых потоках водного теплоносителя, обеспечивающей расчет рН и концентраций ионных примесей в присутствии подщелачивающего агента (аммиака) и при его отсутствии.

**Таблица 6.** Результаты химических анализов и расчетов по программе “Лидер АПК” в точках контроля теплоносителя II контура энергоблока № 3 Калининской АЭС

Точка контроля	Данные химического цеха				Расчет по программе “Лидер-АПК”	
	$\chi$ , мкСм/см	$\chi_N$ , мкСм/см	рН	$C_{ЭТА + NH_3}$ , мкг/дм <sup>3</sup>	рН	$C_{ЭТА + NH_3}$ , мкг/дм <sup>3</sup>
КЭН-1	1.73	0.29	8.72	125	8.78	168
КЭН-2	1.06	0.28	8.59	151	8.55	96
ПНД-5	2.87	0.35	9.08	357	9.01	322
ПВД	3.18	0.27	9.08	376	9.06	368
Пар ПГ-2	4.68	0.40	9.15	562	9.22	638
Котловая вода ПГ-1 с/о	7.80	0.82	9.58	1452	9.44	1408
Сепарат СПП	8.06	1.01	9.52	1432	9.45	1490
Концентрат СПП	2.99	0.28	9.03	320	9.03	338

Примечание. КЭН – конденсатный электронасос; ПНД – подогреватель низкого давления; ПВД – подогреватель высокого давления; ПГ – парогенератор; с/о – солевой отсека; СПП – сепаратор-пароперегреватель.

**Рис. 7.** Внешний вид анализатора примесей “Лидер-АПК”

## ВЫВОДЫ

1. ТЭЦ нового поколения – это, как правило, тепловые электростанции, содержащие как традиционное оборудование (паровые котлы, турбины и вспомогательные системы), так и новые энергоблоки с парогазовыми установками.

2. Модернизация теплоэнергетического оборудования и режимов его эксплуатации должна базироваться на импортозамещающих решениях с учетом существующих технологических связей и положительного опыта в условиях России.

3. В части водно-химических режимов и систем их обеспечения в ближайшей перспективе можно рекомендовать следующие направления модернизации:

разработку отраслевых нормативных документов, регламентирующих правила технической эксплуатации установленного теплоэнергетического оборудования и учитывающих передовой опыт ведения ВХР на основе органических реагентов;

разработку и использование отечественных комплексных реагентов на основе органических аминов для обеспечения норм качества водного теплоносителя как для основного пароводяного тракта, так и для вспомогательных систем, таких как система охлаждения конденсаторов паровых турбин;

создание комбинированных схем подготовки добавочной воды на базе химического и мембранного обессоливания, обеспечивающих получение воды нормативного качества при минимизации эксплуатационных затрат и объема сточных вод;

создание цифровых систем химико-технологического мониторинга качества водного теплоносителя на базе отечественных разработок, позволяющих осуществлять оперативный контроль и управление водно-химическими режимами основного и вспомогательных контуров электростанции.

4. Представленные в статье научно-практические разработки авторов направлены на решение поставленных задач и апробированы в условиях действующих электростанций России.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Филипов С.П., Дильман М.Д.** ТЭЦ в России: необходимость технологического обновления // Теплоэнергетика. 2018. № 11. С. 5–22. <https://doi.org/10.1134/S0040363618110024>
2. **Богачев А.Ф., Радин Ю.А., Герасименко О.Б.** Особенности эксплуатации и повреждаемость котлов-утилизаторов бинарных парогазовых установок. М.: Энергоатомиздат, 2008.
3. **Петрова Т.И., Орлов К.А., Дули Р.Б.** Международные нормы качества воды и пара на тепловых электростанциях при аммиачных водно-химических режимах // Теплоэнергетика. 2016. № 12. С. 68–74. <https://doi.org/10.1134/S0040363616100088>
4. **Комплексные реагенты на основе аминов / С.Ю. Суслов, А.В. Кирилина, И.А. Сергеев, Т.В. Зезюля, Е.А. Соколова, Е.В. Еремина, Н.В. Тимофеев** // Теплоэнергетика. 2017. № 3. С. 92–96. <https://doi.org/10.1134/S0040363617030067>
5. **Разработка водного режима системы оборотного охлаждения ТЭС на основе реагента “ВТИАМИН ЭКО-1” / А.В. Кирилина, С.Ю. Суслов, В.В. Козловский, А.Б. Ларин** // Теплоэнергетика. 2019. № 10. С. 74–83. <https://doi.org/10.1134/S0040363619100023>
6. **Суслов С.Ю., Кирилина А.В.** О выборе реагентов при ведении аминных режимов // Энергетик. 2011. № 1. С. 39–44.
7. **Применение АМИНАТ ТМ ПК-2 при организации водно-химического режима Закамской ТЭЦ-5 / Л.Г. Васина, А.В. Богловский, С.В. Сидорова, О.В. Гусева** // Новое в российской электроэнергетике. 2009. № 5. С. 31–42.
8. **Гусева О.В., Бутакова М.В.** Результаты внедрения комбинированного водно-химического режима паровых котлов с использованием реагента АМИНАТ ТМ ПК-2 // Новое в российской электроэнергетике. 2020. № 4. С. 12–20.
9. **Тяпков В.Ф., Ерпылева С.В., Быкова В.В.** Внедрение водно-химического режима на АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика. 2009. № 5. С. 13–19.
10. **Гусева О.В., Богловский А.В., Сипилина Е.А.** Разработка и исследование композиций на основе нейтрализующих аминов для ограничения коррозии конденсатно-питательного тракта ТЭС // Новое в российской электроэнергетике. 2012. № 2. С. 42–53.
11. **Ларин А.Б., Ларин Б.М.** Совершенствование химического контроля водно-химического режима ТЭС на основе измерений удельной электрической проводимости и pH // Теплоэнергетика. 2016. № 5. С. 70–74. <https://doi.org/10.1134/S004036361603005X>
12. **Ларин Б.М., Юрчевский Е.Б.** Проблемы реализации ионообменных и мембранных технологий обработки воды в энергетике // Теплоэнергетика. 2019. № 10. С. 66–73. <https://doi.org/10.1134/S0040363619100035>
13. **Правила** технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. М.: СПО ОРГРЭС, 2003.
14. **СТО 70238424.27.100.013-2009.** Водоподготовительные установки и водно-химический режим ТЭС. Условие создания. Нормы и требования. М.: НП “ИнВЭЛ”, 2009.
15. **Опытно-промышленные** испытания по коррекционной обработке хеламином пароводяного тракта барабанного котла (10 МПа) / А.Ф. Богачев, Р.К. Маврицкая, В.Я. Кыштымов, Л.М. Ананьева, А.Б. Ремезенцев // Теплоэнергетика. 2002. № 7. С. 30–35.
16. **Пат. РФ № 2693243, С23F 11/167, С23F 14/02.** Ингибитор коррозии и накипеобразования для обработки воды теплосетей и других теплофикационных систем / С.Ю. Суслов, В.И. Козловский, В.В. Козловский. Заявка № 2019103540. Оpubл. 2019 г.
17. **Методологические** подходы к проведению пилотных и тестовых испытаний на установках обратного осмоса: результаты сравнительных исследований / А.А. Пантелеев, В.В. Бобинкин, С.Ю. Ларионов, Б.Е. Рязчиков, В.Б. Смирнов, Д.А. Шаповалов // Теплоэнергетика. 2017. № 10. С. 92–98. <https://doi.org/10.1134/S0040363617100095>
18. **Юрчевский Е.Б., Солянкин В.В.** Расчетно-экспериментальное обоснование схем утилизации концентрата, образующегося в цикле обратноосмотических установок // Теплоэнергетика. 2018. № 7. С. 92–98. <https://doi.org/10.1134/S0040363618070093>
19. **Модернизация** типовой водоподготовительной установки ТЭС / Б.М. Ларин, Е.Н. Бушуев, Н.А. Еремина, М.Э. Колодяжная // Электрические станции. 2020. № 11. С. 2–8.
20. **Совершенствование** технологии обработки воды с высоким содержанием железо-органических примесей для энергоблока Ивановских ПГУ / А.Б. Ларин, Б.М. Ларин, А.Н. Коротков, М.Ю. Опарин // Вестник ИГЭУ. 2009. Вып. 2. С. 51–56.
21. **Ларин А.Б., Ларин Б.М., Бушуев Е.Н.** Определение концентрации солевых компонентов в котловой воде по изменению удельной электрической проводимости и pH // Теплоэнергетика. 2019. № 8. С. 70–74. <https://doi.org/10.1134/S0040363619080058>
22. **Пат. РФ № 2573453, G01N 21/27, G01N 33/18.** Способ определения pH малобufferных предельно разбавленных растворов типа конденсата / Б.М. Ларин, А.Б. Ларин, А.Я. Сорокина, С.В. Киет. Заявка № 2014133634/28. Оpubл. 2016 г.

## The New Generation of CHP Plants: Water Chemistry and Its Support Systems

A. B. Larin<sup>a, \*</sup>, B. M. Larin<sup>a</sup>, A. V. Kirillina<sup>b</sup>, S. Yu. Suslov<sup>b</sup>, E. F. Nartya<sup>b</sup>, and V. V. Kozlovskii<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, 153003 Russia

<sup>b</sup> ООО Водные Технологии Инжиниринг, Moscow, 115280 Russia

\*e-mail: yaandy\_81@mail.ru

**Abstract**—The quality of the coolant at combined heat and power plants (CHPPs) can be improved by upgrading the water chemistry and its support systems. In the context of this problem, we should analyze the experience gained in operating the equipment, determine the advantages and disadvantages of the employed technologies and apparatuses, and propose promising solutions with the maximum use of reliable and environmentally friendly materials and process developments. A new water chemistry based on amine-containing reagents has been mastered at Russian CHPPs. The paper presents examples of the use of domestic complex reagents under the VTIAMIN brand, which differ from imported equivalents in composition and have been tested in actual applications at CHPPs, in implementing the proper water chemistry in the main and auxiliary coolant circuits. Membrane-based water treatment plants (WTPs) are used at CHPPs together with conventional WTPs. The results of the inspection of several WTPs at CHPPs are presented, and schemes combining ion-exchange and membrane processes are proposed to decrease the consumption of reagents and reduce the amount of effluents with a high process reliability of the equipment. Promising information technologies are widely applied at CHPPs. The potential is demonstrated for developing digital systems for chemical-process monitoring of the water chemistry based on the new generation of Russian-made analyzers.

**Keywords:** CHPP modernization, amine-based water chemistry, promising water treatment, chemical monitoring of water heat carrier, monitoring system of a new generation