

ВОДОПОДГОТОВКА  
И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ  
АММИАЧНО-ЭТАНОЛАМИНОВОГО ВХР  
ВО II КОНТУРЕ АЭС С ВВЭР-1200

© 2025 г. В. Г. Крицкий<sup>a</sup>, \*, А. В. Гаврилов<sup>a</sup>, Н. А. Прохоров<sup>a</sup>, Е. А. Моткова<sup>a</sup>,  
Н. А. Пелагеевчева<sup>a</sup>, М. С. Швалева<sup>a</sup>, А. В. Карпов<sup>b</sup>

<sup>a</sup>АО “Атомэнергопроект”, ул. Савушкина, д. 82, литер A, Санкт-Петербург, 197183 Россия

<sup>b</sup>ООО “Спецпроект”, Державинский пер., д. 5, литер Б, Санкт-Петербург, 190005 Россия

\*e-mail: kritsky@spbaep.ru

Поступила в редакцию 15.05.2024 г.

После доработки 20.06.2024 г.

Принята к публикации 04.07.2024 г.

Применяемый на АЭС с ВВЭР-1200 аммиачно-этаноламиновый водно-химический режим обеспечивает низкие скорости коррозии, массопереноса и роста отложений продуктов коррозии. Содержание продуктов коррозии в питательной воде парогенератора составляет менее 1 мкг/дм<sup>3</sup>. Тем самым значительно увеличивается период между промывками парогенератора для удаления отложений. Однако этаноламин и аммиак поглощаются катионитом в ионообменных фильтрах систем очистки II контура, что приводит к необходимости проводить регенерацию катионита и непрерывное дозирование реагентов для поддержания требуемого значения pH в питательной воде. Сбросные растворы от регенерации, содержащие этаноламин и большое количество аммиака, должны быть обработаны, чтобы концентрации этих веществ при сбросе в окружающую среду не превышали предельно допустимых значений. Для удаления этаноламина и аммиака из регенерационных растворов создаются специальные установки, работа которых основывается на различных принципах. Пилотная установка очистки регенерационных растворов была изготовлена и смонтирована на Белорусской АЭС с ВВЭР-1200. Анализ работы пилотной установки показал, что она успешно выполняет свою функцию по защите водной среды, но при этом вынужденно происходит значительный сброс аммиака в окружающую воздушную среду. Удаление аммиака энергозатратно, экологически небезопасно и требует дополнительного использования химических реагентов. В этой связи весьма перспективным является водно-химический режим II контура без аммиака. Возможными вариантами могут быть либо переход с аммиака на диметиламин, либо применение этаноламина в качестве единственного корректирующего реагента с заменой части конструкционных материалов II контура на стали с повышенным содержанием хрома, имеющими более высокую коррозионную стойкость по сравнению с используемыми в настоящее время. Оба варианта позволят упростить технологию очистки сбросных вод и снизить экологическое воздействие на окружающую среду при сохранении низких значений скорости коррозии, достигнутых при применении аммиачно-этаноламинового водно-химического режима.

**Ключевые слова:** водно-химический режим, ВВЭР-1200, аммиак, этаноламин, диметиламин, массо-перенос, продукты коррозии, установка очистки регенерационных растворов

**DOI:** 10.56304/S0040363624700462

Применение аммиачно-этаноламинового водно-химического режима (ВХР) на АЭС с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 показало его высокую эффективность. Содержание продуктов коррозии в питательной воде II контура после нескольких лет эксплуатации энергоблока № 6 Нововоронежской АЭС составляет 0.5–0.8 мкг/дм<sup>3</sup>. Удельная загрязненность теплообменных трубок парогенератора через 5 лет после ввода в эксплуатацию этого энергоблока не превышает 20 г/м<sup>2</sup>. Это позволяет прогнозиро-

вать, что межпромывочный период парогенераторов ВВЭР-1200 составит не менее 25 лет [1].

Однако применение аммиачно-этаноламинового ВХР связано не только с вопросами коррозии и массопереноса продуктов коррозии в парогенератор. Возникли экологические проблемы, вызванные повышенной концентрацией азотсодержащих веществ в сточных водах и необходимостью ее снижения, тем самым появилась по-

**Таблица 1.** Предельно допустимые концентрации общего и аммонийного азота в сбросных водах АЭС, проектируемых российскими специалистами

АЭС	Концентрация азота, мг/дм <sup>3</sup>	
	общего	аммонийного
“Пакш 2” (Венгрия)	55	20
“Эль-Дабаа” (Египет)	10	3

требность в обработке сбросных растворов после регенерации ионообменных фильтров II контура.

Для обеспечения соответствия показателей качества рабочей среды II контура нормируемым значениям по продуктам коррозии и солевым примесям (сульфаты, хлориды, натрий) на АЭС с ВВЭР-1200 (АЭС-2006) предусмотрены системы очистки турбинного конденсата, продувочной воды парогенератора и дренажных вод. Дозируемые во II контур этаноламин и амиак поступают в турбинный конденсат и продувочную воду парогенератора, выводятся из них на катионообменных фильтрах систем очистки и при регенерации катионита попадают в сбросные растворы. Объем сбросных растворов определяется, главным образом, продолжительностью работы системы очистки турбинного конденсата, которая, в свою очередь, зависит от плотности трубок конденсатора и солесодержания охлаждающей воды. В любом случае сбросные растворы должны быть очищены в соответствии с экологическим законодательством страны, в которой строится АЭС.

Согласно российским нормативам, концентрация этаноламина должна составлять не более 0.01 мг/дм<sup>3</sup> при сбросе сточных вод в пресноводные рыбохозяйственные водоемы и не более 0.2 мг/дм<sup>3</sup> при сбросе в морские водоемы, концентрация иона аммония не должна превышать 0.5 мг/дм<sup>3</sup> [2]. В зарубежных странах отсутствует требование к предельно допустимой концентрации этаноламина как индивидуального вещества в сбросных водах, нормируется лишь сброс общего и аммонийного азота. Предельно допустимые концентрации общего и аммонийного азота в сбросных водах АЭС, проектируемых российскими специалистами, приведены в табл. 1. Необходимо отметить, что российские нормы значительно более жесткие, чем зарубежные.

### МЕТОДЫ УДАЛЕНИЯ ЭТАНОЛАМИНА И АМИАКА ИЗ РЕГЕНЕРАЦИОННЫХ РАСТВОРОВ

Для удаления этаноламина из сбросных вод в России разработаны установки с озонированием и дозированием пероксида водорода и ультрафиолетовым облучением [3], а также с обработкой коагулянтом на основе двухвалентного железа в сочетании с пероксидом водорода (метод Фенто-

на) [4]. Второй метод позволяет вывести органические остатки разложения этаноламина в виде шлама, что важно при нормировании сбросов по общему азоту.

Первый из этих методов применен на ЛАЭС-2 и Белорусской АЭС, при этом учтены требования к качеству сбросных вод, указанные в российских нормативных документах, второй метод включен в проекты АЭС “Пакш 2” и АЭС “Эль-Дабаа”, в которых учтены требования по сбросам для Венгрии и Египта соответственно.

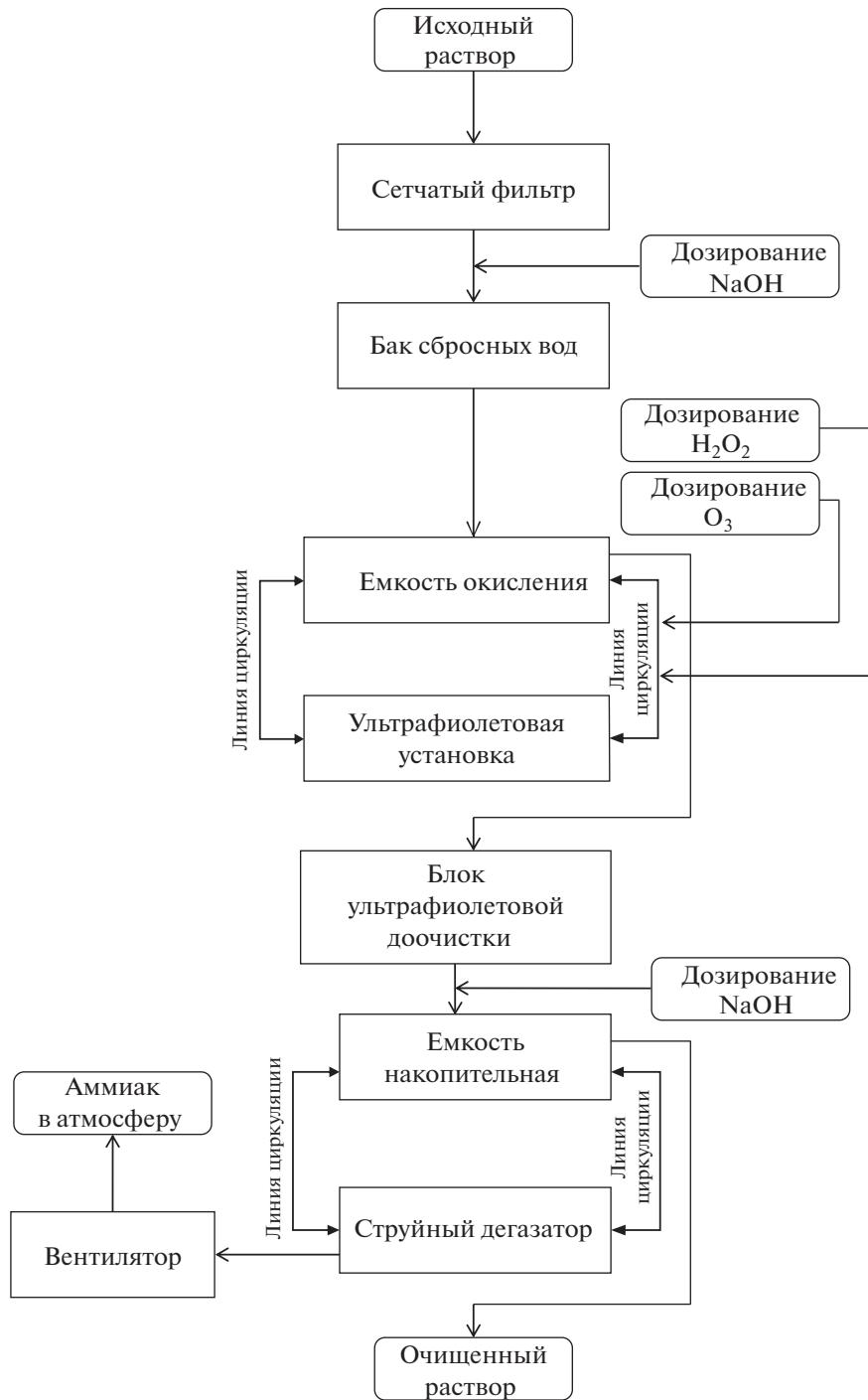
Удаление амиака из водного раствора целесообразно только методом его отдувки в воздух, основанным на том, что в сильнощелочной среде ( $\text{pH} > 11$ ) практически весь амиак находится в молекулярной форме и может быть выведен из раствора с подачей в него воздуха для рассеяния [5]. При определенном расходе воздуха и нужной высоте отводящей трубы достигаются удаление из раствора до 98% амиака и его допустимое содержание в атмосфере. Таким образом, установка по обработке сбросных регенерационных растворов при амиачно-этаноламиновом водно-химическом режиме должна включать в себя две стадии очистки.

### АНАЛИЗ РАБОТЫ ПИЛОТНОЙ УСТАНОВКИ

Пилотная установка, основанная на применении ультрафиолетового облучения с дозированием озона и пероксида водорода для удаления этаноламина и отдувки в воздух амиака, была разработана в АО “Атомэнергопроект”, изготовлена в ООО “Спецпроект” и внедрена на Белорусской АЭС с ВВЭР-1200. Блок-схема установки приведена на рис. 1.

Регенерационный раствор поступает в бак сбросных вод после предварительной очистки от механических примесей, в том числе от зерен ионообменных смол, на сетчатом фильтре. После фильтра производится нейтрализация раствора гидроксидом натрия до  $\text{pH} \approx 7$  для проведения последующего процесса разрушения этаноламина. Затем раствор подается в емкость окисления и далее в струйный эжектор, где смешивается с озоно-кислородной смесью и пероксидом водорода, а после попадает в установку ультрафиолетового излучения, в которой образуются радикалы, являющиеся более сильными окислителями, чем пероксид водорода и озон. Установка включает 10 последовательных ступеней окисления, на каждой из которых предусмотрена циркуляция раствора.

После прохождения последней ступени окислительного цикла раствор поступает в финишный блок доочистки, оснащенный ультрафиолетовыми лампами, где продолжается разрушение этаноламина вследствие активации накопленных



**Рис. 1.** Блок-схема установки очистки регенерационных растворов от этаноламина и аммиака на Белорусской АЭС

ранее окислителей. Далее раствор подается в накопительную емкость со струйным дегазатором амиака. Перед дегазатором в раствор дозируется гидроксид натрия для доведения значения pH среды до 11–13. При распылении раствора, имеющего такие высокие значения pH, через форсунки дегазатора происходит выделение амиака в воздух, который с помощью вентилятора выводится

в атмосферу через трубу на крыше здания. Для обеспечения достаточной глубины удаления аммиака предусмотрено несколько циклов его отдувки путем циркуляции раствора. После завершения отдувки растворов (при необходимости) нейтрализуется серной кислотой до pH в интервале от 6.5 до 8.5 для обеспечения возможности сброса в окружающую среду.

**Таблица 2.** Результаты работы установки по очистке регенерационных растворов

Режим работы	Концентрация, мг/дм <sup>3</sup>		рН	<i>t</i> , °C
	этаноламина	аммиака		
Окисление пероксидом	387/0.14	5310/138.0	—/—	36/21
	499/1.06	2988/77.5	13.4/13.3	39/30
Окисление пероксидом и озоном	499/0.46	4500/74.0	13.6/13.5	40/31
	691/1.00	5410/39.7	13.5/13.4	45/33
	691/0.80	5410/38.0	13.5/13.4	45/34
	691/0.90	5410/65.0	12.5/12.7	43/31
	282/1.10	1495/40.0	13.0/12.9	36/22

Примечание. В числителе концентрация до очистки, в знаменателе — после очистки; рН раствора и температура *t* в числителе до дегазатора, в знаменателе — после дегазатора.

Номинальная производительность установки составляет 0.5 м<sup>3</sup>/ч. Предусмотрен режим выхода очищенного регенерационного раствора с расходом 2 м<sup>3</sup>/ч при работе системы очистки турбинного конденсата с нагрузкой 100%. Установка работает периодически по мере поступления регенерационных растворов. Пусконаладочные испытания и отработка режимов эксплуатации установки были выполнены специалистами ООО “Спецпроект”.

Результаты, полученные при пусконаладочных испытаниях и на первых этапах эксплуатации установки, приведены в табл. 2.

Эффективность очистки от этаноламина составила в среднем 99.8% с концентрацией на выходе не более 1 мг/дм<sup>3</sup>, эффективность очистки от аммиака — 98%.

В ходе испытаний было отмечено, что эффективность удаления аммиака снижается при уменьшении температуры воды в дегазаторе. Проявляется “эффект градирни”, когда вследствие распыления струй жидкости форсунками происходит охлаждение раствора воздухом. В це-

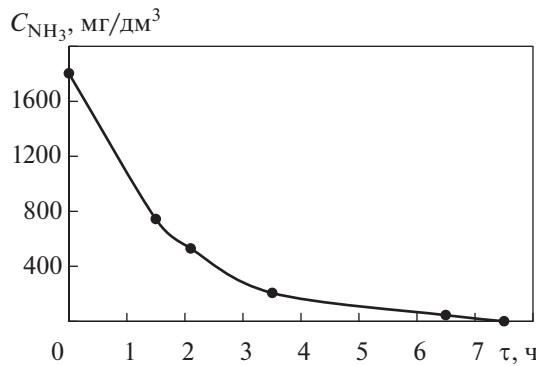
лях повышения эффективности удаления аммиака установка была модернизирована. В ее состав был дополнительно введен электронагреватель воды на линии циркуляции раствора при отдувке аммиака.

На рис. 2 показано изменение концентрации аммиака в воде при нагреве раствора до 36–45°C и его циркуляции через дегазатор и накопительный бак. При нагреве после нескольких циклов циркуляции достигается концентрация аммиака в растворе не более 50 мг/дм<sup>3</sup>.

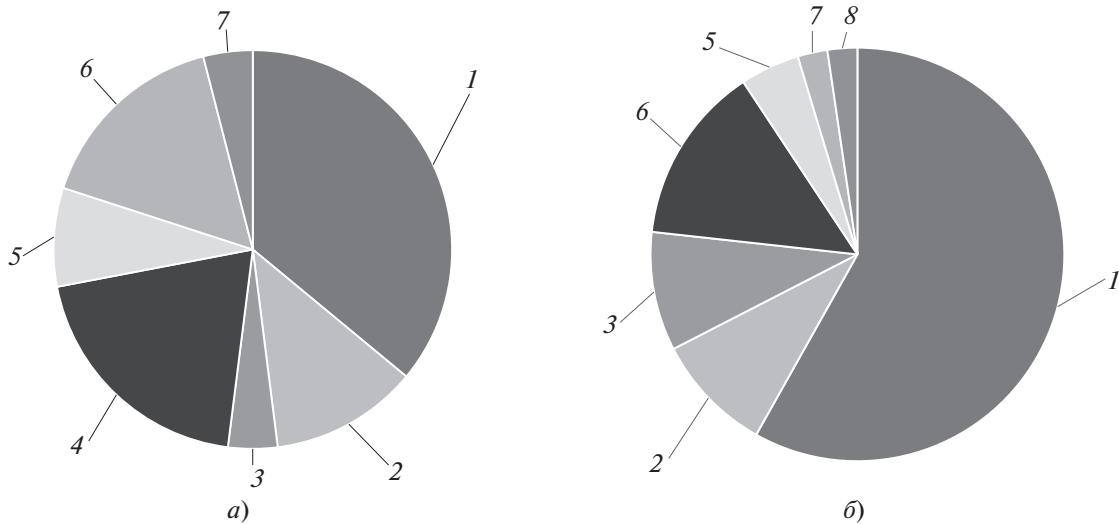
Также в процессе испытаний было отмечено значительное содержание в сбросных водах продуктов коррозии, а именно железа — 4–7 мг/дм<sup>3</sup>, что оказало негативное влияние на процесс отдувки аммиака. После установки фильтрующих элементов для удаления железа концентрация продуктов коррозии снизилась до 1 мг/дм<sup>3</sup> и процесс отдувки улучшился.

Очищенные на установке растворы направляются в бак-нейтрализатор, в который также отводятся отмывочные воды после регенерации фильтров, и далее сбрасываются в отводящий канал вместе с продувочной водой градилен. Благодаря разбавлению растворов (примерно в 100 раз) концентрация этаноламина на сбросе в окружающую среду составляет около 0.01 мг/дм<sup>3</sup>, концентрация аммиака — не более 0.5 мг/дм<sup>3</sup>, т.е. экологические требования к сбросам в водоем выполняются.

Концентрация аммиака в воздухе при отдувке из раствора с учетом разбавления воздухом с расходом 6000 м<sup>3</sup>/ч (производительность вентилятора в составе установки) в первые 1.5 ч уменьшилась до 780 мг/м<sup>3</sup>, затем до 13 мг/м<sup>3</sup> и далее составляла не более 1 мг/м<sup>3</sup>. Таким образом, даже при исходной концентрации аммиака в воде 1800 мг/дм<sup>3</sup> (согласно данным табл. 2, в воде она достигает 5400 мг/дм<sup>3</sup>) в точке сброса максимальная допустимая разовая концентра-



**Рис. 2.** Зависимость концентрации аммиака  $C_{\text{NH}_3}$  в воде при отдувке с нагревом ее перед дегазатором от продолжительности дегазации  $\tau$



**Рис. 3.** Водно-химические режимы, применявшиеся на энергоблоках с реакторами PWR в 2014 г. (а) и 2016 г. (б).  
1 – этиanolамин; 2 – этиanolамин/диметиламин; 3 – этиanolамин/метоксипропиламин; 4 – этиanolамин/аммиак; 5 – диметиламин/метоксипропиламин; 6 – 3-метоксипропиламин; 7 – морфолин; 8 – диметиламин

ция аммиака в атмосферном воздухе, которая составляет 0.2 мг/м<sup>3</sup> [6], будет превышена. Разбавление до предельно допустимых среднесуточной (0.1 мг/м<sup>3</sup>) и среднегодовой (0.04 мг/м<sup>3</sup>) концентраций возможно только благодаря рассеянию в атмосферном воздухе с учетом розы ветров и других природных явлений.

Количество аммиака, выбрасываемого в воздух после одной регенерации катионитного фильтра, составляет около 460 кг. Естественно, что даже после разбавления такой объем выброса будет влиять на экологическую обстановку. Для европейских стран, например, установлены максимальные годовые выбросы в атмосферу загрязняющих веществ, включая аммиак, для уменьшения нагрузки на окружающую среду [7]. С 1 января 2024 г. в России введен в действие перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды, в котором указан аммиак в воздушной и водной средах [8].

Опыт эксплуатации установки на Белорусской АЭС показал, что очистка от этиanolамина и аммиака – энергозатратный процесс с большим количеством применяемых реагентов, требующий тонкого регулирования и внимания персонала. Особенно проблемным оказалось удаление аммиака, количество которого в регенерационных растворах составляет 85% общего количества азотсодержащих веществ (90% в пересчете на общий азот) [9]. Для отдувки аммиака в воздух потребовалось также особое исполнение трубопроводов внутренней вентиляции для исключения выхода аммиака в помещения. Немаловажным

является и большой расход гидроксида натрия для перевода кислых регенерационных растворов ( $\text{pH} \leq 1.5$ ) в сильнощелочные ( $\text{pH} \geq 11$ ) для проведения отдувки. По факту расход составлял 25 дм<sup>3</sup> 46%-ного раствора NaOH на 1 м<sup>3</sup> сбросной воды.

#### ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ АММИАКА

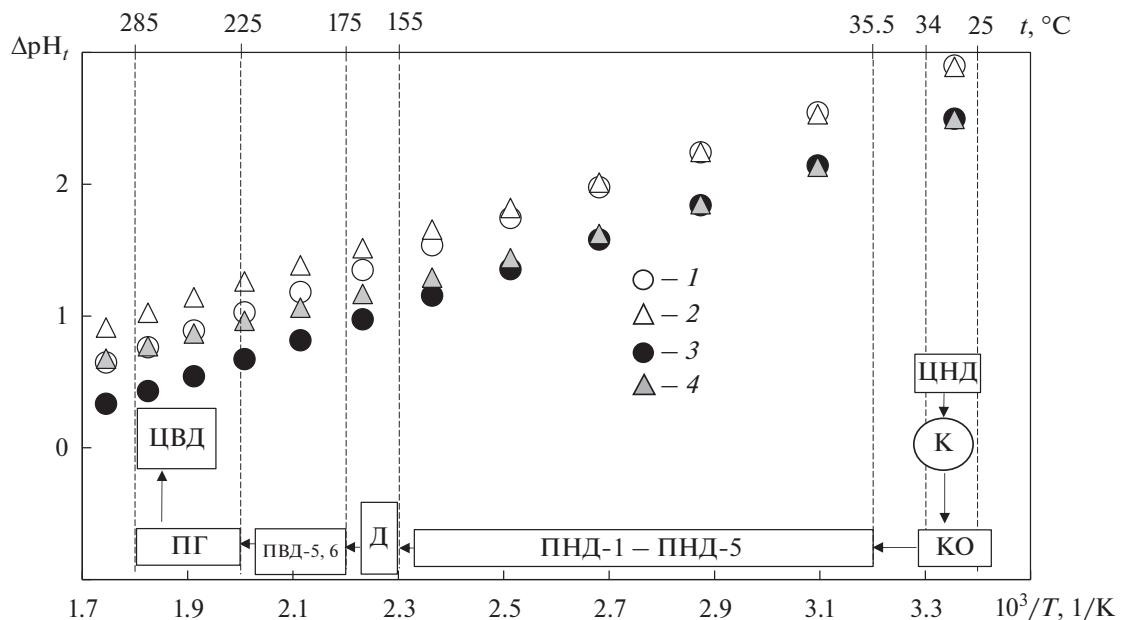
На зарубежных АЭС с реакторами PWR прослеживается тенденция отказа от аммиака в качестве средства поддержания ВХР II контура [10, 11]. Если по данным за 2014 г. около 20% энергоблоков работали при ВХР с использованием этиanolамина и аммиака (рис. 3, а) [10], то с 2016 г. энергоблоки с таким ВХР уже не функционируют и более половины всех энергоблоков работают с применением этиanolамина в качестве единственного ингибитора, а часть энергоблоков – с дозированием в питательную воду различных аминов, включая диметиламин (рис. 3, б) [11].

По сравнению с аммиаком диметиламин имеет преимущества такие как высокие коэффициент распределения между паровой и жидкой фазами и константа диссоциации [12]. Комбинация диметиламина с этиanolамином обеспечит большое значение  $\text{pH}_t$  при рабочих температурах среды II контура  $t$ .

Оптимальным критерием минимизации общей коррозии и эрозионно-коррозионного износа является следующее теоретическое условие [13]:

$$\Delta\text{pH}_t = \text{pH}_{t_{\text{p.c}}} - \text{pH}_{t_{\text{n.c}}} \geq 1,$$

где  $\text{pH}_{t_{\text{p.c}}}$ ,  $\text{pH}_{t_{\text{n.c}}}$  – pH рабочей и нейтральной среды при температуре  $t$ .



**Рис. 4.** Зависимость  $\Delta p\text{H}_t$  теплоносителя во II контуре от температуры  $t$  в конденсатно-питательном тракте АЭС с ВВЭР-1200 при исходных значениях  $p\text{H}_{25} = 9.85$  (1, 2) и  $p\text{H}_{25} = 9.5$  (3, 4) и использовании для регулирования  $p\text{H}_{25}$  аммиака (1, 3) и диметиламина (2, 4).

$C_{\text{NH}_3}$ , мг/дм<sup>3</sup>: 1 – 7.5; 3 – 1.5;  $C_{\text{DMA}}$ , мг/дм<sup>3</sup>: 2 – 4.0; 4 – 1.5.

КО – конденсатоочистка; Д – деаэратор; К – конденсатор; ПВД-5, ПВД-6 – подогреватели высокого давления; ПГ – парогенератор; ПНД-1 – ПНД-5 – подогреватели низкого давления; ЦВД, ЦНД – цилиндры высокого и низкого давления

На рис. 4 для сравнения эффективности применения аммиака  $\text{NH}_3$  и диметиламина (DMA) при поддержании требуемого значения  $p\text{H}_t$  во II контуре приведена зависимость  $\Delta p\text{H}_t$  от температуры при одинаковых исходных значениях  $p\text{H}_{25}$ .

Наглядно видно, что при одинаковых концентрациях аммиака 1.5 мг/дм<sup>3</sup> ( $p\text{H}_{25} = 9.5$ ) соотношение  $\Delta p\text{H}_t \leq 1$  для раствора аммиака наступает примерно при 160°C (в зоне деаэратора), а для раствора диметиламина – при 225°C, т.е. на входе в парогенератор. Это означает, что при использовании аммиака питательный тракт от деаэратора до парогенератора будет подвержен большему коррозионному износу, чем при использовании диметиламина. При  $p\text{H}_{25} = 9.85$  требуется концентрация аммиака большая, чем концентрация диметиламина. И главное – соотношение  $\Delta p\text{H}_t \leq 1$  для раствора с аммиаком ( $C_{\text{NH}_3} = 7.5$  мг/дм<sup>3</sup>) наступает при 225°C, а для раствора диметиламина ( $C_{\text{DMA}} = 4$  мг/дм<sup>3</sup>) после 285°C. Это означает, что при применении DMA кроме конденсатно-питательного тракта защищен также и паровой тракт.

Сопоставление результатов показывает, что при водно-химическом режиме с заменой аммиака на диметиламин можно обеспечить меньшую концентрацию продуктов коррозии железа во II контуре АЭС с ВВЭР.

Применение диметиламина позволит исключить стадию очистки сбросных растворов от аммиака, поскольку DMA, так же как и этианоламин, может быть удален с помощью одного из уже апробированных методов: озонированием в сочетании с пероксидом водорода и ультрафиолетовым облучением или методом Фентона [3, 4].

Содержание диметиламина в сточных водах после регенерации фильтров будет почти в 100 раз меньше, чем содержание аммиака, и не превысит 20 кг/год, общий сброс этианоламина и диметиламина после очистки составит не более 50 кг/год, что в пересчете на общий азот не превышает 11 кг/год и удовлетворяет требованиям регулирующих органов большинства стран [9].

Для подтверждения возможности использования ВХР с коррекционной обработкой рабочей среды II контура этианоламином в сочетании с диметиламином требуется углубленная проработка процесса, включая проведение опытно-промышленных испытаний на действующем энергоблоке АЭС с ВВЭР.

Водно-химический режим II контура может быть также основан на применении этианоламина в качестве единственного ингибитора при условии замены части конструкционных материалов на стали с повышенным содержанием хрома (от 2.0 до 2.5%), что позволит обеспечить

минимальную скорость коррозии при меньших значениях pH [14]. Благодаря применению такого режима будут исключены сброс аммиака в атмосферу и его неблагоприятное влияние на окружающую среду, однако возможность его реализации должна быть подтверждена технико-экономической оценкой.

## ВЫВОДЫ

1. Применяемый на АЭС с ВВЭР-1200 аммиачно-этаноламиновый водно-химический режим показал высокую эффективность в обеспечении низких значений скорости коррозии, массопереноса и роста отложений продуктов коррозии на теплопередающих поверхностях, однако для удаления этаноламина и аммиака из сточных вод, образующихся в процессе эксплуатации, необходимо создание дорогостоящих и сложных в эксплуатации очистных установок.

2. Результаты эксплуатации на Белорусской АЭС пилотной установки по очистке регенерационных растворов подтвердили ее эффективность в обеспечении концентраций этаноламина и аммиака в сточных водах, не превышающих предельно допустимых значений. Однако единственным способом удаления аммиака из воды является его отдувка в атмосферу, а это ведет к весьма значительной экологической нагрузке на окружающую воздушную среду.

3. Рекомендуется при разработке новых проектов АЭС с ВВЭР исключить аммиак из числа реагентов, применяемых при организации ВХР, и рассмотреть возможность (после проведения опытно-промышленных испытаний) использования во II контуре водно-химического режима с этаноламином и диметиламином.

4. Целесообразно исследовать перспективы применения этаноламина в качестве единственного реагента при условии замены части конструкционных материалов II контура на стали с повышенным содержанием хрома.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Результаты** применения аммиачно-этаноламинового ВХР во II контуре энергоблоков ВВЭР-1200 / В.Г. Крицкий, А.В. Гаврилов, Н.А. Прохоров, Е.А. Моткова, В.В. Быкова, А.Л. Богданов // Теплоэнергетика. 2024. № 11. С. (в печати).
2. **Нормативы** качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: Приказ Минсельхоза РФ от 13.12.2016 № 552. Ред. от 22.08.2023 № 687. [Электрон. ресурс.] <http://www.pravo.gov.ru>. Офиц. интернет-портал правовой информации. 16.01.2017. № 0001201701160006.
3. **Технология** удаления этаноламина из регенерационных вод блочных обессоливающих установок АЭС с ВВЭР на основе использования эффективных окислительных процессов / С.В. Изюмов, Е.Ю. Щекотов, Д.Е. Щекотов, В.Ф. Тяпков // Сб. трудов 8-й Междунар. науч.-техн. конф. "Водно-химический режим АЭС". Москва, 23–25 октября 2012 г. С. 19–21.
4. **Очистка** сточных вод от этаноламина / А.В. Андреев, Н.А. Прохоров, С.Н. Шибков, Ю.М. Кащеев, Н.М. Папурин, В.В. Сергеев // Экология производства. 2011. № 3. С. 81–84.
5. **Родионов А.И., Клужин В.Н., Торочешников Н.С.** Техника защиты окружающей среды. М.: Химия, 1989.
6. **СанПиН 1.2.3685-21.** Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. М.: Главный государственный санитарный врач РФ, 2021.
7. Directive 2001/81/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on national emission ceilings for certain atmospheric pollutants // Official J. European Communities. 2001. L 309. P. 22–30.
8. **Распоряжение** Правительства РФ от 20.10.2023 № 2909-р (ред. от 23.12.2023) "Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды и признании утратившими силу некоторых Постановлений Правительства РФ".
9. **Гаврилов А.В., Прохоров Н.А., Крицкий В.Г.** Учет экологических аспектов при оптимизации водно-химического режима 2-го контура АЭС с ВВЭР // Атомная энергия. 2018. Т. 124. Вып. 4. С. 214–219.
10. **BWR and PWR chemistry operating experience and perspectives** / K. Fruzzetti, S. Garcia, N. Lynch, R. Reid // Proc. of the Nuclear Plant Chemistry Conf. 2014 (NPC 2014). Intern. Conf. on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems. Sapporo, Japan, 26–31 Oct. 2014. V. 1.
11. **Chemistry control to meet the demands of modern nuclear power plant operation** / Daniel M. Wells, Keith Fruzzetti, Susan Garcia, Joel McElrath // Proc. of the 20th NPC Intern. Conf. Brighton, United Kingdom. 2–7 Oct. 2016. Paper No. 02.
12. **Cobble J., Turner P.** PWR advanced all-volatile treatment additives, by-products, and boric acid. EPRI TR-100755, 1992.
13. **Моделирование** миграции продуктов коррозии во II контуре АЭС с ВВЭР-1200 / В.Г. Крицкий, И.Г. Березина, А.В. Гаврилов, Е.А. Моткова, Е.В. Зеленина, Н.А. Прохоров, С.П. Горбатенко, А.А. Цицер // Теплоэнергетика. 2016. № 4. С. 72–80. <https://doi.org/10.1134/S0040363616040044>
14. **Влияние** легирования сталей на их эрозионно-коррозионный износ в контурах АЭС с ВВЭР / В.Г. Крицкий, А.В. Гаврилов, Н.А. Прохоров, Е.А. Моткова // Теплоэнергетика. 2022. № 8. С. 82–90. <https://doi.org/10.56304/S0040363622080033>

## Environmental Consequences of Using Ammonia-Ethanolamine Water Chemistry in the Second Circuit of VVER-1200 Nuclear Power Plants

V. G. Kritsky<sup>a</sup>, \*, A. V. Gavrilov<sup>a</sup>, N. A. Prokhorov<sup>a</sup>, E. A. Motkova<sup>a</sup>,  
N. A. Pelageecheva<sup>a</sup>, M. S. Shvaleva<sup>a</sup>, and A. V. Karpov<sup>b</sup>

<sup>a</sup>AO Atomenergoproekt, Saint Petersburg, 197183 Russia

<sup>b</sup>OOO Spetsproekt, St. Petersburg, 190005 Russia

\*e-mail: kritsky@spbaep.ru

**Abstract**—The ammonia–ethanolamine water chemistry regime used at NPPs with VVER-1200 ensures low rates of corrosion, mass transfer, and growth of corrosion product deposits. The content of corrosion products in the feedwater of the steam generator is less than 1  $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ . This significantly increases the period between flushing the steam generator to remove deposits. However, ethanolamine and ammonia are absorbed by the cationite in the ion-exchange filters of the second circuit purification systems, which leads to the need to regenerate the cationite and continuously dose reagents to maintain the required pH value in the feedwater. Waste solutions from regeneration containing ethanolamine and large amounts of ammonia must be treated to ensure that the concentrations of these substances do not exceed maximum permissible values when discharged into the environment. To remove ethanolamine and ammonia from regeneration solutions, special installations are created, the operation of which is based on various principles. A pilot plant for cleaning regeneration solutions was manufactured and installed at the Belarusian NPP with VVER-1200. An analysis of the pilot plant's operation showed that it successfully fulfills its function of protecting the aquatic environment but, at the same time, it is forced to release a significant amount of ammonia into the surrounding air. Removing ammonia is energy-consuming, environmentally unsafe, and requires the additional use of chemical reagents. In this regard, the water-chemical regime of the second circuit without ammonia is very promising. Possible options could be either switching from ammonia to dimethylamine or using ethanolamine as the only corrective reagent with the replacement of some of the structural materials of the second circuit with steels with a high chromium content, which have higher corrosion resistance compared to those currently used. Both options will simplify the wastewater treatment technology and reduce the environmental impact while maintaining the low corrosion rates achieved by using the ammonia–ethanolamine water chemistry regime.

**Keywords:** water chemistry, VVER-1200, ammonia, ethanolamine, dimethylamine, mass transfer, corrosion products, regeneration solution purification unit