

ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА НА ОСНОВЕ АМИНОСОДЕРЖАЩИХ РЕАГЕНТОВ ДЛЯ КОТЛОВ ПГУ

© 2023 г. Б. М. Ларин^{а, *}, С. Ю. Суслов^б, А. В. Кирилина^б, В. В. Козловский^б, А. А. Зидиханова^б

^аИвановский государственный энергетический университет,
Рабфаковская ул., д. 34, г. Иваново, 153003 Россия

^бООО «Водные технологии», Автозаводская ул., д. 14, Москва, 115280 Россия

*e-mail: info@wteng.ru

Поступила в редакцию 01.11.2022 г.

После доработки 08.12.2022 г.

Принята к публикации 23.12.2022 г.

В последнее десятилетие на теплоэлектростанциях России и Западной Европы широко применяется водный режим паровых котлов и котлов-утилизаторов (КУ) парогазовых установок (ПГУ) с дозированием в теплоноситель полиаминов. Водный режим с комплексными реагентами торговых марок Helamin и Cetamin стал вытеснять традиционный гидразинно-аммиачный. Однако из-за высокой стоимости и неопределенности компонентного состава импортных реагентов возникла необходимость создать отечественные аналоги. Таковыми стали комплексные реагенты марки ВТИАМИН, в частности ВТИАМИН КР-33. Благодаря подбору концентраций индивидуальных компонентов в составе комплексного реагента стало возможным разрыхлять и удалять с поверхностей нагрева теплообменного оборудования ранее образовавшиеся отложения, значительно уменьшать скорость образования новых отложений, а следовательно, и скорость коррозии поверхностей теплообмена. В статье представлены результаты опытно-промышленных испытаний реагента ВТИАМИН КР-33 на котлах-утилизаторах энергоблоков с ПГУ при использовании разных тепловых схем. Эти испытания проводились с целью решить различные технологические задачи в рамках реализации программы импортозамещения полиаминной технологии водно-химического режима. Во время проведения опытно-промышленных испытаний на энергоблоках с ПГУ мощностью 110 МВт было установлено, что возможно совместное использование реагентов ВТИАМИН КР-33 и ВТИАМИН Д-2 для снижения скорости коррозии медьсодержащих сплавов и стабилизации содержания меди по пароводяному тракту энергоблоков. Выявлено повышенное содержание углекислоты в паре, вызывающее нарушение норм качества пара по показателю удельной электрической проводимости Н-катионированной пробы. Проведено сравнение тепловых схем с последовательным питанием (ПГУ мощностью 110 МВт) и параллельным питанием (ПГУ 450 МВт) барабанов низкого (БНД) и высокого (БВД) давления. Показано, что причиной нарушения водно-химического режима при большом содержании углекислоты в тракте энергоблока с ПГУ 110 МВт является неэффективная работа деаэратора, встроенного в конструкцию БНД.

Ключевые слова: паровые энергетические котлы, котлы-утилизаторы, парогазовые установки, полиаминный водно-химический режим, углекислота, опытно-промышленные испытания, медьсодержащие сплавы, комплексные органические реагенты

DOI: 10.56304/S0040363623060061

Водно-химический режим (ВХР) паровых котлов ТЭС и котлов-утилизаторов ПГУ часто организован с использованием аминсодержащих реагентов. Применять такой ВХР стали в XXI в. вместе с получившими широкое распространение энергоблоками с парогазовыми установками, для чего необходимо было определенное технологическое обоснование [1]. Как и оборудование ПГУ, водно-химический режим базировался на зарубежных технологиях с использованием комплексных реагентов марок Helamin (BRW-150H,

906H), Cetamine V211 и др. [2, 3]. Со временем комплексные органические реагенты стали применяться и на традиционных паровых барабанных котлах. Преимущества аминсодержащих реагентов, связанные с образованием защитной пленки на поверхностях теплообмена и поддержанием щелочной реакции среды, не всегда использовались в полной мере вследствие особенностей тепловых схем, конструкции котлов и качества добавочной и питательной воды [4, 5]. За последние 15 лет были сформулированы требова-

ния к аминокислотам реагентам, положенные в основу нормативных документов [6, 7].

В настоящее время наблюдается новый этап в освоении водных режимов с дозированием аминокислотных веществ, связанный прежде всего с разработкой отечественных комплексных реагентов на основе аминов и поиском условий их наилучшего использования [8, 9]. Некоторые результаты таких исследований приведены в данной статье.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ВХР С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ПИТАНИЕМ КОНТУРОВ НИЗКОГО И ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ПГУ

На тепловых электростанциях с энергоблоками ПГУ широкое применение получили двухконтурные схемы с последовательным (рис. 1) или параллельным (рис. 2) питанием водой контура низкого (НД) и высокого (ВД) давления. Деаэрация воды в схемах ПГУ с последовательным питанием осуществляется в деаэрационной колонке, установленной на барабаны низкого давления. Такое решение упрощает тепловую схему, но усложняет регу-

лирование расхода выпара деаэратора. При снижении расхода выпара ухудшается эффект деаэрации, прежде всего по удалению из воды углекислоты в свободной форме, что приводит к выносу ее в пар уже из барабана контура высокого давления. В этом случае ухудшается качество пара и часто выходит за нормативный предел такой показатель, как удельная электрическая проводимость Н-катионированной пробы (УЭП_Н).

Исследования ВХР на энергоблоках ТЭС с ПГУ 110 МВт (ст. № 1–4) с последовательным питанием контуров НД и ВД выполнялись авторами с октября 2019 по май 2022 г., чтобы провести замену импортного реагента Helamin на отечественный ВТИАМИН КР-33. Этот реагент открывает цепочку комплексных реагентов, разрабатываемых ООО «Водные технологии» (Москва), для обработки питательной и котловой воды в целях предотвращения образования накипи и защиты от коррозии поверхностей нагрева [10]. Как и импортные реагенты марки Helamin, ВТИАМИН КР-33 содержит такие индивидуальные амины, как моноэтаноламин, морфолин, циклогексанамин, с малыми добавками других аминокислотных веществ. Концентрации инди-

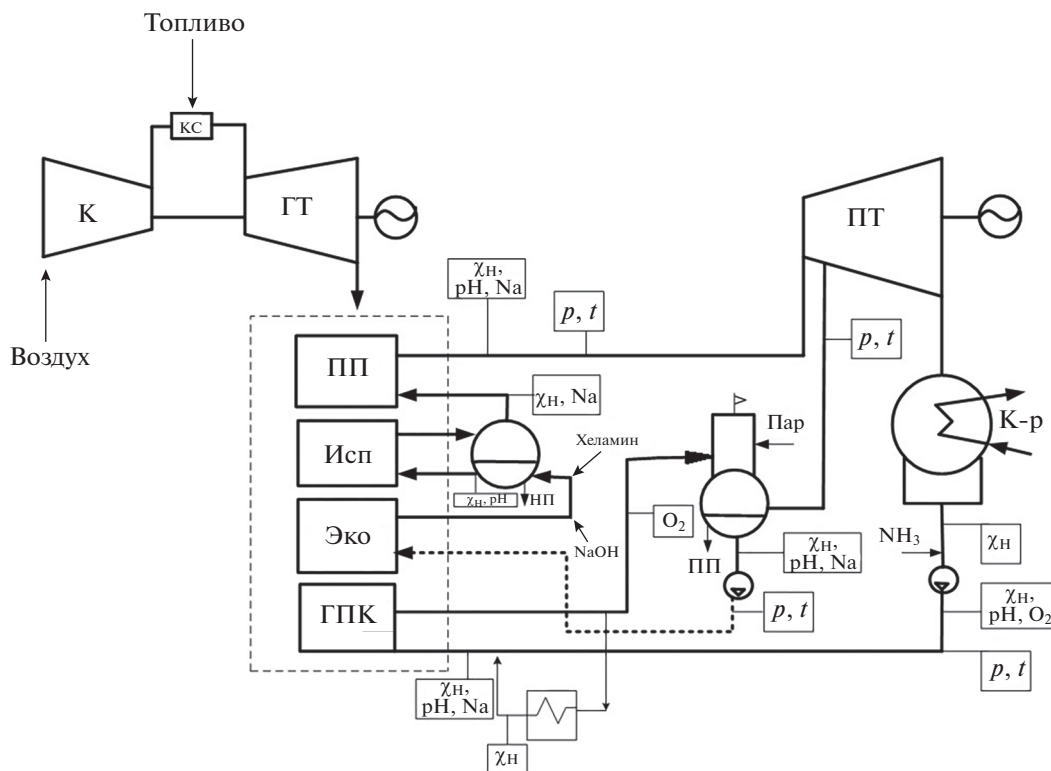


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема энергоблока ПГУ 110 МВт с последовательным питанием контуров НД и ВД и указанием точек дозирования реагентов и технологического контроля.

КС – камера сгорания; К – компрессор; ГТ – газовая турбина; ПП – пароперегреватель; Исп – испаритель; Эко – водный экономайзер; ГПК – газовый подогреватель конденсата; ПТ – паровая турбина; К-р – конденсатор; НП – непрерывная продувка

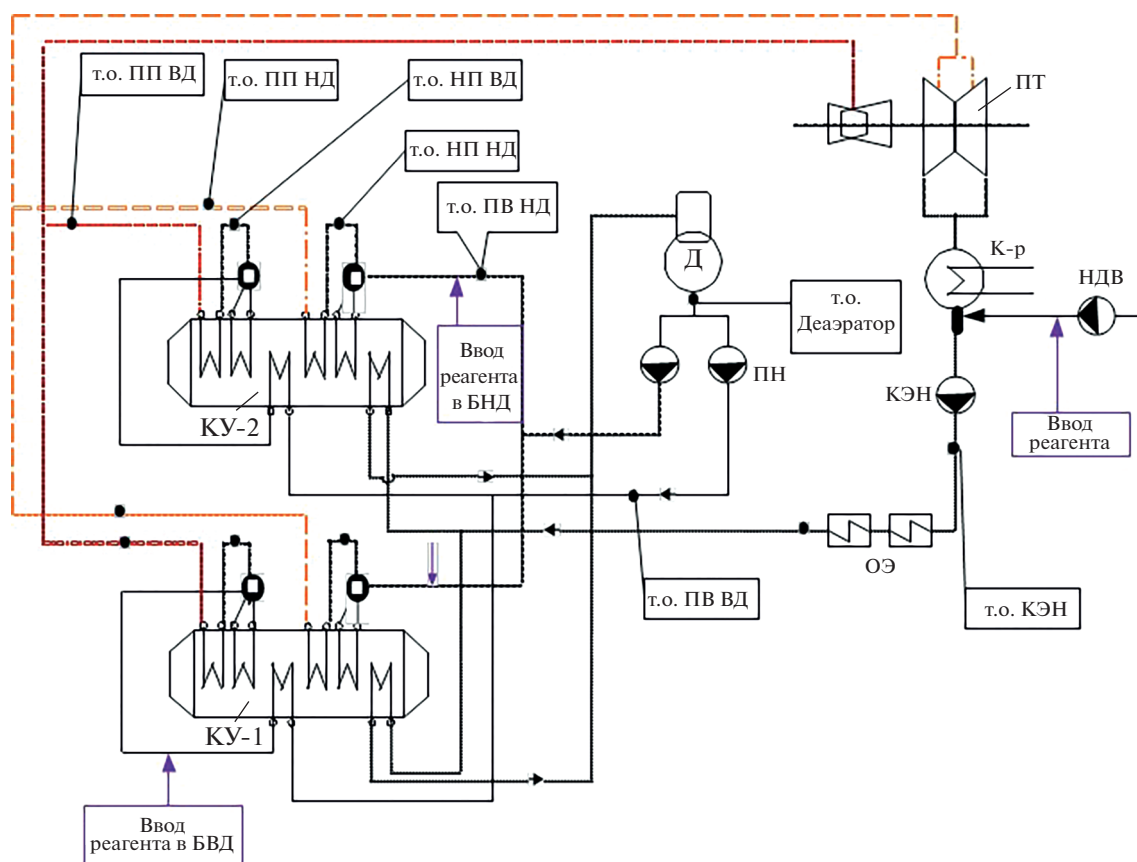


Рис. 2. Принципиальная тепловая схема энергоблока ПГУ 450 МВт филиала АО «Интер РАО – Управление электрогенерацией».

ОЭ – охладители эжекторов; Д – деаэратор; КУ – котел-утилизатор; НДВ – насос добавочной воды; ПН – питательный насос; БНД – барабан низкого давления; БВД – барабан высокого давления; остальные обозначения см. рис. 1.

Точки отбора пробы (т.о.): КЭН – основной конденсат после конденсатного электронасоса; Деаэратор – питательная вода после деаэратора; ПВ ВД, ПВ НД – питательная вода контуров высокого и низкого давления; НП ВД, НП НД – насыщенный пар контуров высокого и низкого давления; ПП ВД, ПП НД – перегретый пар контуров высокого и низкого давления

видуальных веществ соответствуют требованиям СанПиН 2.1.4.1074-01 (в редакции от 02.04.2018) и подбираются с учетом характеристик конкретного теплоэнергетического оборудования. На основании положительного опыта внедрения реагента ВТИАМИН КР-33 на энергоблоках ПГУ нескольких электростанций руководством ООО «Интер РАО – Управление электрогенерацией» было принято решение о переводе энергоблоков с хеламинного ВХР на режим с дозированием комплексного реагента ВТИАМИН КР-33.

На момент начала работ по внедрению реагента ВТИАМИН КР-33 на энергоблоках ст. № 1–4 ПГУ 110 МВт был реализован режим с комбинированным ВХР с тремя реагентами, предусмотренный проектом. В конденсатно-питательный тракт в линию основного конденсата проводилось дозирование хеламина и аммиака, а в барабан высокого давления – едкого натра для поддержания рН котловой воды.

В процессе выполнения подготовительной работы по внедрению реагента ВТИАМИН КР-33 было выявлено повышенное содержание меди по тракту энергоблоков, что обусловлено, скорее всего, периодом пусковой наладки.

Кроме того, на энергоблоках ст. № 1–4 ПГУ 110 МВт в период с апреля по октябрь и периодически в ноябре 2019 г. наблюдались нарушения по содержанию кислорода в основном конденсате до 100–200 мкг/дм³, что негативно сказывалось на процессе стабилизации содержания меди в тракте. Однако усилиями персонала котлотурбинного цеха к ноябрю 2019 г. были достигнуты значительные результаты по предотвращению присосов кислорода в тракт энергоблоков. К началу опытно-промышленных испытаний содержание кислорода, как правило, не выходило за пределы нормируемых значений, хотя наблюдались их периодические превышения (до 40 мкг/дм³). Также отмечался кратковременный резкий рост содер-

Таблица 1. Содержание меди в конденсате и питательной воде энергоблоков ст. № 1–4 ПГУ 110 МВт, мкг/дм³

Дата отбора пробы в потоке	Номер энергоблока			
	1	2	3	4
Июль 2019 г., ОК	5.0–24.0	5.0–18.0	5.0–24.0	18.0–31.0
Январь 2020 г., ОК	5.8–10.8	10.6	12.8	24.0
Февраль 2020 г., ОК	11.2	–	–	19.2
Февраль 2020 г., ПВ НД	3.0	10.5	Не более 7.7	16.2

Примечание. ОК – основной конденсат; ПВ НД – питательная вода контура низкого давления.

жания кислорода в конденсате, достигавший 450 мкг/дм³ в процессе его перекачки из дренажного бака машинного зала.

Анализируя данные суточных ведомостей химического контроля ВХР энергоблока ст. № 2 за период, предшествовавший опытно-промышленным испытаниям, можно отметить следующее:

в пробах конденсата при нормативных концентрациях кислорода наблюдалось устойчивое превышение норм по УЭП_Н (0.6–0.8 мкСм/см) и концентрации меди (15–20 мкг/дм³), при этом концентрация аммиака оказалась в пределах 500–800 мкг/дм³;

в котловой воде контура низкого давления (КВ НД) контролируемые показатели, находились в нормируемых пределах, тогда как в пробах перегретого пара контура низкого давления при высоких значениях рН (9.4–9.6) нормы по УЭП_Н были превышены (0.7–0.9 мкСм/см) при концентрации аммиака 1300–2000 мкг/дм³;

в котловой воде контура высокого давления (КВ ВД) все контролируемые показатели укладывались в нормативные пределы;

в пробах перегретого пара контуров высокого и низкого давления (ПП ВД и ПП НД) отмечено устойчивое превышение нормативных значений по УЭП_Н (0.5 мкСм/см).

Для устранения повышенного содержания меди в тракте энергоблоков специалистами ООО “Водные технологии” было предложено дозировать дополнительно к ВТИАМИН КР-33 реагент ВТИАМИН Д-2 в минимальных количествах для стабилизации содержания меди и обеспечения дальнейшего регулирования показателей ВХР.

Корректировка водно-химического режима дополнительной подачей реагента ВТИАМИН Д-2 была начата 30 июля 2019 г.

Для контроля за процессом стабилизации химических показателей ВХР выполнялся штатный оперативный контроль. В результате анализа полученных данных было установлено, что процесс стабилизации содержания меди в основном конденсате и питательной воде контура низкого давления (ПВ НД) наблюдался на всех энергоблоках.

Так, например, на энергоблоке ст. № 1 на момент начала дозирования реагента ВТИАМИН Д-2 содержание меди в конденсате энергоблока составляло от 5 до 24 мкг/дм³, в январе 2020 г. оно находилось в диапазоне от 5.8 до 10.8 мкг/дм³, причем наличие аммиака и значение рН не оказывали существенного влияния на изменение содержания меди. Кроме того, содержание кислорода в основном конденсате за конденсатным насосом энергоблока ст. № 1 практически не выходило за нормативные пределы, за исключением единичных случаев.

В точке отбора пробы перед барабаном низкого давления, которая в соответствии с проектом отражает нормы качества питательной воды, было выявлено, что содержание меди не превышает 3 мкг/дм³, что ниже нормируемого значения (5 мкг/дм³).

Анализируя данные контроля за содержанием меди в тракте энергоблоков (табл. 1), можно сделать вывод, что при ведении водно-химического режима на основе ВТИАМИН КР-33 на начальном этапе осуществляется отмывка поверхностей от отложений, образовавшихся на стадии пусконаладочных работ. Поэтому в течение 2019 г. наблюдался рост содержания соединений меди в конденсате и в точке отбора питательной воды, что вполне объяснимо – процессы отмывки и должны сопровождаться волнообразными изменениями содержания меди в тракте энергоблоков. Следует отметить, что процесс удаления соединений меди из отложений происходит равномерно при постоянной работе оборудования в режиме несения нагрузки.

При выполнении требуемого объема химического контроля за показателями водно-химического режима с момента внедрения реагента ВТИАМИН КР-33 и дополнительной корректировки реагентом ВТИАМИН Д-2 на энергоблоках ст. № 1–4 ПГУ 110 МВт были получены стабильные значения рН в пределах от 9.3 до 9.5 по конденсатно-питательному тракту и котловой воде контуров низкого и высокого давлений, значение рН в перегретом паре не превышало 9.4.

Таблица 2. Данные химического контроля и результаты расчета качества перегретого пара и основного конденсата турбины

Дата отбора пробы в потоке	Измеренные значения				Расчетные значения						
	χ , мкСм/см	$\chi_{Н}$, мкСм/см	рН	C_{CO_2} , мкг/дм ³	k	рН	C_{Cl^-} , мкг/дм ³	C_{NH_3} , мкг/дм ³	$\sum C_{CO_2}$, мкг/дм ³	$\sum C_{CO_{2д}}$, кг/дм ³	$\chi_{Нд}$, мкСм/см
27.05.2022, ОК	3.4	0.73	9.05	280	0.10	9.02	31.6	410	188	54.0	0.56
	3.4	0.73	9.05	280	0.01	9.02	31.6	410	188	40.6	0.42
30.05.2022, ПП ВД	2.8	0.86	8.83	400	0.05	8.85	30.2	346	305	68.5	0.74
30.05.2022, ПП НД	7.0	0.85	9.34	300	0.01	9.36	29.8	1141	299	57.9	0.67

Примечание. ПП ВД, ПП НД – перегретый пар контуров высокого и низкого давления; $\sum C_{CO_2}$ – расчетные значения суммарной концентраций углекислоты (свободной и связанной); $\sum C_{CO_{2д}}$ – то же в дегазированной Н-пробе; $\chi_{Нд}$ – удельная электрическая проводимость в условиях дегазации Н-катионированной пробы; k – остаточное содержание (доля) свободной углекислоты в Н-пробе при дегазации.

Помимо рН были зафиксированы также стабильно низкие значения содержания железа по тракту. Так, например, в котловой воде контура высокого давления при штатной работе энергоблоков они составили от 3 до 23 мкг/дм³.

Удельная электрическая проводимость Н-катионированной пробы на энергоблоках ст. № 1 и 2 постепенно стабилизировалась. Далее приведены средние значения УЭП_Н, мкСм/см, по энергоблокам:

	Ст. № 1	Ст. № 2
Основной конденсат... ..	0.63	0.70
Насыщенный пар ВД.. ..	0.57	0.68
Перегретый пар ВД.....	0.72	0.88

Наблюдения за состоянием ВХР энергоблоков ст. № 1–4 продолжались в течение 2020–2022 гг. Некоторые результаты аналитических измерений и расчетов по методике ИГЭУ [11] в период с 27 по 31 мая 2022 г. приведены в табл. 2.

Проанализировав данные табл. 2, можно сделать следующие выводы:

1. В контуре низкого давления присутствует летучий щелочной реагент (в расчете на аммиак – 1100–1300 мкг/дм³). Вынос такого реагента в пар сильно повышает рН и удельную электрическую проводимость прямой охлажденной пробы (7.0–8.2 мкСм/см). Перегретый пар НД (рН = 9.24–9.40) поступает в часть низкого давления паровой турбины (ЧНД) и далее в конденсатор (К-р), что создает контур циркуляции подщелачивающего агента: КЭН – БНД – ЧНД – К-р.

2. Котловая вода контура низкого давления является питательной водой контура высокого давле-

ния (ПВ ВД), где присутствие отмеченного летучего щелочного агента не проявляется в такой степени, как в контуре НД. Пар ВД характеризуется пониженными значениями удельной электрической проводимости (2.8–3.1 мкСм/см) и рН (8.8–8.96). При увеличении УЭП_Н (0.50–0.86 мкСм/см) по отношению к пару контура НД на значение рН котловой воды оказывает влияние малолетучий реагент. Значения УЭП_Н ПП ВД могут повышаться из-за присутствия в котловой воде как связанной углекислоты, так и продуктов термоллиза потенциально кислых органических веществ. При пересчете на концентрацию углекислоты измеренных значений УЭП, УЭП_Н, рН ПП ВД получены ее высокие значения, что согласуется с данными химического контроля (см. табл. 2).

3. Согласно расчету удельной электрической проводимости Н-катионированной пробы в условиях ее дегазации, возможно уменьшить ее значения в ПП ВД на 0.2–0.3 мкСм/см в зависимости от степени дегазации и глубины удаления свободной углекислоты. Методика расчета УЭП_{Нд} соответствует условиям работы кондуктометра с дегазацией Н-катионированной пробы.

Таким образом, данные оперативного химического контроля в целом согласуются с представленными ранее данными опытно-промышленных испытаний, проведенных с 27 по 31 мая 2022 г. Причиной устойчивого превышения удельной электрической проводимостью Н-катионированной пробы перегретого пара нормативных значений является наличие углекислоты и, как следствие, недостаточная декарбонизация основного конденсата в деаэрационной колонке БНД.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ВХР С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ПИТАНИЕМ КОНТУРОВ НИЗКОГО И ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ПГУ

В состав основного оборудования энергоблока ПГУ 450 МВт (см. рис. 2) входят две газотурбинные установки ГТЭ-160, два котла-утилизатора Е-229/50.2-7.85/0.59-507/227, паровая турбина К-160-7.5.

Котел-утилизатор – двухконтурный с естественной циркуляцией и вертикальным расположением труб, с параллельным питанием контуров НД и ВД. Деаэрация конденсата производится в деаэраторе повышенного давления. Допускается работа КУ при изменениях расхода и температуры газов, поступающих от ГТУ, обусловленных изменением температуры наружного воздуха от –56 до +34°С.

Целью опытно-промышленных испытаний, начатых в феврале 2019 г., была замена импортного реагента *Helamin* на отечественный ВТИАМИН КР-33. Дозирование реагента ВТИАМИН КР-33 производилось 0.5%-ным водным раствором в основной конденсат с производительностью насоса-дозатора 16 дм³/ч. Содержание реагента кон-

тролировалось по методике СТО ВТИ 37.004-2013 и поддерживалось на уровне не менее 0.5 мкг/дм³.

Некоторые результаты химико-аналитических измерений и расчета по методике ИГЭУ [11] показателей качества воды и пара в период опытно-промышленных испытаний представлены в табл. 3.

На основании данных полного химического контроля за показателями качества ведения водно-химического режима котлов-утилизаторов ст. № 1 и 2 ПГУ 450 МВт можно сделать вывод, что за период работы с применением реагента ВТИАМИН КР-33 не выявлено нарушений и отклонений водно-химического режима.

По полученным данным для КУ ст. № 1 установлено:

значение рН котловой воды контура низкого давления оставалось в пределах от 9.0 до 9.5, контура высокого давления – от 8.9 до 9.3;

содержание соединений кремниевой кислоты в КВ НД находилось в пределах от 20 до 120 мкг/дм³ при нормируемом значении 200 мкг/дм³;

концентрация пленкообразующих аминов, определяемая по СТО 34.004-2013 с индикатором Бенгальский розовый, составляла от 1 до 16 мкг/дм³;

Таблица 3. Данные химического контроля состояния ВХР в период опытно-промышленных испытаний на энергоблоке ст. № 1 ПГУ 450 МВт (по суточным ведомостям) и результаты расчета (по программе ИГЭУ) показателей качества водного теплоносителя

Отбор пробы в потоке	Дата	Измеренные значения					Расчетные значения			
		рН	χ , мкСм/см	$\chi_{Н}$, мкСм/см	C_{Fe} , мкг/дм ³	C_{Na} , мкг/дм ³	C_{Na} , мкг/дм ³	$\sum C_{CO_2}$, мкг/дм ³	C_{NH_3} , мкг/дм ³	
<i>Питательная вода</i>										
ПВ НД	18.03.2019	8.96	3.16	0.28	–	2.00	6.2	48	326	
	31.03.2019	8.92	3.11	0.31	–	2.02	6.2	60	315	
<i>Котловая вода</i>										
КВ НД	18.03.2019	9.48	9.5	3.20	4.70	3.5	158	397	1550	
	31.03.2019	9.33	9.01	6.21	35.5	–	307	2016	1214	
КВ ВД	18.03.2019	9.16	5.13	0.66	47.3	21	9.0	263	678	
	31.03.2019	8.95	4.43	0.57	4.7	46	7.8	201	550	
<i>Насыщенный пар</i>										
НП НД	18.03.2019	8.87	3.20	0.19	–	–	2.7	33	326	
	31.03.2019	8.84	3.11	0.40	–	–	6.1	104	325	
НП ВД	18.03.2019	9.05	3.16	0.21	–	–	7.7	16	315	
	31.03.2019	8.98	3.02	0.25	–	–	7.8	16	315	
<i>Перегретый пар</i>										
ПП НД	18.03.2019	8.83	3.17	0.21	–	–	2.7	39	320	
	31.03.2019	8.96	3.02	0.24	–	2.6	6.0	34	298	
ПП ВД	18.03.2019	8.93	3.20	0.24	–	–	4.3	42	332	
	31.03.2019	8.92	3.06	0.38	–	5.9	7.6	34	312	

Примечание. C_{Na} – концентрация катионов солевых примесей в расчете на Na^+ ; C_{NH_3} – концентрация подщелачивающих реагентов в расчете на NH_3 ; $\sum C_{CO_2}$ – суммарная концентрация форм диссоциации углекислоты ($C_{HCO_3^-} + C_{CO_3^{2-}}$) в расчете на CO_2 .

содержание железа в котловой воде низкого давления было минимальным и не превышало 58 мкг/дм³, высокого давления – около 49 мкг/дм³;

удельная электрическая проводимость котловой воды низкого и высокого давления при дозировании реагента ВТИАМИН КР-33 не превышала ранее установленных значений, полученных при ведении хеламинного водно-химического режима;

удельная электрическая проводимость Н-катионированной пробы питательной воды составляла не более 0.31 мкСм/см;

содержание меди в конденсате и питательной воде было стабильным и не превышало 2.4 мкг/дм³;

удельная электрическая проводимость Н-катионированной пробы перегретого пара низкого давления находилась в пределах 0.21–0.29 мкСм/см;

рН перегретого пара низкого давления составлял 8.83–9.07.

При расчетах были получены малые значения суммарных концентраций солевых примесей C_{Na^+} и форм диссоциации углекислоты $\sum C_{CO_2}$ во всех потоках, что свидетельствует о выполнении требований норм по удельной электрической проводимости Н-катионированных проб питательной воды и пара – менее 0.5 мкСм/см. Эти значения оказались ниже значений аналогичных показателей для ПГУ 110 МВт с последовательным питанием контуров НД и ВД. По значениям подщелачивающих компонентов в пересчете на аммиак можно судить об эквивалентном нейтрализующем действии аминов, обеспечивающих нормативные значения рН по пароводяному тракту энергоблока.

Таким образом, согласно данным химического контроля, все показатели водно-химического режима котлов-утилизаторов ст. № 1 и 2 с дозированием реагента ВТИАМИН КР-33 находятся в нормируемых пределах, установленных в режимной карте. Поставленную задачу отработки ВХР с дозированием отечественного реагента можно считать решенной.

ВЫВОДЫ

1. При повышенных концентрациях меди в питательной воде наряду с комплексным реагентом ВТИАМИН КР-33 может использоваться реагент ВТИАМИН Д-2, что подтверждено на примере энергоблоков ПГУ 110 МВт.

2. При последовательном питании водой барабанов низкого и высокого давления, что характерно для ПГУ 110 МВт и некоторых других схем, возможен значительный вынос в пар углекислоты, способной повышать УЭП_Н пара сверх нормативных значений.

3. В схемах ПГУ мощностью 450 МВт и других с последовательным питанием БНД и БВД установлен деаэрактор повышенного давления, благодаря чему обеспечивается глубокое удаление как кислорода, так и углекислоты и устраняется возможность выноса углекислоты в пар и нарушения нормы УЭП_Н.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Богачев А.Ф., Радин Ю.А., Герасименко О.Б.** Особенности эксплуатации и повреждаемость котлов-утилизаторов бинарных паровых установок. М.: Энергоатомиздат, 2008.
2. **Петрова Т.И., Петров А.Ю.** Водно-химические режимы тепловых электростанций с парогазовыми установками (по зарубежным данным) // Новое в российской электроэнергетике. 2007. № 4. С. 44–56.
3. **Суслов С.Ю., Кирилина А.В.** О выборе реагентов при ведении аминных режимов // Энергетик. 2011. № 1. С. 39–44.
4. **Богачев А.Ф.** К вопросу влияния органических амидосодержащих соединений на коррозионные процессы в пароводяном тракте ТЭС // Новое в российской электроэнергетике. 2011. № 12. С. 19–26.
5. **Кирилина А.В., Суслов С.Ю., Соколова Е.А.** Опыт ведения водно-химического режима на Шатурской ГРЭС с использованием цетамина (или как загубить идею) // Энергетик. 2011. № 6. С. 35–39.
6. **СТО 70238424.27.100.013-2009.** Водоподготовительные установки и водно-химический режим ТЭС. Условие создания. Нормы и требования. Стандарт организации. М.: НП “ИнВЭЛ”, 2009.
7. **Петрова Т.И., Дяченко Ф.В., Орлов К.А.** Отечественные и международные документы по использованию реагентов, содержащих пленкообразующие амины, для организации водно-химического режима на ТЭС // Теплоэнергетика. 2018. № 4. С. 60–64.
<https://doi.org/10.1134/S0040363618040070>
8. **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>
9. **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.
10. **Применение реагента ВТИАМИН КР-33 для ведения водно-химического режима на ТЭС / А.В. Кирилина, С.Ю. Суслов, В.В. Козловский, Е.Ф. Нартя // Материалы V науч.-практ. конф. “Теоретические и практические вопросы применения приборов контроля ВХР в энергетике”. Н. Новгород, ООО “Взор”, 2019. С. 85–87.**
11. **Ларин Б.М., Ларин А.Б., Савинов М.П.** Расчетное определение качества пара энергетических котлов по измерению удельной электрической проводимости и рН // Теплоэнергетика. 2021. № 5. С. 63–71.
<https://doi.org/10.1134/S0040363621040032>

Import Substituting Water-Chemistry Technologies on the Basis of Amine-Containing Reagents for Combined-Cycle Power Plant Steam Generators

B. M. Larin^{a, *}, S. Yu. Suslov^b, A. V. Kirilina^b, V. V. Kozlovskii^b, and A. A. Zidekhanova^b

^a *Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, 153003 Russia*

^b *OOO Water Technologies Engineering, Moscow, 115280 Russia*

**e-mail: info@wteng.ru*

Abstract—The last decade has seen the widespread use of water chemistry with metering polyamines into the coolant of steam boilers and heat-recovery steam generators (HRSG) of combined-cycle power plants (CCPP) at thermal power plants in Russia and Western Europe. Water chemistry with complex reagents of the Helamin and Cetamin trademarks began to oust the conventional all-volatile water chemistry. However, such factors as high cost and unclear component composition of imported reagents generated the need to develop similar domestically produced reagents. Complex reagents of the VTIAMIN and, in particular, VTIAMIN KR-33 types have become such ones. Due to selecting the concentrations of individual components in the complex reagent's composition, it has become possible to loosen the previously formed deposits and remove them from the heat-transfer equipment surfaces and obtain a significantly lower formation rate of new deposits, and, hence, the corrosion rate of heat-transfer surfaces. The article presents the results obtained from pilot commercial tests of the VTIAMIN KR-33 reagent in the HRSGs of CCPP-based power units in using various thermal cycle process circuits. These tests were carried out with the aim to solve various process-related tasks within the framework of implementing the program of substituting the imported polyamine water-chemistry technology. It has been found in the course of performing pilot commercial tests in 110-MW CCPP units that it is possible to jointly use VTIAMIN KR-33 and VTIAMIN D-2 reagents to reduce the corrosion rate of copper-containing alloys and stabilize the copper content over the power unit's steam–water path. The tests revealed an increased content of carbonic acid in the steam, which entails violation of the steam quality standards in terms of the H-cationized sample electrical conductivity indicator. The thermal cycle process circuits with sequential (the 110-MW CCPP) and parallel (the 450-MW CCPP) feeding of low- and high-pressure drums (LPD and HPD) were compared with each other. It has been shown that the violation of the standard water chemistry in the case of a high carbonic acid content in the 110-MW CCPP unit's path results from inefficient operation of the deaerator built into the LPD design.

Keywords: steam power-generating boilers, heat-recovery steam generators, combined-cycle power plants, polyamine water chemistry, carbonic acid, pilot commercial tests, copper-containing alloys, complex organic reagents