

# ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ, ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И АГРЕГАТЫ (05.14.14)

УДК 621.311.22

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-3-40-47

## Нормирование качества воды и пара при полиаминном (хеламинном) водно-химическом режиме на тепловых электростанциях с парогазовыми установками

Ф.В. Дяченко, Т.И. Петрова

В последние 10 — 20 лет на тепловых электростанциях (ТЭС) с парогазовыми установками (ПГУ) для коррекции качества теплоносителя широко используются водно-химические режимы (ВХР) с применением комплексных реагентов, в состав которых входят плёнкообразующие амины (ПОА). Применение комплексных реагентов приводит к снижению скорости коррозии конструкционных материалов и образования отложений на теплопередающих поверхностях, удалению существующих отложений с поверхностей нагрева и лопаток паровых турбин, также упрощается процедура проведения консервации котлов-утилизаторов.

Первыми комплексными реагентами на основе полиаминов, применяемыми в России на ТЭС с ПГУ с 2004 г, были реагенты под торговой маркой «Хеламин», и ВХР с добавлением данных реагентов получил название «хеламинный». Режимы с использованием полиаминов других марок, таких как Эпурамин, Втиамин и др. стали именовать «полиаминными» ВХР (ПАВР).

Несмотря на богатый опыт внедрения ПАВР на ТЭС с ПГУ существующие нормативные документы, определяющие качество воды и водяного пара, нуждаются в серьёзной доработке. Отечественные нормативы в основном распространяются на комплексные реагенты определённых марок и требуют дополнения и переработки, поскольку серьёзно устарели. В 2016 г. Международной ассоциацией по свойствам воды и водяного пара (IAQWS) утверждён первый Международный нормативный документ по использованию комплексных реагентов, содержащих ПОА, для коррекции качества воды и пара на тепловых электростанциях с барабанными энергетическими котлами и на ТЭС с ПГУ (переиздан в 2019 г.). Однако в нём при определении требований к качеству воды и пара используются нормируемые значения, разработанные для гидразинно-аммиачного (AVT(R)) или аммиачного (AVT(O)) ВХР, которые не учитывают всех особенностей, характерных для ВХР с ПОА.

В настоящей работе при разработке норм качества воды и пара с использованием комплексных реагентов учтены нормируемые значения, содержащиеся в ранее разработанных документах, относящихся к ВХР с дозированием комплексных реагентов, а также в существующих нормативных документах для аммиачного и гидразинно-аммиачного ВХР. В предлагаемых нормах учитывается технологическая схема энергоблоков и наличие/отсутствие сплавов на основе меди в конденсатно-питательном тракте. Дано сравнение результатов химического контроля, нормируемых значений, указанных в режимных картах, с предложенными значениями для трёх разных энергоблоков ТЭС с ПГУ. Показано, что предлагаемые нормы качества воды и пара в основном соответствуют значениям режимных карт, применяемых на обследованных ТЭС с ПГУ, или ужесточают их. Средние значения показателей качества воды и пара, полученные при стационарном режиме работы оборудования за период (более года) на трёх ТЭС с ПГУ с различными схемами и конструкционными материалами, находятся в пределах предлагаемых норм.

*Ключевые слова:* водно-химический режим, полиамины, Хеламин, качество теплоносителя, котел-утилизатор, нормируемые значения.

*Для цитирования:* Дяченко Ф.В., Петрова Т.И. Нормирование качества воды и пара при полиаминном (хеламинном) водно-химическом режиме на тепловых электростанциях с парогазовыми установками // Вестник МЭИ. 2020. № 3. С. 40—47. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-3-40-47.

## Water and Steam Purity Target Values for Polyamine (Helamin) Water Chemistry at Combined Cycle Power Plants

F.V. Dyachenko, T.I. Petrova

Complex chemicals that include filming amines have been widely used for water chemistry control at combined cycle power plants during the last 10-20 years. Use of these complex chemicals has resulted in: lower rates of material corrosion and deposition on heat transfer surfaces, removal of deposits from heat exchange surfaces and turbine blades, and simplification of layout procedure of heat recovery steam

generators. The chemicals under trademark Helamin are the first polyamine-based complex chemicals that have been in use at Russian combined cycle power plants since 2004. Water chemistry with the use of these chemicals is called Helamin treatment. If other types of polyamines (e.g., Epuramin, Vtiamin etc.) are used for chemistry control, then the water chemistry is called polyamine treatment. In spite of the wide experience with polyamine treatment at combined cycle power plants, guidelines on water and steam purity that available for this treatment need significant revision. Domestic guidelines are mostly associated with certain types of complex chemicals and sometimes are out-of-date, requiring amendment and revision. The first international technical guidance on the use of complex chemicals with filming amines for water chemistry control at drum-type and combined cycle power plants (Application of Film Forming Substances in Fossil, Combined Cycle, and Biomass Power Plants) was issued in 2016 (re-issued in 2019) by International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS). However, water/steam purity target values used in this guidance are based on reducing and oxidizing all-volatile treatments (AVT(R) and AVT(O) respectively), which do not account for all features associated with filming amine treatment. In this work, development of water/steam target values for treatment with complex chemicals accounts for norms used in previously issued complex chemical treatment guidelines as well as in existing AVT(R) and AVT(O) guidelines. These target values take into account process flow diagrams of power-generating units and presence/absence of copper-based alloys in condensate/feed water train. Comparison of chemical monitoring results and target values from plant operational guidelines with those presented in this work has been performed for three different combined cycle power-generating units. The results of the work indicate that the suggested water/steam purity target values, on the whole, are either in line with, or stricter than, the respective values from plant operational guidelines of the surveyed units. Average water/steam chemistry values measured during more than one year of base-load operation of three combined cycle power plants with different process flow diagrams and materials, are within suggested target values.

*Key words:* combined cycle power plant, heat recovery steam generator, cycle water chemistry, polyamine, Helamin, coolant purity, target values.

*For citation:* Dyachenko F.V., Petrova T.I. Water and Steam Purity Target Values for Polyamine (Helamin) Water Chemistry at Combined Cycle Power Plants. Bulletin of MPEI. 2020;3:40—47. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-3-40-47.

## Введение

В настоящее время широко эксплуатируются тепловые электростанции (ТЭС) с парогазовыми установками (ПГУ), на которых используются различные водно-химические режимы (ВХР), рекомендованные заводом-изготовителем котлов-утилизаторов (КУ). В последние 10 — 20 лет для коррекции качества теплоносителя используют водно-химические режимы с комплексными реагентами на основе плёнкообразующих аминов (ПОА), основные преимущества которых: снижение скорости коррозии, образование новых и удаление существующих отложений с теплопередающих поверхностей и лопаток паровых турбин; снижение влияния изменений нагрузки, особенно при частых пусках/остановах на качество теплоносителя; упрощение процедур проведения сухой и влажной консервации во время остановов; понижение эрозионно-коррозионного износа в котлах-утилизаторах; уменьшение концентраций продуктов коррозии во время пусков.

В 2016 г. Международной ассоциацией по свойствам воды и водяного пара (IAPWS) утвержден первый Международный нормативный документ по использованию продуктов на основе плёнкообразующих аминов и других плёнкообразующих веществ для коррекции качества воды и пара на тепловых электростанциях с барабанными энергетическими котлами и на ТЭС с ПГУ (переиздан в 2019 г.) [1]. В нем в качестве ПОА рассмотрено использование октадециламина, олеиламина и олеилпропилендиамин и описан опыт их применения. Следует отметить, что из указанных трёх ПОА только олеилпропилендиамин (ОЛДА) имеет в своём составе больше одной аминной группы, т. е. является полиамином.

В настоящее время комплексными реагентами на основе полиаминов являются коммерчески доступ-

ные смеси, в состав которых входит полиамин ОЛДА, а также могут добавляться другие соединения, такие как подщелачивающие амины, эмульгаторы, восстановители и диспергаторы. Первыми комплексными реагентами на основе полиаминов, которые начали применяться в России на ТЭС с ПГУ с 2004 г, были реагенты под торговой маркой «Хеламин», и ВХР с их содержанием получили название «хеламинные». Общее название для режимов с полиаминами других марок, таких как Эпурамин, Втиамин и др. — полиаминный ВХР (ПАВР).

## Разработка норм качества воды и пара для котлов-утилизаторов на тепловых электростанциях с парогазовыми установками

Несмотря на богатый опыт внедрения ПАВР на ТЭС с ПГУ, существующие нормативные документы, определяющие качество воды и водяного пара, нуждаются в серьёзной доработке. Отечественные документы [2 — 4] преимущественно распространяются на реагенты определённых марок или требуют дополнения и переработки [5], поскольку устарели уже к моменту утверждения [6, 7]. В Международном документе IAPWS для ПАВР при определении требований к качеству воды и пара прописаны нормируемые значения, разработанные для гидразинно-аммиачного (AVT(R)) или аммиачного (AVT(O)) ВХР, но не учитывающие всех особенностей, характерных при применении комплексных реагентов на основе полиаминов.

В связи с необходимостью усовершенствования нормативных документов для ПАВР, с учетом многочисленных научных исследований, проведенных на кафедре технологии воды и топлива НИУ «МЭИ», а также, принимая во внимание 15-летний опыт использования Хеламина на ТЭС с ПГУ, в 2018 г. на кафедре теоретических основ теплотехники им. М.П. Вукало-

Таблица 1

Нормируемые значения качества теплоносителя КУ на ТЭС с ПГУ давлением до 14 МПа, в зависимости от наличия сплавов на основе меди в КПП

Показатель	БНД (< 1 МПа)			БСД (1...5 МПа)			БВД (> 5 МПа)			Добавочная вода (из БЗК)
	Питательная вода	Котловая вода <sup>1</sup>	Насыщенный и перегретый пар	Питательная вода	Котловая вода	Насыщенный и перегретый пар	Питательная вода	Котловая вода	Насыщенный и перегретый пар	
<b>При наличии сплавов на основе меди в КПП</b>										
аэ, мкСм/см	в соответствии с рН			в соответствии с рН			в соответствии с рН			≤0,5
а <sub>нр</sub> , мкСм/см	≤0,5	≤2,5 <sup>2</sup>	≤0,5	≤0,5	≤2,5 <sup>2</sup>	≤0,5	≤0,5	≤3,5 <sup>2</sup>	≤0,5	≤0,5
рН	8,8...9,3 <sup>3</sup>	8,9...10,2	>8,5	8,9...9,6	8,9...10,2	>8,5	8,9...9,6	8,9...9,8 <sup>4</sup>	>8,5	—
Растворенный кислород, мкг/дм <sup>3</sup>	≤10	—	—	≤10	—	—	—	—	—	—
Общая жесткость, мкг-экв/дм <sup>3</sup>	≤0,5	—	—	≤0,5	—	—	—	—	—	≤0,5
Fe, мкг/дм <sup>3</sup>	≤20	—	≤20	≤20	—	≤20	≤20	—	≤20	≤20
Cu, мкг/дм <sup>3</sup>	≤3	—	≤3	≤3	—	≤3	≤3	—	≤3	≤3
SiO <sub>2</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>	—	≤3000 <sup>2,6</sup>	≤20	≤20	≤3000 <sup>2,6</sup>	≤20	≤20	≤300 <sup>2,6</sup>	≤20	≤20
Na, мкг/дм <sup>3</sup>	≤10	—	≤5	—	—	≤5	—	—	≤5	≤10
Аммиак, мг/дм <sup>3</sup>	≤1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Полиамины/Хеламин	20...100 мкг/дм <sup>3</sup> ОЛДА или в пересчете на реагент согласно рекомендациям производителя <sup>7</sup>									
Расход НП, %	0,5...1,0 <sup>6</sup>									
<b>При отсутствии сплавов на основе меди в КПП</b>										
аэ, мкСм/см	в соответствии с рН			в соответствии с рН			в соответствии с рН			≤0,5
а <sub>нр</sub> , мкСм/см	≤0,5	≤2,5 <sup>2</sup>	≤0,5	≤0,5	≤2,5 <sup>2</sup>	≤0,5	≤0,5	≤3,5 <sup>2</sup>	≤0,5	≤0,5
рН	9,0...9,8	8,9...10,2	>8,5	8,9...9,8	8,9...10,2	>8,5	8,9...9,8	8,9...9,8 <sup>4</sup>	>8,5	—
Растворенный кислород, мкг/дм <sup>3</sup>	≤10	—	—	≤10	—	—	≤10	—	—	—
Общая жесткость, мкг-экв/дм <sup>3</sup>	≤0,5	—	—	≤0,5	—	—	—	—	—	≤0,5
Fe, мкг/дм <sup>3</sup>	≤20	—	≤20	≤20	—	≤20	≤20	—	≤20	≤20
SiO <sub>2</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>	—	≤3000 <sup>2,6</sup>	≤20	≤20	≤3000 <sup>2,6</sup>	≤20	≤20	≤300 <sup>2,6</sup>	≤20	≤20
Na, мкг/дм <sup>3</sup>	≤10	—	≤5	—	—	≤5	—	—	≤5	≤10
Полиамины/Хеламин	20...100 мкг/дм <sup>3</sup> ОЛДА или в пересчете на реагент согласно рекомендациям производителя <sup>7</sup>									
Расход НП, %	0,5...1,0 <sup>6</sup>									

**Примечание к табл. 1:**

$\alpha_{\text{H}}$  — удельная электропроводность прямой/Н-катионированной пробы; БНД/БСД/БВД — барабаны низкого/среднего/высокого давления; НП — непрерывная продувка в процентах от паропроизводительности.

1 — в случае, когда котловая вода БНД является питательной водой БСД/БВД, то к ней надо применять нормы качества питательной воды контура высокого давления;

2 — значение  $\alpha_{\text{H}}$  и концентраций  $\text{SiO}_2$  в зависимости от давления согласно таблице

**Нормируемые значения  $\alpha_{\text{H}}$  и концентраций  $\text{SiO}_2$  для КУ различных давлений**

Давление в котле, МПа	<5	5...0	10...12	12...14
$\alpha_{\text{H}}$ , мкСм/см	<25	<7	<5	<3,5
$\text{SiO}_2$ , мкг/дм <sup>3</sup>	3000	900	600	300

3 — допускается увеличение рН конденсата до значения 9,6 при соблюдении следующих условий:

- должны быть проведены исследования по влиянию комплексного реагента на основе полиаминов на скорость коррозии медных сплавов и определена их максимально допустимая концентрация (для реагентов Хеламин — 5 мг/дм<sup>3</sup>), концентрация реагента в конденсате не должна превышать это максимальное значение;
- концентрация меди в конденсате  $\leq 3$  мкг/дм<sup>3</sup>;

4 — для КУ давлением до 10 МПа допускается увеличение рН котловой воды до 10,2;

5 — в воде перед деаэратором;

6 — нормируемые значения корректируются по результатам тепло-химических испытаний;

7 — концентрации полиаминов могут быть выражены как в мкг/дм<sup>3</sup> полиаминов (ОЛДА) или в пересчете на тот или иной реагент. Для реагентов Хеламин рекомендуемое содержание полиаминов составляет 1...5 мг/дм<sup>3</sup> в пересчете на Хеламин. Допускается превышение указанных значений в периоды повышенных дозровок с целью консервации оборудования.

вича НИУ «МЭИ» начата разработка стандарта организации для полиаминного ВХР, в частности, для котлов-утилизаторов (КУ) на ТЭС с ПГУ.

При определении нормируемых значений учтены технологическая схема энергоблоков с ПГУ (двух/трёхконтурные, вертикальные/горизонтальные КУ; последовательность расположения барабанов различных давлений и др.) и конструкционные материалы пароводяного контура, в частности, наличие сплавов на основе меди в конденсатно-питательном тракте (КПТ). Включены нормируемые значения качества теплоносителя для ВХР на основе ПОА, содержащиеся в [1 — 5, 8], проекте нормируемых показателей химического контроля для ВХР на основе ПОА [9], существующих нормативных документах для аммиачного и гидразинно-аммиачного ВХР [10 — 21] и данные по поведению примесей в пароводяном тракте ТЭС [22]. В таблице 1 даны предлагаемые нормируемые значения качества теплоносителя в зависимости от наличия сплавов на основе меди в конденсатно-питательном тракте (КПТ).

Проанализировано соответствие основных показателей качества воды и пара, полученных в процессе эксплуатации в стационарном режиме, их нормируемых значений, указанных в режимных картах, с предложенными значениями для КУ на ТЭС с ПГУ, на одной из которых конденсатно-питательный тракт был выполнен только из сталей, а на другой из сталей и сплавов на основе меди. Анализ выполнен для следующих ТЭС.

Энергоблок на ТЭС-1 мощностью 450 МВт состоит из двух газотурбинных установок, двух паровых

котлов-утилизаторов горизонтального типа и одной паровой турбины. Котлы-утилизаторы двухконтурные с естественной циркуляцией. Питательная вода из деаэратора подаётся независимо в контуры низкого (0,7 МПа) и высокого (8,0 МПа) давления. Трубки конденсатора выполнены из медно-никелевого сплава МНЖ5-1. Для коррекции водно-химического режима использовался Хеламин BRW-150Н.

В состав энергоблока ТЭС-2 мощностью 39 МВт входят одна газотурбинная установка, один вертикальный двухконтурный КУ с принудительной циркуляцией и одна паровая турбина. Питательной водой контура высокого давления (5,5 МПа) является котловая вода из барабана низкого давления (0,6 МПа). Регулирование температуры перегретого пара осуществляется впрыском собственного конденсата. Трубки конденсатора выполнены из латуни ЛО 70-1. Коррекция водно-химического режима производилась Хеламином 906Н.

Энергоблок ТЭС-3 мощностью 120 МВт имеет в своём составе две газотурбинные установки, два паровых котла-утилизатора вертикального типа и одну паровую турбину. Котлы-утилизаторы двухконтурные с принудительной циркуляцией. Питательная вода из деаэратора подаётся независимо в контуры низкого (0,7 МПа) и высокого (8,2 МПа) давления. Температура перегретого пара паровой системы высокого давления регулируется впрыском питательной воды. В КПТ сплавы на основе меди отсутствуют. Для коррекции водно-химического режима использовались два реагента — Хеламин BRW-150Н и NaOH, дозируемый в котловую воду.

В таблице 2 представлены усреднённые данные качества теплоносителя (конденсата, питательной и котловой воды и перегретого пара контуров низкого и высокого давления и добавочной воды из БЗК) КУ ТЭС-1 (сентябрь 2016 — октябрь 2017 г.), КУ ТЭС-2 (январь 2017 — апрель 2018 г.) и КУ ТЭС-3 (апрель 2015 — июль 2016 г.).

Из данных табл. 2 следует, что предлагаемые нормы в основном соответствуют значениям режимных карт, используемых на обследованных ТЭС с ПГУ, и даже ужесточают их. Средние значения показателей химического контроля за период более года на трех ТЭС с ПГУ с различными схемами и конструктивными материалами находятся в пределах пред-

Таблица 2

**Сравнение предлагаемых нормируемых значений с режимными картами и средними показателями химического контроля на трех ТЭС с ПГУ**

Пробоотборная точка	Показатель	Предлагаемое нормируемое значение	ТЭС-1		ТЭС-2		ТЭС-3		
			Режимная карта	Среднее значение	Режимная карта	Среднее значение	Режимная карта	Среднее значение	
Конденсат	$\alpha_{12}$ , мкСм/см	$\leq 0,5$	$\leq 1,5$	0,40	$\leq 0,5$	0,50	$\leq 0,5$	0,48	
	pH	8,8...9,6 <sup>1</sup> 9,0...9,8 <sup>2</sup>	9,0...9,2	9,2	$\geq 8,9$	9,6	9,0...9,5	9,2	
	Растворенный кислород, мкг/дм <sup>3</sup>	$\leq 10$	$\leq 20$	53	$\leq 20$	19,7	$\leq 20$	9,2	
	Общая жесткость, мкг-экв/дм <sup>3</sup>	$\leq 0,5$	$\leq 3$	0,24	$\leq 1$	—	$\leq 0,5$	0,2	
	Fe, мкг/дм <sup>3</sup>	$\leq 20$	—	4,1	$\leq 20$	13,9	$\leq 20$	2,8	
	Cu, мкг/дм <sup>3</sup>	$\leq 3^1$	—	1,4	$\leq 5$	1,3	—	0,5	
	Na, мкг/дм <sup>3</sup>	$\leq 10$	—	—	—	—	$\leq 10$	20	
	Аммиак, мг/дм <sup>3</sup>	$\leq 1^1$	—	—	—	—	—	—	
Полиамины/Хеламин, мг/дм <sup>3</sup>	1...5 <sup>3</sup>	—	2,4	—	—	1...5	—		
БНД (<1 МПа)	Питательная вода	$\alpha$ , мкСм/см	в соответствии с pH	—	—	—	—	—	4,2
		$\alpha_{12}$ , мкСм/см	$\leq 0,5$	$\leq 1,5$	0,3	—	—	$\leq 1$	0,49
		pH	9,0...9,6 <sup>1</sup> 9,0...9,8 <sup>2</sup>	9,0...9,2	9,2	—	—	9,0...9,6	9,2
		Растворенный кислород, мкг/дм <sup>3</sup>	$\leq 10^1$ 5...10 <sup>2</sup>	$\leq 10$	2,4	—	—	$\leq 10$	4,0
		Общая жесткость, мкг-экв/дм <sup>3</sup>	$\leq 0,5$	$\leq 3$	0,24	—	—	$\leq 0,5$	0,2
		Fe, мкг/дм <sup>3</sup>	$\leq 20$	$\leq 30$	4,1	—	—	$\leq 20$	2,6
		Cu, мкг/дм <sup>3</sup>	$\leq 3^1$	$\leq 5$	1,3	—	—	$\leq 3$	0,5
		SiO <sub>2</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>	$\leq 20$	$\leq 80$	4,8	—	—	$\leq 20$	9,1
	Полиамины/Хеламин, мг/дм <sup>3</sup>	1...5 <sup>3</sup>	1...5 <sup>3</sup>	2,4	—	—	1...5 <sup>3</sup>	2,1	
	Котловая вода	$\alpha$ , мкСм/см	в соотв. с pH	$\leq 100$	27,1	см. значения питательной воды БВД		$\leq 100$	28,8
		$\alpha_{12}$ , мкСм/см	$\leq 25$	—	—			—	—
		pH	8,9...10,2	9,3...10,5	9,9			9,6...10,2	10,0
		SiO <sub>2</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>	$\leq 3000$	—	398			$\leq 1000$	233
		Полиамины/Хеламин, мг/дм <sup>3</sup>	1...5 <sup>3</sup>	1...5 <sup>3</sup>	2,4			1...5	2,1
	Перегретый пар	$\alpha_{12}$ , мкСм/см	$\leq 0,5$	$\leq 1,5$	0,26	$\leq 0,5$	0,47	$\leq 0,5$	0,36
		pH	$> 8,5$	$> 7,5$	9,1	$\geq 8,5$	9,8	9,0-9,5	9,2
		Fe, мкг/дм <sup>3</sup>	$\leq 20$	—	3,2	—	—	—	1,2
		Cu, мкг/дм <sup>3</sup>	$\leq 3^1$	—	—	—	—	—	—
		SiO <sub>2</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>	$\leq 20$	$\leq 25$	3,9	$\leq 20$	8,3	$\leq 20$	$< 4$
		Na, мкг/дм <sup>3</sup>	$\leq 5$	$\leq 25$	1,7	$\leq 10$	2,9	$\leq 10$	1,6
Полиамины/Хеламин, мг/дм <sup>3</sup>		1...5	—	2,4	—	—	—	—	

Продолжение табл. 2 на стр. 45

Окончание табл. 2

Проботоотборная точка	Показатель	Предлагаемое нормируемое значение	ТЭС-1		ТЭС-2		ТЭС-3		
			Режимная карта	Среднее значение	Режимная карта	Среднее значение	Режимная карта	Среднее значение	
БВД (>5 МПа)	Питательная вода	а, мкСм/см	в соответствии с рН	—	—	≤10	7,3	—	—
		а <sub>н</sub> , мкСм/см	≤0,5	≤1,5	0,3	—	—	—	—
		рН	8,9...9,6 <sup>1</sup> 8,9...9,8 <sup>2</sup>	9,0...9,2	9,2	9,0...9,6	9,5	9,0...9,6	9,2
		Растворенный кислород, мкг/дм <sup>3</sup>	≤10	≤10	2,4	≤10	9,9	≤10	4,0
		Fe, мкг/дм <sup>3</sup>	≤20	≤30	4,1	≤20	13,1	≤20	2,6
		Cu, мкг/дм <sup>3</sup>	≤3 <sup>1</sup>	≤5	1,3	—	1,6	≤3	0,5
		SiO <sub>2</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>	≤20	≤80	4,8	—	8,4	≤20	9,1
		Полиамины/Хеламин, мг/дм <sup>3</sup>	1...5	1...5	2,4	2...5	2,5	1...5	2,1
	Котловая вода	а, мкСм/см	в соответствии с рН	≤100	29,5	≤10	9,9	≤50	18,8
		а <sub>н</sub> , мкСм/см	≤25	—	—	—	—	—	—
		рН	8,9...10,2	9,3...11,2	10,0	9,0...10,6	9,8	9,5...10,2	9,8
		SiO <sub>2</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>	≤3000	≤2000	170	—	133	≤1000	110
		Полиамины/Хеламин, мг/дм <sup>3</sup>	1...5	1...5	2,4	2...5	3,9	1...5	2,2
	Перегретый пар	а <sub>н</sub> , мкСм/см	≤0,5	≤1,5	0,29	≤0,5	0,46	≤0,5	0,39
		рН	>8,5	>7,5	9,1	≥8,5	9,4	9,0...9,5	9,2
		Fe, мкг/дм <sup>3</sup>	≤20	—	2,8	—	—	—	1,5
		Cu, мкг/дм <sup>3</sup>	≤3	—	—	—	—	—	—
		SiO <sub>2</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>	≤20	≤25	3,9	≤20	8,6	≤20	<4
		Na, мкг/дм <sup>3</sup>	≤5	≤25	1,8	≤10	2,9	≤10	1,6
		Полиамины/Хеламин, мг/дм <sup>3</sup>	1...5	—	2,4	—	—	—	—
	Добавочная вода (из БЗК)	а, мкСм/см	≤0,5	≤2	0,45	≤2	0,66	≤1	0,6
а <sub>н</sub> , мкСм/см		≤0,5	—	—	—	0,35	—	—	
Общая жесткость, мкг-экв/дм <sup>3</sup>		≤0,5	≤1	—	≤1	—	≤0,5	0,2	
Fe, мкг/дм <sup>3</sup>		≤20	—	19,5	≤200	36,3	≤20	0,9	
Cu, мкг/дм <sup>3</sup>		≤3	—	—	—	—	—	—	
SiO <sub>2</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>		≤10	≤100	7,5	≤20	7,5	≤20	16,5	
Na, мкг/дм <sup>3</sup>		≤10	≤50	2,2	≤20	6,0	≤10	3,0	

**Примечение:**

1 — для ТЭС-1 и ТЭС-2;

2 — для ТЭС-3;

3 — в пересчете на Хеламин.

лагаемых норм, использование которых повышает требования к качеству теплоносителя, следовательно, ведет к повышению надёжности работы оборудования.

**Выводы**

Выбраны основные показатели и разработаны нормативные значения качества воды и пара при полиаминном водно-химическом режиме для котлов-ути-

лизаторов на ТЭС с ПГУ в зависимости от наличия медных сплавов в конденсатно-питательном тракте.

Проведено сравнение предлагаемых значений с данными утвержденных режимных карт и химического контроля на трёх ТЭС с ПГУ. Результат показал, что предлагаемые нормы предъявляют преимущественно более жесткие требования к качеству теплоносителя, при этом фактические значения показателей качества воды и пара находятся в пределах этих норм.

## Литература

## References

1. **IAPWS TGD8-16.** Application of Film Forming Amines in Fossil, Combined Cycle, and Biomass Power Plants. Banff, 2019.

2. **СТО 37-002—2012.** Методические указания по коррекционной обработке хеламином теплоносителя котлов давлением 1,4...13,8 МПа (хеламинный водно-химический режим).

3. **СО 34.37.535—2004.** Инструкция по коррекционной обработке комплексным реагентом Епурамин (Эпурамин) теплоносителя котлов давлением 2,4...13,8 МПа.

4. **СТО 00129840.34.37.010—2017.** Проведение очистки, консервации и ведение водно-химического режима на основе аминосодержащего реагента марки «Втиамин КР-33» (Втиаминный водно-химический режим).

5. **СТО 70238424.27.100.013—2009.** Водоподготовительные установки и водно-химический режим ТЭС. Условие создания. Нормы и требования.

6. **Ларин Б.М., Ларин А.Б., Суслов С.Ю., Кирилина А.В.** Нормирование качества водного теплоносителя на Российских ТЭС // Теплоэнергетика. 2017. № 4. С. 79—84.

7. **Кирилина А.В., Суслов С.Ю.** Нормы качества водного теплоносителя и отраслевой стандарт по водоподготовке и водному режиму на ТЭС // Теоретические и практические вопросы применения приборов контроля ВХР в энергетике: Тезисы III науч.-практ. конф. Нижний Новгород: ООО «Взор», 2015. С. 6—12.

8. **РД 153-34.1-37.534—2002.** Временный регламент по коррекционной обработке Хеламином теплоносителя котлов давлением 2,4...13,8 МПа (Хеламинный водно-химический режим).

9. **Bursik A., Hater W.** All-Volatile Treatment with Film Forming Amines — A First Suggestion for an Application Guidance // Power Plant Chem. 2015. V. 17 (6). Pp. 342—353.

10. **Правила** технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. М.: СПО ОРГРЭС, 2003.

11. **IAPWS TGD1-08.** Technical Guidance Document: Procedures for the Measurement of Carryover of Boiler Water into Steam. Banff, 2008.

12. **IAPWS TGD2-09.** Technical Guidance Document: Instrumentation for Monitoring and Control of Cycle Chemistry for the Steam-Water Circuits of Fossil Fired and Combined Cycle Power Plants. Banff, 2015.

13. **IAPWS TGD3-10.** Technical Guidance Document: Volatile Treatments for the Steam-Water Circuits of Fossil and Combined Cycle/HSRG Power Plants. Banff, 2015.

14. **IAPWS TGD4-11.** Technical Guidance Document: Phosphate and NaOH Treatments for the Steam — Water Circuits of Drum Boilers in Fossil and Combined Cycle/HRSG Power Plants. Banff, 2015.

1. **IAPWS TGD8-16.** Application of Film Forming Amines in Fossil, Combined Cycle, and Biomass Power Plants. Banff, 2019.

2. **СТО 37-002—2012.** Metodicheskie Ukazaniya po Korrekcionnoy Obrabotke Khelaminom Teplonositelya Kotlov Davleniem 1,4...13,8 MPa (Khelaminnyy Vodno-Khimicheskiy Rezhim). (in Russian).

3. **SO 34.37.535—2004.** Instruksiya po Korrekcionnoy Obrabotke Kompleksnym Reagentom Epuramin (Epuramin) Teplonositelya Kotlov Davleniem 2,4...13,8 MPa. (in Russian).

4. **СТО 00129840.34.37.010—2017.** Provedenie Ochistki, Konservacii i Vedenie Vodno-khimicheskogo Rezhima na Osnove Aminosoderzhashchego Reagenta Marki «Vtiamin KR-33» (Vtiaminnyy Vodno-khimicheskiy Rezhim). (in Russian).

5. **СТО 70238424.27.100.013—2009.** Vodopodgotovitel'nye Ustanovki i Vodno-khimicheskiy Rezhim TES. Uslovie Sozdaniya. Normy i Trebovaniya. (in Russian).

6. **Larin B.M., Larin A.B., Suslov S.Yu., Kirilina A.V.** Normirovanie Kachestva Vodnogo Teplonositelya na Rossiyskikh TES. Teploenergetika. 2017;4:79—84. (in Russian).

7. **Kirilina A.V., Suslov S.Yu.** Normy Kachestva Vodnogo Teplonositelya i Otrasleyoy Standart po Vodopodgotovke i Vodnomu Rezhimu na TES. Teoreticheskie i Prakticheskie Voprosy Primeneniya Priborov Kontrolya VKHR v Energetike: Tezisy III Nauch.-prakt. Konf. Nizhniy Novgorod: ООО «Vzor», 2015:6—12. (in Russian).

8. **RD 153-34.1-37.534—2002.** Vremennyy Reglament po Korrekcionnoy Obrabotke Khelaminom Teplonositelya Kotlov Davleniem 2,4...13,8 MPa (Khelaminnyy Vodno-khimicheskiy Rezhim). (in Russian).

9. **Bursik A., Hater W.** All-Volatile Treatment with Film Forming Amines — A First Suggestion for an Application Guidance. Power Plant Chem. 2015;17 (6): 342—353.

10. **Pravila** Tekhnicheskoy Ekspluatacii Elektricheskikh Stanciy i Setey Rossiyskoy Federacii. M.: SPO ORGRES, 2003. (in Russian).

11. **IAPWS TGD1-08.** Technical Guidance Document: Procedures for the Measurement of Carryover of Boiler Water into Steam. Banff, 2008.

12. **IAPWS TGD2-09.** Technical Guidance Document: Instrumentation for Monitoring and Control of Cycle Chemistry for the Steam-Water Circuits of Fossil Fired and Combined Cycle Power Plants. Banff, 2015.

13. **IAPWS TGD3-10.** Technical Guidance Document: Volatile Treatments for the Steam-Water Circuits of Fossil and Combined Cycle/HSRG Power Plants. Banff, 2015.

14. **IAPWS TGD4-11.** Technical Guidance Document: Phosphate and NaOH Treatments for the Steam — Water Circuits of Drum Boilers in Fossil and Combined Cycle/HRSG Power Plants. Banff, 2015.

15. **IAPWS TGD5-13**. Technical Guidance Document: Steam Purity for Turbine Operation. Banff, 2013.

16. **IAPWS TGD6-13**. Technical Guidance Document: Corrosion Product Sampling and Analysis for Fossil and Combined Cycle Plants. Banff, 2014.

17. **Consensus** on Operating Practices for the Control of Feedwater and Boiler Water Chemistry in Modern Industrial Boilers. N.-Y.: The American Society of Mechanical Engineers, 1998.

18. **GEK 72281d**. Steam Purity Recommendations for Utility Steam Turbines. N.-Y.: GE Energy, 2009.

19. **VGB-R 450**. Guidelines for Feed Water, Boiler Water and Steam Quality for Power Plants. Essen: VGB Power Tech., 2004.

20. **VGB-S-010-T-00; 2011-12**. Feed Water, Boiler Water and Steam Quality for Power Plants. Essen: VGB Power Tech., 2011.

21. **Dooley R.B., Aschoff A.F., Pocock F.J.** Cycle Chemistry Guidelines for Fossil Plants: All-volatile Treatment. Pali Alto, 1996.

22. **Воронов В.Н., Петрова Т.И.** Водно-химические режимы ТЭС и АЭС. М.: Издат. дом МЭИ, 2009.

15. **IAPWS TGD5-13**. Technical Guidance Document: Steam Purity for Turbine Operation. Banff, 2013.

16. **IAPWS TGD6-13**. Technical Guidance Document: Corrosion Product Sampling and Analysis for Fossil and Combined Cycle Plants. Banff, 2014.

17. **Consensus** on Operating Practices for the Control of Feedwater and Boiler Water Chemistry in Modern Industrial Boilers. N.-Y.: The American Society of Mechanical Engineers, 1998.

18. **GEK 72281d**. Steam Purity Recommendations for Utility Steam Turbines. N.-Y.: GE Energy, 2009.

19. **VGB-R 450**. Guidelines for Feed Water, Boiler Water and Steam Quality for Power Plants. Essen: VGB Power Tech., 2004.

20. **VGB-S-010-T-00; 2011-12**. Feed Water, Boiler Water and Steam Quality for Power Plants. Essen: VGB Power Tech., 2011.

21. **Dooley R.B., Aschoff A.F., Pocock F.J.** Cycle Chemistry Guidelines for Fossil Plants: All-volatile Treatment. Pali Alto, 1996.

22. **Voronov V.N., Petrova T.I.** Vodno-khimicheskie Rezhimy TES i AES. M.: Izdat. Dom MEI, 2009. (in Russian).

#### Сведения об авторах:

**Дяченко Филипп Викторович** — аспирант, ассистент кафедры теоретических основ теплотехники им. М.П. Вукаловича НИУ «МЭИ», e-mail: fvd12358@gmail.com

**Петрова Тамара Ивановна** — доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ теплотехники им. М.П. Вукаловича НИУ «МЭИ», e-mail: PetrovaTI@mpei.ru

#### Information about authors:

**Dyachenko Filipp V.** — Ph.D.-student, Assistant of Theoretical Bases of Heat Engineering named M.P. Vukalovich Dept., NRU MPEI, e-mail: fvd12358@gmail.com

**Petrova Tamara I.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Theoretical Bases of Heat Engineering named M.P. Vukalovich Dept., NRU MPEI, e-mail: PetrovaTI@mpei.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 15.11.2019

**The article received to the editor:** 15.11.2019