

2/3 толщины стенки трубопровода следует использовать зависимость

$$P(x) = 1 - \exp \left[-A \left(\frac{1,11 + 5x^4}{0,8 - x} x \right) \right], \quad (3)$$

где $x = a/h \leq 2/3$ — относительная глубина дефекта; h — толщина стенки трубопровода, мм; A — параметр, зависящий от напряжения, механических и прочностных свойств материала, определяемый из формулы (3) при $x = 2/3$, $A = -0,095 \ln[1 - P(2/3)]$, где $P(2/3)$ — вероятность течи или разрыва при начальной глубине дефекта (2/3 от толщины стенки).

Представленный графический материал и расчет по формулам (2) и (3) позволяют оценивать вероятности течи и разрыва с учетом и без учета неразрушающего контроля в зависимости от таких характеристик, как напряжение, число и размеры дефектов, в диапазоне их изменения, охватывающем практически все возможные в эксплуатации значения указанных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Общие** положения обеспечения безопасности атомных станций. НП-001-15. М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2015, 72 с.
2. **Трубопроводы** атомных станций. Концепция «течь перед разрушением». ГОСТ Р 58328-2018. М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2018, 46 с.
3. **Development** and application of level 1 probabilistic safety assessment for nuclear power plants: specific safety guide. SSG-3. Vienna, Austria: IAEA, 2010, 192 p.
4. **Development** and application of level 2 probabilistic safety assessment for nuclear power plants: specific safety guide. SSG-4. Vienna, Austria: IAEA, 2010, 86 p.
5. **Лоскутов О.Д.** Аннотация программы МАВР-2.1. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1995, вып. 3, с. 70—73.
6. **Оборудование** и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля. ПНАЭ Г-7-010-89. М.: НТЦ ЯРБ, 2000, 164 с.
7. **Crutzen S., Herkenrath H., Jehenson P. e. a.** Contribution of PISC to performance demonstration. — European Journal of NTD, 1992, v. 1, № 4, p. 54.
8. **Нормы** расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002-86. М.: Энергоатомиздат, 1989, 525 с.

Поступила в Редакцию 30.10.23

УДК 621.039.534

ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ ТЯЖЕЛОВОДНЫХ СИСТЕМ РЕАКТОРА ПИК

Воронина Т.В. (НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, г. Гатчина)

e-mail: voronina_tv@pnpi.nrcki.ru

В Петербургском институте ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» вводится в эксплуатацию высокопоточный исследовательский реактор ПИК. В его состав входят два тяжеловодных контура: тяжеловодного отражателя и жидкостного регулирования. Оба контура являются системами, важными для безопасности, поэтому вопрос организации их оптимального водно-химического режима актуален. Связано это с тем, что наиболее частой причиной неплановых остановок (до 80 %) ядерных установок является коррозионное повреждение

оборудования, обусловленное отклонениями в поддержании водно-химического режима [1]. Важным условием его обеспечения становится достоверный и оперативный химический контроль теплоносителя. Такой контроль может быть организован с учетом физико-химических особенностей тяжелой воды (D₂O) при условии автоматизации анализа и выполнения его в безотборном онлайн-режиме.

Обоснование выбора контролируемых химических показателей тяжеловодных теплоносителей и особенности их нормирования. Объем химического контроля тяжелой воды

контура тяжеловодного отражателя был установлен на основе проектных и эксплуатационных документов, но опыт, полученный на этапах энергопуска реактора, показал, что перечень контролируемых показателей и их нормы нуждаются в корректировке. Объем химического контроля теплоносителя контура жидкостного регулирования первоначально существующими документами определен не был, потому что теплоносителем этого контура сначала являлся раствор нитрата гадолиния, впоследствии замененный на тяжелую воду. Перечень контролируемых показателей и их нормы необходимо было определить до заполнения системы. При выполнении этой работы учитывали возможные источники как поступления примесей в теплоноситель, так

и их образования внутри него при эксплуатации реактора. Для этого необходимо было знать условия эксплуатации, объем теплоносителя, перечень конструкционных материалов, состав и объем газовой подушки, технологии очистки. Системы реактора ПИК, использующие в качестве теплоносителя тяжелую воду, имеют заметные технологические отличия. Исходя из данных табл. 1 оценили основные источники поступления загрязнений и предложили перечень контролируемых химических показателей для теплоносителей обоих контуров (табл. 2).

Для тяжеловодных теплоносителей необходимо организовать контроль изотопного состава, который должен включать в себя измерение концентрации дейтерия / протия, активности трития и долгоживущих продуктов коррозии.

Таблица 1. Основные параметры систем реактора ПИК

Параметр	Контур	
	тяжеловодного отражателя	жидкостного регулирования
Теплоноситель	Тяжелая вода (не менее 99,0%)	Тяжелая вода (не менее 90,0%)
Объем контура, м ³	25,2	2,6
Избыточное давление, МПа	0,3	1,3
Температура теплоносителя на входе и выходе в (из) бак тяжеловодного отражателя / в (из) щелевой зазор жидкостного регулирования, °С	50/60	
Газ в компенсаторе объема	Гелий	Азот
Конструкционные материалы	Коррозионно-стойкая сталь марки 12Х18Н10Т и циркониевые и алюминевые сплавы АД1 и АМГЗ	Коррозионно-стойкие стали марок 12Х18Н10Т и 08Х18Н10Т
Система очистки	Выпарной аппарат и ионообменные фильтры	Выпарной аппарат и патронный перлитный фильтр

Таблица 2. Основные источники поступления загрязнений и контролируемые химические показатели тяжеловодных контуров

Вид загрязнения	Источники поступления	Контролируемые показатели
Растворимые примеси	Вода первичного заполнения и подпитки системы, радиоллиз. Деструкция ионообменных смол химводоочистки*	Удельная электропроводность, показатель pD , массовая концентрация хлоридов, сульфатов, нитратов, фторидов, перекиси водорода / дейтерия, общая жесткость, окисляемость
Продукты коррозии и нерастворимые примеси	Вода первичного заполнения и подпитки системы, недомытые монтажные загрязнения, коррозия конструкционных материалов	Прозрачность, массовая концентрация железа, меди, кремния, объемная активность по продуктам коррозии. Массовая концентрация алюминия*
Растворенные газы	Вода первичного заполнения и подпитки системы, радиоллиз	Концентрация растворенных кислорода и водорода / дейтерия
*Только для контура тяжеловодного отражателя		

При нормировании химических показателей тяжеловодных теплоносителей необходимо учи-

тывать физико-химические особенности тяжелой воды. Масса ее молекулы на 11% превышает массу

молекулы легкой воды (H_2O). Это приводит к различиям в их физических, химических и биологических свойствах, некоторые из которых приведены в табл. 3.

Ионное произведение (константа ионизации) свидетельствует, что тяжелая вода слабее ионизирована, чем легкая. Учитывая, что теплоноситель тяжеловодный, контролировать целесообразно не показатель pH , а pD . Нейтральный показатель pD для тяжелой воды равен 7,4 [2].

Таблица 3. Сравнение физико-химических свойств воды [3—5]

Показатель	Легкая вода	Тяжелая вода
Молекулярная масса, а. е. м.	18,015	20,028
Плотность при 25 °С, г/мл	0,997	1,104
Температура (при атмосферном давлении), °С:		
кипения	100,00	101,43
плавления	0,000	3,813
Относительная вязкость при 25 °С	1,000	1,232
Константа диссоциации (ионное произведение воды)	$1,1 \cdot 10^{-14}$	$1,35 \cdot 10^{-15}$
Подвижность ионов при 25 °С:		
K^+	64,2	52,5
Na^+	43,2	34,9
Cl^-	65,2	53,4
NO_3^-	61,6	51,0

Подвижность (предельная молярная проводимость) ионов тяжелой воды D^+ и OD^- в 1,4 раза ниже, чем подвижность ионов легкой воды H^+ и OH^- [3]. Следовательно, удельная электропроводность тяжелой воды будет ниже, чем легкой. Электропроводность абсолютно чистой легкой воды при нейтральном pH , равном 7,0, по расчету составила 0,055 мкСм/см, а абсолютно чистой тяжелой при нейтральном pD , равном 7,4, — 0,014 мкСм/см. Подвижность катионов (калия, натрия и др.), анионов (хлоридов, нитратов и др.) в тяжелой воде ниже, чем в легкой, в 1,2 раза [4]. Можно утверждать, что в тяжелой воде при равной удельной электропроводности содержание растворимых примесей будет в 1,2 раза выше, чем в легкой.

На фотометрические и титриметрические измерения таких химических показателей воды, как массовая концентрация железа, алюминия и меди,

окисляемость и общая жесткость, различия между тяжелой и легкой водой не влияют. При кондуктометрических и потенциометрических измерениях электропроводности и показателя pD необходимо учитывать особенности тяжелой воды. Ее лабораторный контроль должен быть организован на специально выделенном для этих целей оборудовании (кондуктометре, pH -метре, хлоридометре и др.), а градуировку приборов необходимо выполнять на тяжелой воде.

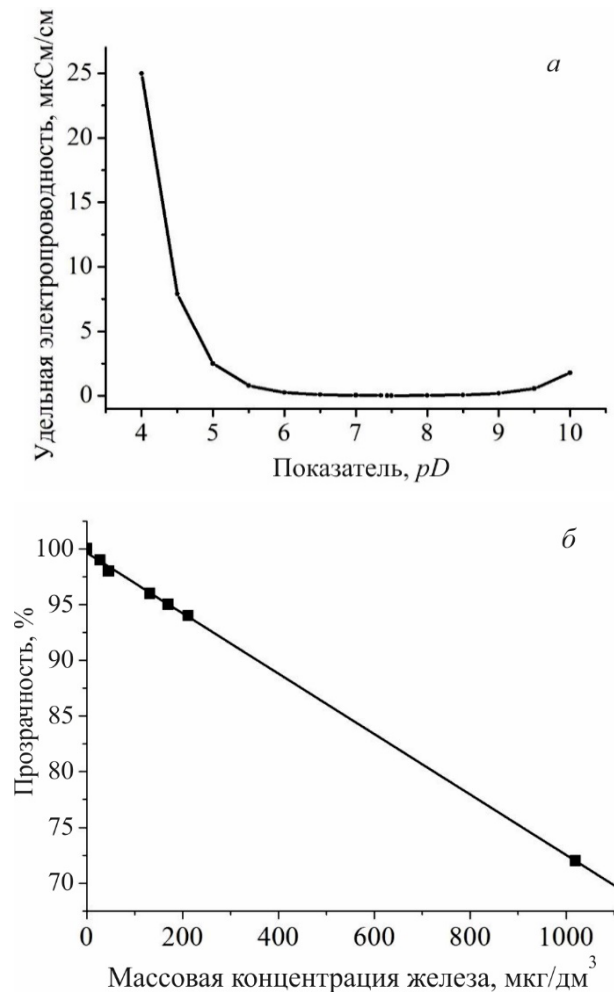
Более чем десятилетний опыт химического контроля теплоносителей реактора ПИК позволяет утверждать, что между контролируемыми химическими показателями существуют корреляции. Это было учтено при нормировании. Важнейшим показателем, характеризующим химическую чистоту теплоносителя, является удельная электрическая проводимость, которую рассчитывают по формуле

$$\chi = \sum a_i \lambda_i,$$

где χ — удельная электрическая проводимость, мкСм/см; a_i — молярная концентрация (активность) иона, моль/дм³; λ_i — предельная молярная проводимость иона при температуре 25 °С, (мкСм · см²/моль).

Удельная электропроводность зависит от показателя pD и концентрации ионных примесей в теплоносителе, причем влияние последних в интервале установленных значений предельно допустимой концентрации 50—100 мкг/дм³ ниже, чем влияние отклонения показателя pD от нейтрального значения. Поскольку в воде тяжеловодного отражателя расположены экспериментальные каналы, изготовленные из алюминиевых сплавов АД1 и АМг3, нормируемый диапазон показателя pD составляет 5,0—7,0. Поэтому предельно допустимая удельная электропроводность должна быть не менее 3—4 мкСм/см, так как расчетная электропроводность идеально чистой тяжелой воды при pD , равном 5,0, составляет 2,5 мкСм/см только за счет ионов D^+ и OD^- . Также для тяжеловодного отражателя была установлена линейная зависимость между содержанием продуктов коррозии по железу и прозрачностью, отраженная на рисунке:

$\Pi = 100 - 0,07C(\text{Fe})$, где Π — прозрачность, %; $C(\text{Fe})$ — массовая концентрация железа, мкг/дм^3 .



Изменение удельной электропроводности тяжелой воды в зависимости от pD (а), а также прозрачности от концентрации железа (б)

По аналогии с теплоносителем первого контура установили диапазон допустимых значений контролируемых химических показателей тяжеловодных теплоносителей реактора ПИК [6], учли особенности тяжелой воды и взаимозависимости между контролируемыми показателями: удельной электропроводностью и показателем pD , прозрачностью и концентрацией железа. Нормы, разработанные для тяжеловодных теплоносителей, с 2022 года введены в действие для реактора ПИК и обеспечивают безопасную эксплуатацию его контуров: тяжеловодного отражателя и жидкостного регулирования.

Автоматизированный химический контроль тяжелой воды. Известно, что при экс-

плуатации тяжеловодных ядерных установок значительная часть (до 40%) дозовой нагрузки на персонал реактора обусловлена наличием трития. Поскольку все работы с тяжелой водой, включая химический контроль, являются радиационно опасными, для реактора ПИК разработана автоматизированная система контроля изотопного и химического состава тяжелой воды [7]. В отличие от существующих легководных систем автоматического химического контроля эта система обеспечит возврат тяжелой воды обратно в контур тяжеловодного отражателя. В настоящее время не имеющая отечественных аналогов автоматизированная система пробоотбора и анализа тяжелой воды смонтирована и вводится в эксплуатацию. Система организована на байпасной линии контура тяжеловодного отражателя, возврат тяжелой воды осуществляется циркуляционными насосами в контур или рабочие баки. В онлайн-режиме будут контролировать восемь показателей тяжелой воды:

непрерывно: концентрацию дейтерия, удельную электропроводность, показатель pD , концентрацию растворенного кислорода и водорода, мутность;

периодически (один раз в сутки): концентрацию хлорид-ионов, объемную активность трития.

Для контроля таких химических показателей тяжелой воды, как удельная электропроводность, показатель pH , концентрация растворенного кислорода и водорода, использованы отечественные проточные анализаторы ООО «Взор» (г. Нижний Новгород), которые широко применяются на АЭС. Для измерения концентрации хлоридов в состав системы включили хлориномер ХА-06 производства ООО «ЭЛП» (г. Санкт-Петербург), а для контроля мутности — сигнализатор мутности ПОТОК-СМТ(Н) производства ООО «НПП "Аквастандарт"» (г. Севастополь). Для контроля изотопного состава тяжелой воды специалисты ПИЯФ адаптировали проточные датчики зарубежного производства: фурье-спектрометр Matrix-F (Брукер, Bruker) и проточный радиометр Wilma (ЛабЛоджик, LabLogic). Оба прибора внесены

в реестр средств измерения Российской Федерации. Для учета физико-химических особенностей тяжелой воды с помощью анализаторов автоматизированной системы была определена разница при измерении удельной электропроводности легкой и тяжелой воды (табл. 4).

зировавшей системы была определена разница при измерении удельной электропроводности легкой и тяжелой воды (табл. 4).

Таблица 4. Сравнение результатов измерения электропроводности воды

Контрольный раствор	Массовая концентрация хлорида натрия, г/дм ³	Удельная электропроводность, мкСм/см		Разница измерения, мкСм/см	Относительная разница измерения, %
		Легкая вода	Тяжелая вода		
Первый	0,059	1160 ± 23	964 ± 19	196 ± 30	17
Второй	0,006	121 ± 2	101 ± 2	20 ± 3	17

Экспериментально, используя проточные анализаторы автоматизированной системы пробоотбора и анализа тяжелой воды, показано, что при равном солесодержании показания кондуктометров для тяжелой воды ниже, чем для легкой, на 17 %. Следовательно, при равном значении измеренной удельной электропроводности содержание ионных примесей в тяжелой воде будет в 1,17 раза выше, чем в легкой [8]. Запланировано экспериментальное определение разницы между значениями показателей pH и pD .

Заключение. На этапах энергетического пуска реактора ПИК определен объем химического контроля для тяжеловодных теплоносителей реактора с учетом физико-химических особенностей тяжелой воды. Обоснованность предложенных норм для контролируемых химических показателей была подтверждена на этапе ввода в эксплуатацию реактора. Создана автоматизированная система пробоотбора и анализа тяжелой воды, которая позволит в онлайн-режиме контролировать восемь показателей, включая концентрацию дейтерия в контуре тяжеловодного отражателя, обеспечит возврат тяжелой воды обратно в контур, повысит оперативность химического контроля, исключит человеческий фактор при технологическом контроле и снизит дозовую нагрузку на персонал лаборатории. На базе проточных анализаторов системы экспериментально в лабораторных условиях установлена разница в показаниях кондуктометров при измерении удельной электропроводности

легко- и тяжеловодных растворов с равным солесодержанием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крицкий В.Г. Проблемы коррозии и водно-химических режимов АЭС. СПб: Синто, 1996, 263 с.
2. Stefanescu I., Chitu, A. Measuring the pD of heavy water solutions [Electronic resource]. — In: Proc. of the Scientific symposium on advances in cryogenics and isotope separation, Calimanesti, Romania, 1996, p. 18. Website of IAEA. Access mode: by subscription. URL: <https://inis.iaea.org/search/searchsinglerecord.aspx?recordsFor=SingleRecord&RN=30055449> (date of the application 06.10.2023).
3. Барон Н.М. Краткий справочник физико-химических величин. Под ред. А.А. Равделя, А.М. Пономаревой. Изд. 10-е, доп. и перераб. СПб: Изд-во «Иван Федоров», 2003, 240 с.
4. Киршенбаум И. Тяжелая вода. Пер. с англ. И. Киршенбаум. М.: Издательство иностранной литературы, 1953, 437 с.
5. Некрасов Б.В. Основы общей химии: в 3 т. Т. 1. М: Химия, 1973, 656 с.
6. Воронина Т.В. Совершенствование водно-химического режима контура жидкостного регулирования реактора ПИК. — Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок, 2021, № 1 (23), с. 50—61.
7. Воронина Т.В., Тугушева Д.Ю. Автоматизированная система пробоотбора и анализа тяжелой воды на реакторе ПИК. — Энергетик, 2020, № 4, с. 20—22.
8. Воронина Т.В., Григорьев П.А., Каверзина А.А., Климов М.Ю. Автоматизированная система пробоотбора и анализа тяжелой воды на реакторе ПИК. — Сб. докладов Пятнадцатой международной школы молодых ученых и специалистов им. А.А. Курдюмова (IHISM'22 Junior), г. Окуловка, 03—09 июля 2022 г. Саров: ФГУП «РФЯЦ — ВНИИЭФ», с. 240—259.

Поступила в Редакцию 02.11.23