

ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И  
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ  
NUCLEAR, RADIATION AND  
ENVIRONMENTAL SAFETY

УДК УДК 628.4.047 : 621.311.25

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-01>

EDN FNSFJI

Оригинальная статья / Original paper



**Исследование воздействия физико-химических факторов при  
коррекционной обработке дебалансных вод АЭС с целью обеспечения  
соответствия кондиционированных радиоактивных отходов  
нормативным требованиям**

**В.П. Поваров<sup>1</sup> , С.В. Росновский<sup>1</sup> , Э.С. Мельников<sup>1</sup>, М.Н. Литовченко<sup>1</sup>,  
В.С. Росновский<sup>1</sup>, Е.Л. Гордеева<sup>2</sup>, А.Н. Харин<sup>3</sup> , Х.С. Шихалиев<sup>4</sup>, М.А. Потапов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская АЭС», Воронежская обл., г. Нововоронеж,  
Российская Федерация

<sup>2</sup>ООО «Атом-Инфо», Воронежская обл., город Нововоронеж, Российская Федерация

<sup>3</sup>Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронежская обл.,  
г. Воронеж, Российская Федерация

<sup>4</sup>Воронежский государственный университет, Воронежская обл., г. Воронеж, Российская Федерация

 RosnovskySV@nvpp1.rosenergoatom.ru

**Аннотация.** Приведены результаты исследования процессов разложения поверхностно-активных веществ (ПАВ) в дебалансных водах атомных электростанций посредством коррекционной обработки перекисью водорода с последующим нагревом. Предложена методика определения вида и концентрации ПАВ в водных растворах на основе метода высокоэффективной жидкостной хроматографии в тандеме с масс-спектрометрией (ВЭЖХ-МС). Исследованы зависимости эффективности очистки раствора от исходной концентрации ПАВ, времени и температуры, а также от наличия дополнительного контаминатора (перманганата калия). Показано, что для обеспечения требований нормативных документов, при консервативном подходе, эффективность очистки от ПАВ должна составлять не менее 81 % при упаривании кубового остатка перед направлением на цементирование до 150 г/л и не менее 95 % – при упаривании до 450 г/л. Показано, что при дозировании пероксида водорода в водные растворы, разложение комплексобразующих веществ происходит в процессе переработки в диапазоне температур 80-100 градусов Цельсия. При температурах 80 °С и выше концентрация ПАВ достигает значения 62 %, что соответствует не превышению содержания ПАВ в кубовом остатке значения 1% (без консервативного подхода), после 4 часов обработки. Дозирование перманганата калия в очищаемую воду позволяет достичь фактически 100 %-ной очистки от ПАВ, не прибегая к нагреву воды до температуры кипения. Эффективность очистки от ПАВ до уровня содержания комплексобразующих веществ в кубовом остатке в пределах ниже 1 % достигается при дозировании перманганата калия спустя 70 мин после начала эксперимента, а при нагреве до 100 °С – менее, чем за 40 мин. Полученные результаты могут быть использованы при обосновании безопасности технологий обращения с РАО, применяемых в атомной энергетике.

**Ключевые слова:** дебалансные воды, пероксид, коррекционная обработка, высокоэффективная жидкостная хроматография, масс-спектрометрия, поверхностно-активные вещества, перманганат калия, АЭС.

**Для цитирования:** Поваров В.П., Росновский С.В., Мельников Э.С., Литовченко М.Н., Росновский В.С., Гордеева Е.Л., Харин А.Н., Шихалиев Х.С., Потапов М.А. Исследование воздействия физико-химических факторов при коррекционной обработке дебалансных вод АЭС с целью обеспечения соответствия кондиционированных радиоактивных отходов нормативным требованиям. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(4):5–18. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-01>

**For citation:** Povarov V.P., Rosnovsky S.V., Melnikov E.S., Litovchenko M.N., Rosnovsky V.S., Gordeeva E.L., Kharin A.N., Shikhaliev H.S., Potapov M.A. Investigation of the impact of the physical and chemical factors during correction treatment of NPP unbalance water to ensure compliance of conditioned radioactive waste with regulatory requirements. *Global nuclear safety*. 2024;14(4):5–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-01>

## Investigation of the impact of the physical and chemical factors during correction treatment of NPP unbalance water to ensure compliance of conditioned radioactive waste with regulatory requirements

Vladimir P. Povarov<sup>1</sup> , Sergey V. Rosnovskiy<sup>1</sup> , Eduard S. Melnikov<sup>1</sup>,  
Mikgail N. Litovchenko<sup>1</sup>, Victor S. Rosnovskiy<sup>1</sup>, Elena L. Gordeeva<sup>2</sup>,  
Alexey N. Kharin<sup>3</sup> , Khidmet S. Shikhaliev<sup>4</sup>, Mikhail A. Potapov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Novovoronezh NPP the branch of Rosenergoatom Concern JSC, Voronezh region, Novovoronezh, Russian Federation

<sup>2</sup> Atom-Info LLC, Voronezh region, Novovoronezh, Russian Federation

<sup>3</sup> Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh region, Voronezh, Russian Federation

<sup>4</sup> Voronezh State University, Voronezh region, Voronezh, Russian Federation

 RosnovskySV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

**Abstract.** The paper considers the results of a study of the decomposition of surfactants in the unbalanced waters of nuclear power plants by corrective treatment with hydrogen peroxide followed by heating. It proposes a method of determining the type and concentration of surfactants in aqueous solutions based on the method of high-performance liquid chromatography in tandem with mass spectrometry (HPLC-MS). The dependences of the purification efficiency of the solution on the initial concentration of surfactants, time and temperature as well as on the presence of an additional contaminant (potassium permanganate) are investigated. It is shown that in order to meet the requirements of regulatory documents with a conservative approach the efficiency of surfactant purification should be at least 81% when evaporating the cubic residue before cementing to 150 g/l and at least 95 % when evaporating to 450 g/l. Decomposition of complexing agents is shown to occur during processing in the temperature range of 80-100 degrees Celsius when hydrogen peroxide is dosed into aqueous solutions. The surfactant concentration reaches a value of 62 % at temperatures of 80 C and above which corresponds to the surfactant content in the cube residue not exceeding the value of 1 % (without conservative approach) after 4 hours of treatment. Dosing of potassium permanganate into the purified water allows to achieve virtually 100% purification from surfactants, without resorting to heating the water to boiling point. The efficiency of purification from surfactants to the level of complexing substances in the cubic residue in the range below 1 % is achieved by dosing potassium permanganate 70 minutes after the start of the experiment, and when heated to 100 C – in less than 40 minutes. The results obtained can be used to substantiate the safety of radioactive waste management technologies used in nuclear energy.

**Keywords:** unbalanced waters, peroxide, correction treatment, high-performance liquid chromatography, mass spectrometry, surfactants, potassium permanganate, nuclear power plants.

### Постановка задачи

В соответствии с требованиями нормативных документов<sup>1,2</sup> на энергоблоках АЭС российского дизайна применяются технологии переработки и кондиционирования дебалансных вод, основанные на методах упаривания, сорбции, цементирования и др.

<sup>1</sup> Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. НП-019-2015. Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 25 июня 2015 г. № 242. – Информационно-правовое обеспечение ГАРАНТ. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/71149074/> (дата обращения: 01.11.2024).

<sup>2</sup> Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. НП-093-14. Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 декабря 2014 г. № 572. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/70929586/> (дата обращения: 01.11.2024).

При этом химический состав дебалансных вод характеризуется широким спектром загрязнителей, в число которых, как правило, входят поверхностно-активные вещества (далее – ПАВ). ПАВ применяются при стирке спецодежды, дезактивации оборудования, помещений и т.д.

В соответствии с требованиями нормативных документов в области использования атомной энергии<sup>1,2,3</sup> при переработке и кондиционировании жидких радиоактивных отходов должны применяться методы, исключающие наличие в конечном продукте

<sup>3</sup> Рекомендации по порядку, объемам, методам и средствам контроля радиоактивных отходов в целях подтверждения их соответствия критериям приемлемости для захоронения. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. РБ-155-2020. – Режим доступа: <https://docs.secnrs.ru/documents/rbs/РБ-155-20/РБ-155-20.pdf> (дата обращения: 01.11.2024).

комплексообразующих веществ в количествах, превышающих установленные нормативные значения.

В соответствии с пунктом 19 НП-093-14, «содержание комплексообразующих веществ, которые могут образовывать растворимые в воде соединения с радионуклидами (комплексные соединения), обладающие повышенной подвижностью, должно быть исключено или ограничено таким образом, чтобы ограничить выход радионуклидов из упаковки РАО пределами, установленными в соответствии с настоящими федеральными нормами и правилами».

Содержание комплексообразующих веществ должно контролироваться для всех классов РАО (Приложение 2 к НП-093-14). При этом для РАО 2, 3, 4 классов непосредственно установлены численные ограничения по допустимому содержанию комплексообразующих веществ – «Не более 1 % от массы радиоактивного содержимого упаковки РАО» (Приложение 1 к НП-093-14).

Указанные ограничения обусловлены тем, что наличие в РАО поверхностно-активных веществ, во-первых, резко увеличивает скорость миграции радионуклидов в окружающей среде при разрушении радиационных упаковок; во-вторых, наличие ПАВ может существенно увеличивать скорость выщелачивания радионуклидов из цементной матрицы<sup>4</sup> [1,2]. Цементирование жидких радиоактивных отходов, как способ их подготовки к длительному хранению, используется во многих странах мира<sup>5</sup>. Каждый отход должен подвергаться различным испытаниям, например, устойчивости к выщелачиванию, разрушению [3]. Наличие ПАВ в цементе также приводит к уменьшению скорости его затвердевания [4]. Большинство макрокомпонентов радиоактивных отходов не являются инертными наполнителями, а могут всту-

пать во взаимодействие с вяжущим материалом, влияя на качество конечного продукта [5].

Одним из способов очистки от ПАВ дебалансных вод, образующихся на энергоблоках 1-2 НВАЭС-2, является коррекционная обработка пероксидом водорода с последующим нагревом.

При проведении экспертиз безопасности в ходе прохождения лицензионных процедур Нововоронежской АЭС были получены рекомендации о необходимости дополнительного обоснования эффективности технологии очистки вод спецрабочей от ПАВ путем коррекционной обработки пероксидом водорода с последующим нагревом с учетом наличия дополнительных видов загрязнений, не свойственных для дебалансных вод других отраслей промышленности, в частности, радиоактивных загрязнений, возможности наличия следов перманганата калия и т.д.

Известен ряд исследований, направленных на изучение механизмов взаимодействия ПАВ с пероксидом водорода в водных и органических средах [6].

Композиции «катионные ПАВ (далее – КПАВ) – гидропероксид» образуют динамические коллоидные системы, генерирующие свободные радикалы как в органической, так и в водных средах.

Генерирование радикалов в системе «КПАВ-гидропероксид» происходит благодаря каталитическому действию КПАВ, заметно уменьшающему энергию активации радикального распада гидропероксида.

Основными факторами, влияющими на скорость генерирования радикала в системах «КПАВ-гидропероксид», являются противоион КПАВ, реакционная среда, природа гидропероксида.

В ходе исследований получена количественная информация о коллоидных характеристиках катионных ПАВ и гидропероксидов и кинетических характеристиках генерирования радикалов системами ГПК-КПАВ и H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-КПАВ в водных и органических средах.

В отличие от КПАВ, анионные и неионные ПАВ не инициируют радикальный распад гидропероксидов. Эффект анионных ПАВ зависит от природы гидропероксида и ПАВ.

<sup>4</sup> Кондратьев Ю.И., Соколова О.А. Влияние добавки ПАВ на физико-химические свойства растворов для выщелачивания полиметаллических руд. – Инновации в науке и практике: сборник статей по материалам XVI Международной научно-практической конференции. В 3-х частях. – 2019. – С. 197–202.

<sup>5</sup> Radioactive waste management in Western Europe: a Review, XXIst Unipede International Congress. Sorrento, May 29–June 3. 1988.

В целом, коррекционная обработка пероксидом водорода во многих отраслях промышленности зарекомендовала себя как экономически эффективный, технологически несложный способ очистки водных сред от ПАВ различных видов.

В связи с вышеизложенным, АО «Концерн Росэнергоатом» было поручено филиалу «Нововоронежская АЭС» организовать разработку дополнительных обоснований безопасности с привлечением специализированных научных организаций.

Работы по данной тематике выполнялись ООО «Атом-Инфо» с привлечением исследовательских лабораторий и отдельных специалистов ВГУИТ, ВГУ, МГУ. Работы выполнялись в соответствии с Программой выполнения исследовательских работ по обоснованию разрушения органических комплексобразующих веществ в виде дезактивирующих средств и моющих растворов, утвержденной техническим руководством Заказчика. Программой предусмотрено проведение исследований как на реальных пробах дебалансных вод 1-2 блоков НВАЭС-2, так и на модельных растворах, имитирующих дебалансные воды с различной концентрацией ПАВ.

При проведении измерений использовалось оборудование аттестованных лабораторий субподрядных организаций (ФГБОУ ВО «ВГУ», МГУ им. Ломоносова и др.).

Проведение пробоотбора технологических сред из систем 1-2 энергоблоков НВАЭС-2 осуществлялось персоналом ЦОРО Нововоронежской АЭС совместно с персоналом ООО «АтомИнфо».

### **Методы исследования содержания ПАВ в водных пробах**

На сегодняшний день основными методами анализа ПАВ являются двухфазное и потенциометрическое титрование, гравиметрия и спектрофотометрия. Применение этих методов объясняется их простотой, дешевизной и возможностью в ряде случаев определить класс ПАВ. Однако эти методы имеют недостатки: неселективность по отношению к отдельным представителям ПАВ, неточность определения в связи с присутствием различных мешающих веществ, отсутствие воз-

можности оценить гомологическое распределение в сырье ПАВ. Таким образом, при помощи этих методов невозможно провести индивидуальную идентификацию ПАВ в сырье и готовой продукции. Для разделения и идентификации каждого отдельного компонента в смеси ПАВ и в пробе предпочтительными являются хроматографические методы – газовая хроматография (ГХ) или высокоэффективная жидкостная хроматография (далее – ВЭЖХ) в сочетании с различными типами детектирования [7]. Тем самым хроматография позволяет определять различные АПАВ (в том числе гомологи и изомеры, а также продукты биodeградации) в разнообразных объектах: моющих средствах, природных и сточных водах, почвах, пыли и др. Для хроматографических разделений ПАВ и продуктов их распада часто используют обращенно-фазовые колонки RP-18 [8,9] и RP-8 [10,11].

В работе показана высокая чувствительность, селективность и эффективность разделения компонентов ПАВ методом ОФ ВЭЖХ с применением трехкомпонентных подвижных фаз состава ацетонитрил/метанол/вода [12].

Одним из самых чувствительных методов анализа органических соединений является жидкостная хроматография в тандеме с масс-спектрометром. Данный метод позволяет определять органические соединения на уровне нг и пг [8,13–15].

Авторами [16] показано, что ультра высокоэффективная жидкостная хроматография в тандеме с масс-спектрометрией высокого разрешения позволяет помимо ионогенных ПАВ определять и неионогенные поверхностно-активные вещества с высокой чувствительностью.

Исходя из вышеизложенного видно, что для определения присутствия ПАВ в различных матрицах существует множество физико-химических методов. Многие методы имеют свои недостатки, однако самым чувствительным методом, позволяющим при этом охарактеризовать тип и структуру анализируемых поверхностно-активных веществ является обращенно-фазовая высокоэффективная жидкостная хроматография в тандеме с масс-спектрометрией.

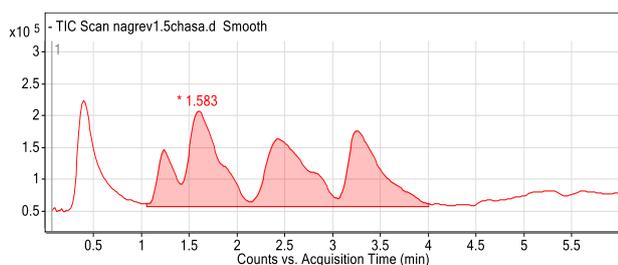
## Идентификация контаминатора

Для разработки методов и научных подходов для проведения данных исследовательских работ были проведены предварительные исследования.

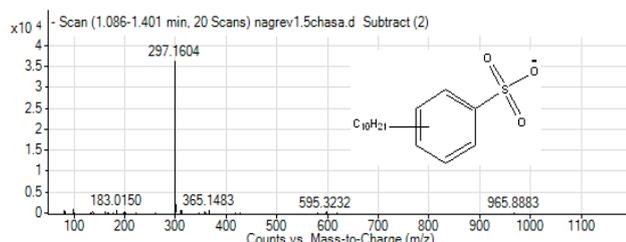
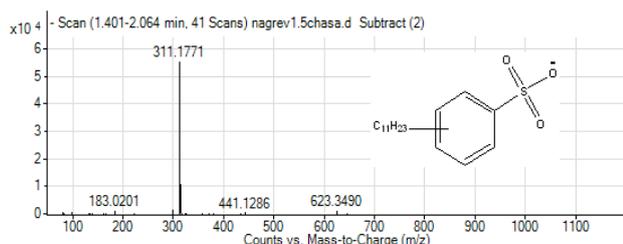
В исходном ТМС, используемом при стирке спецодежды на спецрабочей НВАЭС-2, подтверждено наличие следующих соединений:

- триполифосфата натрия (гравиметрическим методом, при помощи осаждения),
- сульфонола (методом ВЭЖХ с масс-спектрометрией) (рис. 1–3).

Исходя из масс-спектров, органическим ПАВ приписаны структуры, аналогичные показанным на представленных рисунках (1–3). Таким образом, согласно полученным данным, исходные соединения, вероятнее всего, находятся в форме натриевых солей.

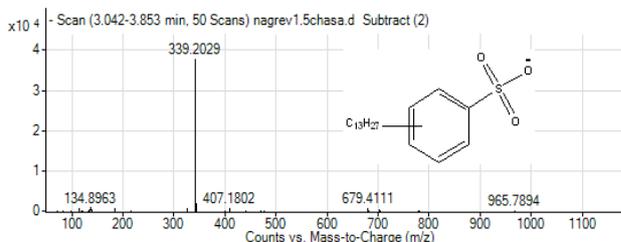
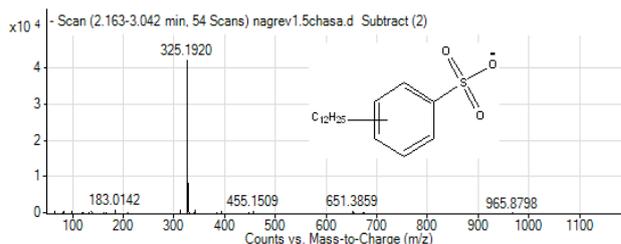


**Рисунок 1. Хромограмма ТМС**  
**Figure 1. Chromatogram of TMS**



**Рисунок 2. Масс-спектры анионов сульфонола с заместителями C10-C13 в ароматическом ядре (часть 1)**

**Figure 2. Mass spectra of sulfonol anions with C10-C13 substituents in the aromatic core (Part 1)**



**Рисунок 3. Масс-спектры анионов сульфонола с заместителями C10-C13 в ароматическом ядре (часть 2)**

**Figure 3. Mass spectra of sulfonol anions with C10-C13 substituents in the aromatic core (Part 2)**

## Методика измерений

Исследование содержания ПАВ в модельных образцах осуществляется посредством применения метода ВЭЖХ в тандеме с масс-спектрометрией (далее – ВЭЖХ-МС).

Как показано ранее ВЭЖХ-МС является универсальным методом разделения и детектирования соединений практически всех классов органических соединений. С помощью данного метода решаются задачи качественного и количественного состава различных смесей органического происхождения.

Используемое при лабораторных исследованиях оборудование:

- жидкостный хроматограф Agilent 1260 Infinity в тандеме с времяпролетным масс-спектрометром Agilent 6230 TOF LC/MS;
- масс-спектрометр Agilent 6230 TOF LC/MS с типом ионизации электроспрей.

Условия хромото-масс-спектрометрического анализа:

- колонка Agilent Zorbax Eclipse Plus Phenyl-Hexyl (2.1 x 50 mm; 1.8  $\mu$ m);
- объем вводимой пробы 7 мкл;
- скорость потока 0,4 мл/мин.;
- температура термостата колонок 35,0  $^{\circ}$ C;
- элюирование градиентное (табл. 1);

- время анализа 7 минут, далее промывка системы в течение 7 минут подвижной фазой как при старте анализа;
- метод ионизации – двойной электро-спрей (dual-ESI);
- сканирование в отрицательной полярности;
- напряжение на капилляре 3,5 кВ, фрагментаторе 191 В, скиммере 66 В, OctRF 750 В;
- газ осушитель азот;
- диапазон сканирования 50–2000 m/z;
- программное обеспечение MassHunter Qualitative Analysis, B.06.00, Agilent Tec.

**Таблица 1.** Параметры элюирования**Table 1.** Elution parameters

Время, мин	Вода (0,1 % муравьиной кислоты), %	Ацетонитрил (0,1 % муравьиной кислоты), %	Поток, мл/мин
0,0	55,0	45,0	0,4
1,0	40,0	60,0	0,4
3,0	0,0	100,0	0,4
7,0	0,0	100,0	0,4

Работы, связанные с построением и исследованием лабораторных модельных растворов жидких сред проводились на химическом факультете Воронежского государственного университета.

Работа с пробами жидких технологических сред проводилась по аттестованной Методике измерений массовой концентрации анионных ПАВ в питьевых, поверхностных и сточных водах экстракционно-фотометрическим методом. Методика утверждена федеральным бюджетным учреждением «Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия».

Применяемые средства измерений, оборудование и материалы:

- фотоэлектроколориметр или спектрофотометр любого типа, позволяющий измерять оптическую плотность при  $\lambda = 650$  нм;
- весы лабораторные специального класса точности с ценой деления не более 0,1 мг, наибольшим пределом взвешивания не более 210 г по ГОСТ Р 53228-2008;
- пипетки 1-2-2-5; 1-2-2-10 по ГОСТ 29227-91;
- колбы 2-50-2; 2-100-2 по ГОСТ 1770-74;

- цилиндры 1-25 по ГОСТ 1770-74;
- кюветы с толщиной оптического слоя 30 мм;
- воронки В-25-38 ХС по ГОСТ 25336-82;
- воронки делительные ВД-1-250 ХС по ГОСТ 25336-82;
- пробирки ПЗ-25 ХС по ГОСТ 25336-82;
- стаканы Н-1 - 1000 ТХС; Н-2 - 2000 ТХС по ГОСТ 25336-82.

Массовую концентрацию АПАВ,  $X$  (мг/дм<sup>3</sup>) в пробах рассчитывают по формуле (1):

$$X = (a \times 100) / V, \quad (1)$$

где  $a$  – массовая концентрация анионных поверхностно-активных веществ, найденная по градуировочному графику, мг/дм<sup>3</sup>;

100 – объем, до которого доводится проба, см<sup>3</sup>;

$V$  – объем пробы, взятый для анализа, см<sup>3</sup>.

Результат измерений по вышеуказанной методики в документах, предусматривающих его использование, может быть представлен в виде выражения (2):

$$X \pm 0,01 \times U \times X, \text{ (мг/дм}^3\text{)}, \quad (2)$$

где  $X$  – результат измерений массовой концентрации, установленный по п.10, мг/дм<sup>3</sup>;

$U$  – значение показателя точности измерений.

Исследования технологических сред проводили в Аналитическом центре МГУ им. М.В. Ломоносова.

Пробоподготовку проб жидких сред проводили в Лаборатории комплексных исследований Воронежского государственного университета.

### Отбор проб технологических сред

С целью подтверждения результатов, полученных при исследовании модельных растворов, программой исследований было предусмотрено проведение пробоотбора и исследований характеристик реальных технологических сред (дебалансных вод) из оборудования энергоблоков НВАЭС-2.

Отбор проб производился в маркированные пластиковые емкости объемом 10 л. Каждая емкость имела маркировку, позволяющую ее однозначно идентифицировать. После завершения пробоотбора емкость

плотно закрывается штатной крышкой с целью исключения распыливания при дальнейшей транспортировке.

При отборе проб оформлялись паспорта проб, в которых указывались:

- идентификационная маркировка емкости;
- объем пробы;
- дата пробоотбора;
- место пробоотбора, оборудование, система;
- ФИО, подпись лица, отобравшего пробу.

Из каждой системы было отобрано 3 пробы объемом 10 л каждая. Пробоотбор осуществляется персоналом ЦОРО НВАЭС под контролем представителя Исполнителя (ООО «АтомИнфо»). По согласованию с Заказчиком были установлены следующие точки пробоотбора:

– бак 10КРК30ВВ002-10УКС14R034. Проба отбиралась сверху через открытый люк;

– бак 10КРФ13ВВ002-10УКС10R041. Проба отбиралась путем открытия арматуры 10КУЕ10АА140, 113;

– бак 20КРК20ВВ002-20УКС04R043. Проба отбиралась сверху через открытый люк.

– бак 10КРФ13ВВ003-10УКС10R040. Проба отбиралась путем открытия арматуры 20КУЕ10АА141, 113;

– 00SRP60 (вода спецпрачечной) – 3 пробы по 10 л. Пробы отбирались в пом. 00УКС10R071 из бака 00SRP60ВВ002 путем открытия арматуры 00КУБ20АА102;

– 00SRP70 (вода дезактивации оборудования из здания 00УКУ) – 2 пробы по 10 л. Дополнительно была отобрана одна проба объемом 1 л для радиационного контроля перед отправкой за пределы НВАЭС. Пробы отбирались в пом. 00УКС21R036 из бака 00SRP70ВВ001 – путем открытия арматуры 00КУБ20АА106, 00КУБ20АА114;

– 00SRP70 (трапная вода из здания 00УКС) – 2 пробы по 10 л. Дополнительно была отобрана одна проба объемом 1 л для радиационного контроля перед отправкой за пределы НВАЭС. Пробы отбирались в пом.

00УКС21R036 из бака 00SRP70ВВ002 путем открытия арматуры 00КУБ20АА106, 00КУБ20АА114;

– 00SRP70 (с выпарного аппарата) – 2 пробы по 10 л. Дополнительно была отобрана одна проба объемом 1 л для радиационного контроля перед отправкой за пределы НВАЭС. Пробы отбирались в пом. 00УКС21R036, ВА 00SRP70АТ001 путем открытия арматуры 00КУБ20АА107, 0КУБ20АА108.

При выполнении пробоотбора было обеспечено соблюдение требований радиационной безопасности, установленных «Инструкцией по радиационной безопасности при эксплуатации НВАЭС», включая применение СИЗ, нарядо-допускной системы, меры по нераспространению радиоактивных загрязнений и т.д., а также требований охраны труда, действующих в атомной энергетике [10].

После пробоотбора персоналом ЛРК ОРБ НВАЭС были проведены измерения удельной активности гамма-излучающих радионуклидов и трития в каждой из отобранных проб. При проведении анализа радионуклидов в пробах исследуемых сред использовалось следующее измерительное оборудование:

– комплекс гамма-спектрометрический программно-аппаратный Эко ПАК-02-3;

– радиометр альфа- и бета-излучения спектрометрический «TRI-CARB 4910» (жидкостный сцинтилляционный спектрометр).

Результаты измерений были оформлены протоколами и актом, в котором были определены меры безопасности и порядок отправки проб для дальнейших исследований за территорией промплощадки НВАЭС.

### **Исследование модельных растворов**

С целью определения аналитических зависимостей разрушения органических комплексообразующих веществ в виде дезактивирующих средств и моющих растворов под действием, как только температуры, так и температуры совместно с химическими веществами, а также для разработки методов и научных подходов для проведения данных исследовательских работ эксперименты вы-

полнялись со специально приготовленными модельными растворами жидких сред с различными концентрациями ПАВ.

Для построения модельных растворов жидких сред, необходимых для экспериментов, использовалось техническое моющее средство порошкообразное специального назначения (ТМС) PAOLSRM-П, RM-П1 (ТУ 2381-001-28979913-2018).

При проведении экспериментов по деградации органических комплексообразующих веществ под действием высоких температур применялся пеногаситель полисилоксанового типа Пента-474 (ТУ 2229-094-40245042-2004), который дозировался в исследуемую пробу с целью снижения активного пенообразования, которое наблюдается при нагреве 60 °С и выше, что препятствует поддержанию постоянной температуры реакционной массы и может приводить к ингибированию окисления.

2,5 г твердого моющего средства взвешивают, результат взвешивания в граммах записывают до четвертого десятичного знака, переносят в мерную колбу вместимостью 250 см<sup>3</sup>, растворяют в воде, доводят объем раствора водой до метки и перемешивают (раствор 1). Фильтруют через сухой бумажный фильтр («синяя лента») в сухую колбу, отбрасывая первые порции фильтрата. 50 см<sup>3</sup> полученного фильтрата пипеткой переносят в стакан вместимостью 250 см<sup>3</sup> и добавляют

раствор с HCl = 0,5 моль/дм<sup>3</sup> до pH 3,6 (проверяют на pH-метре), перемешивая на магнитной мешалке. Добавляют 10 см<sup>3</sup> буферного раствора и приливают по каплям 12 см<sup>3</sup> раствора триэтилендиаминкобальта.

Все эксперименты по нагреву и дозированию реагентов проводились в стеклянных колбах, снабженных обратным холодильником, при энергичном перемешивании магнитной мешалкой (500 оборотов/мин).

В процессе нагрева выше 60 °С для снижения обильного пенообразования добавляли разбавленный в 10 раз кремнийорганический пеногаситель Пента-474 (ТУ 229-094-40245045-2004).

В экспериментах 1–3 использовались высококонцентрированные растворы ПАВ с целью проверки чувствительности методов анализа (концентрация ТМС – 45 г/л). В экспериментах 4–12 использовались растворы ПАВ с максимальной концентрацией, определенной проектной документацией спецрабочей НВАЭС-2 (2 г/л).

Общие сведения о подготовленных и использованных модельных растворах, последовательности воздействия на модельные растворы комбинированным воздействием пероксида, температуры, гидроксида натрия (катализатор), перманганата калия (дополнительный контаминатор трапных вод) приведены в таблице 2.

**Таблица 2.** Параметры модельных растворов  
**Table 2.** Parameters of model solutions

№ эксперимента	Условия эксперимента				
	<b>Концентрация ТМС – 4,5 г / 100 мл</b>				
Без добавления Перекиси водорода					
	Температура, Град	Время обработки, мин			
		90	120	240	420
1	T = 100 С				
Добавлен Пероксид водорода 15 мл / 100 мл					
2	T комн				
3	T = 60 С				
<b>Концентрация ТМС – 2 г/л</b>					
Добавлен Пероксид водорода 40 л на 2 м <sup>3</sup> (2 мл / 100 мл)					
	Температура, Град	Время обработки, мин			
		45	90	240	420
4	T комн				
5	T = 60 С				

№ эксперимента	Условия эксперимента			
6	T = 80 C			
7	T = 100 C			
Добавлено: - Пероксид водорода 40 л на 2 м <sup>3</sup> (2 мл / 100 мл) - Каталитическое количество 10% NaOH				
8	T = 60 C			
9	T = 80 C			
<b>Концентрация ТМС – 2 гр / 1 л</b>				
Добавлен Перманганат калия (KMnO <sub>4</sub> ) 5 гр / 1 л р-ра				
Температура, Град		Время обработки, мин		
		45	90	240
		360		
10	T комн			
11	T = 60 C			
12	T = 100 C			

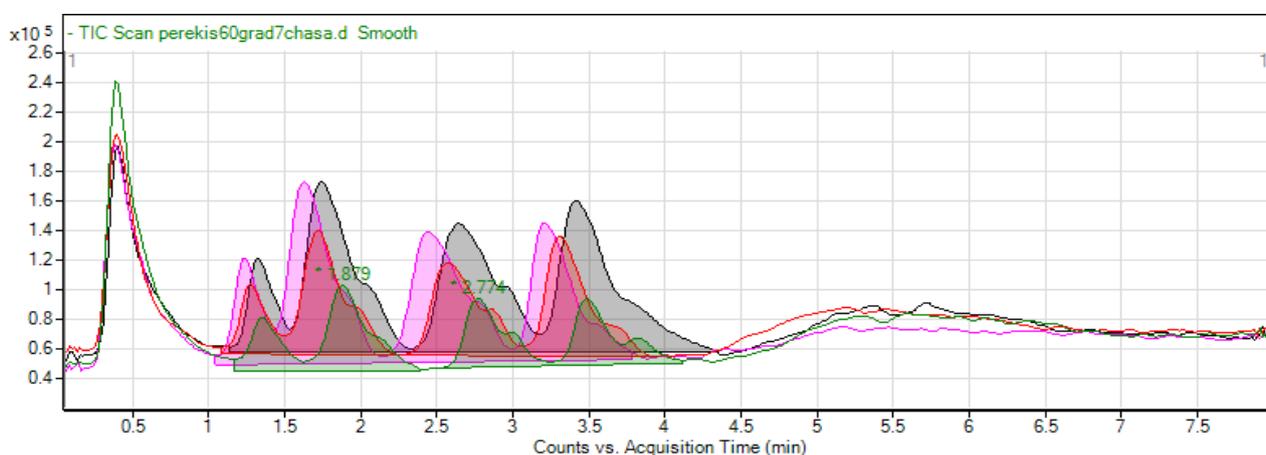
### Основные результаты исследований

Результаты экспериментов подтвердили высокую эффективность выбранного метода исследований для решения поставленной задачи.

В ходе экспериментов модельные растворы и реальные пробы подвергались коррекционной обработке с последующим нагревом. Хроматограммы, полученные для

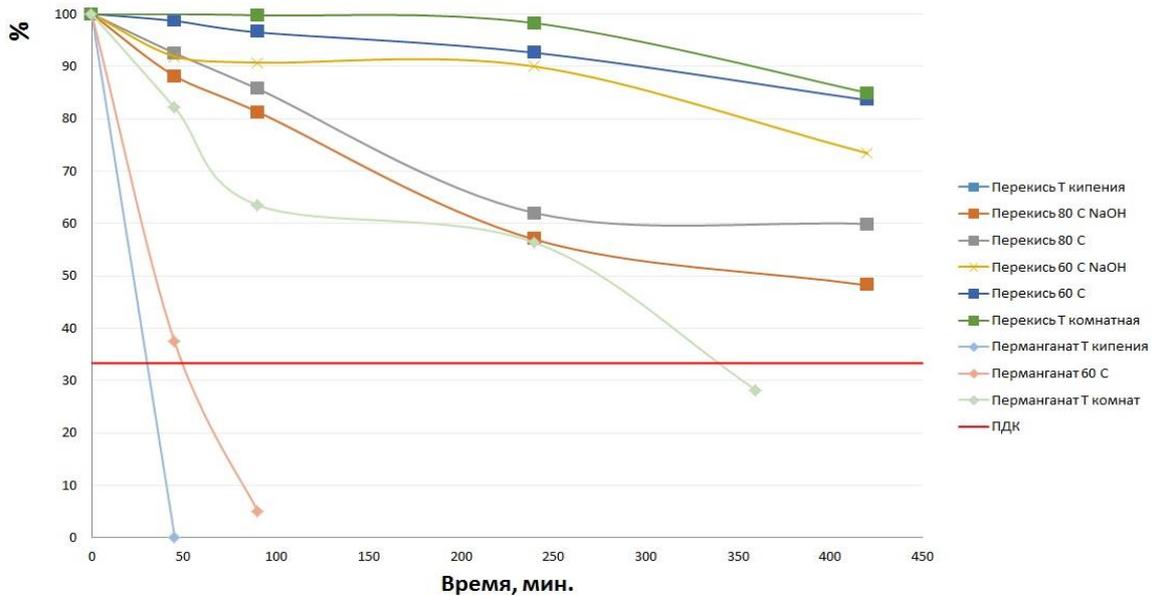
растворов с различным временем термического воздействия, накладывались друг на друга для определения интенсивности разложения ПАВ, находившихся в исходном растворе (рис. 4).

Сводные результаты экспериментов на растворах ПАВ с максимальной проектной концентрацией (2 г/л) показаны на рисунке 5



**Рисунок 4.** Пример наложенных хроматограмм (эксперимент № 3: ТМС 45 г/л, перекись 150 г/л, T = 60 град.)

**Figure 4.** Example of superimposed chromatograms (experiment No. 3: TMS 45 g/l, peroxide 150 g/l, T = 60 deg.)



**Рисунок 5.** Сводные результаты экспериментов на растворах ПАВ с максимальной проектной концентрацией (2 г/л)

**Figure 5.** Summary results of experiments on surfactant solutions with the maximum design concentration (2 g/l)

На основании экспериментальных данных, были выполнены расчетные обоснования характеристик работы очистного оборудования НВАЭС-2, обеспечивающего соответствие получаемых РАО требованиям нормативных документов, действующих в области использования атомной энергии:

1. Показано, что при применении максимально консервативного подхода, при котором все соли в дебалансных водах являются ПАВ, эффективность очистки от ПАВ должна составлять не менее 81 % при упаривании кубового остатка перед направлением на цементирование до 150 г/л и не менее 95 % – при упаривании до 450 г/л.

При рассмотрении более реалистичного варианта, при котором не более 50 % солесодержания обусловлено присутствием ПАВ – эффективность очистки от ПАВ должна составлять не менее 62 %.

2. Показано, что при дозировании пероксида водорода в водные растворы, характерные для НВАЭС-2, разложение комплексообразующих веществ происходит в процессе переработки в диапазоне температур 80–100 градусов Цельсия. При температурах 80 °С и выше концентрация ПАВ достигает значения 62 %, что соответствует не превышению содержания ПАВ в кубовом остатке значения 1 % (без консервативного подхода), после 4 часов обработки.

Применение максимально консервативного подхода, при котором все соли обусловлены наличием ПАВ, разложение комплексообразующих веществ происходит в диапазоне температур 95–100 °С во временном интервале 45–90 мин. После 90 мин температурного воздействия при 100 °С все комплексообразующие вещества разлагаются полностью.

Эффективность данного метода очистки от ПАВ при небольших исходных концентрациях ПАВ (до 2 г/л) и нагреве раствора менее 80 градусов Цельсия не превышает 50 % от исходной концентрации ПАВ.

Незначительное влияние на интенсификацию процесса оказывает добавление катализатора (10 % NaOH), концентрация ПАВ в 62 % достигается при меньшем времени – 3,5 час, однако, не позволяет достичь расчетного при консервативном подходе минимального коэффициента очистки от ПАВ (81 %) при технологически обоснованных временах выдержки раствора (до 7 часов).

3. Хорошие результаты показало дозирование в исследуемые модельные растворы перманганата калия. Процесс разложения комплексообразующих веществ интенсивно происходит уже при комнатной температуре. Данное вещество может присутствовать в трапных водах и водах спецпрачечной в качестве дополнительного контаминатора.

Дозирование перманганата калия в очищаемую воду позволяет достичь фактически 100 %-ной очистки от ПАВ, не прибегая к нагреву воды до температуры кипения.

Эффективность очистки от ПАВ до уровня содержания комплексобразующих веществ в кубовом остатке в пределах ниже 1 % достигается при дозировании перманганата калия спустя 70 мин после начала эксперимента температурного, а при 100 °С – менее, чем за 40 мин.

4. Таким образом, для обеспечения выполнения требований НП-093-14 при эксплуатации установок 00SRP, 00KPN, 10KPN, 20KPN, можно рекомендовать Нововоронежской АЭС изменение рецептуры корректирующей обработки вод спецпрачечной и трапных вод, собираемых в системах спецканализации, путем дозирования перманганата калия в количествах порядка 5 г/л (при условии отсутствия других технологических ограничений).

5. Полученные значения концентрации комплексобразователей во всех отобранных

для данной работы пробах технологических сред показали их низкое содержание на уровне единиц и сотых долей мг/дм<sup>3</sup>, либо находится ниже границы предела измерений, что в 50–100 раз меньше пороговых значений, обусловленных требованиями нормативной документации (НП-093-14) – содержание комплексобразующих веществ в кубовом остатке в пределах ниже 1 %.

В целом общее содержание ПАВ в жидких отходах НВАЭС находится примерно на одном уровне по всем пробам и составляет величины на грани нижнего предела измерения по методике, что подтверждает правильность выбранного направления исследований с применением лабораторных модельных растворов.

6. Полученные результаты могут быть использованы при обосновании безопасности технологий обращения с РАО, применяемых в атомной энергетике. Предварительные результаты исследования опубликованы<sup>5</sup> и оформлены отчетом<sup>6</sup>.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Хазиева Э.Б., Набойченко С.С., Свиридов. Исследование возможности применения комбинированных ПАВ при автоклавном выщелачивании сульфидных цинковых концентратов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2016;20(9):147–155. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-9-147-155>

Khazieva E.B., Naboychenko S.S., Sviridov V.V. Investigation of combined surfactant application possibility under zinc sulfide concentrate pressure leaching. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;20(9):147–155. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-9-147-155>

2. Колмачихина Э.Б., Рыжкова Е.А., Дмитриева Д.В., Вакула К.А., Мокрецов М.А. Исследование влияния лигносульфоната, анионных поверхностно-активных веществ и их смесей на показатели автоклавного выщелачивания цинкового концентрата. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(8):143–150. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-8-143-150>

Kolmachikhina E.B., Ryzhkova E.A., Dmitrieva D.V., Vakula K.A., Mokretsov M.A. Study of lignosulfonate, anionic surfactants and their mixture effect on zinc concentrate pressure leaching. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(8):143–150. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-8-143-150>

3. Jungling T. Nuclear Regulatory Commission. Regulations and Experience with Solidification. Stabilization Technology. T. Jungling, J. Greeves. *American Society for testing and materials*. Philadelphia. 1989. P. 77–82. <https://www.astm.org/stp22871s.html>

4. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Москва: Стройиздат, 1990. 394 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001526240> (дата обращения: 01.09.2024).

<sup>5</sup> Гордеева Е.Л., Харин А.Н., Потапов М.А., Шихалиев Х.С. Разложение действующих веществ твердого моющего средства под действием пергидроля. – Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 120-летию со дня рождения И.В. Курчатова, Нововоронеж, 06-08.12.2023 г. – Нововоронеж: РПГ «Девятое облако», 2023. – С. 239-242.

<sup>6</sup> Отчет о проделанной работе по обоснованию разрушения органических комплексобразующих веществ в виде дезактивирующих средств и моющих растворов, и оценке соответствия кондиционированных ЖРО критериям приемлемости для захоронения по критерию «Содержание комплексобразующих веществ». – ООО «Атом-Инф», 2023.

5. Гафарова В.В., Кулагина Т.А. Безопасные методы утилизации радиоактивных отходов. *Журнал Сибирского Федерального университета. Серия: техника и технологии*. 2016;9(4):585–597. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2016-9-4-585-597>

Gafarova V.V., Kulagina T.A. Safe methods of radioactive waste utilization. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2016;9(4):585–597. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2016-9-4-585-597>

6. Трунова Н.А. Влияние природы поверхностно-активных веществ на распад гидропероксидов в коллоидных системах. Автореферат диссертации на соискание степени кандидата химических наук. Москва, 2009. 22 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003463764?ysclid=m4721587j1240988353>

Trunova N.A. Influence of the nature of surfactants on the decomposition of hydroperoxides in colloidal systems. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Chemical Sciences. Moscow, 2009. 22 p. <https://search.rsl.ru/ru/record/01003463764?ysclid=m4721587j1240988353>

7. Мубаракова Л.Р., Будников Г.К. Хроматографические методы в анализе продуктов бытовой химии и косметических средств на содержание ПАВ. Заводская лаборатория. *Диагностика материалов*. 2018;84(5):5–13. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-5-5-13>

Mubarakova L.R., Budnikov G.K. Chromatographic methods in analysis of household chemicals and cosmetics for the presence of surface active substances. Industrial laboratory. *Diagnostics of materials*. 2018;84(5):5–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-5-5-13>

8. Lara-Martín P.A., Gómez-Parra A., González-Mazo E. Development of a method for the simultaneous analysis of anionic and non-ionic surfactants and their carboxylated metabolites in environmental samples by mixed-mode liquid chromatography-mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*. 2006;1137(2):188–197. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2006.10.009>

9. Bassarab P., Williams D., Dean J.R., Perry J.J. Determination of quaternary ammonium compounds in seawater samples by solid-phase extraction and liquid chromatography-mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*. 2011;1218(5):673–677. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2010.11.088>

10. León V.M., González-Mazo E., Gómez-Parra A. Handling of marine and estuarine samples for the determination of linear alkylbenzene sulfonates and sulfophenylcarboxylic acids. *Journal of Chromatography A*. 2000;889(1–2):211–219. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(00\)00569-0](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(00)00569-0)

11. Merino F., Rubio S., Pérez-Bendito D. Evaluation and optimization of an on-line admicelle-based extraction-liquid chromatography approach for the analysis of ionic organic compounds. *Analytical Chemistry*. 2004;76(14):3878–3886. <https://doi.org/10.1021/AC049736V>

12. Лобачев А.Л., Колотвин А.А. Идентификация и количественное определение приоритетных анионных поверхностно-активных веществ в моющих средствах методами ТСХ и ВЭЖХ. *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2006;6(1):90–98. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12051627&ysclid=m472x112q1836980874> (дата обращения: 01.09.2024).

Lobachev A.L., Kolotvin A.A. Identification and quantitative determination of priority anionic surfactants in detergents by TLC and HPLC methods. *Sorption and chromatographic processes*. 2006;6(1):90–98. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12051627&ysclid=m472x112q1836980874> (accessed: 01.09.2024).

13. Lara-Martín P.A. Gómez-Parra A., González-Mazo E. Simultaneous extraction and determination of anionic surfactants in waters and sediments. *Journal of Chromatography A*. 2006;1114(2):205–210. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2006.03.014>

14. Pan N., Pietrzyk D.J. Separation of anionic surfactants on anion exchangers. *Journal of Chromatography A*. 1995;706(1–2):327–337. (In Russ.). Available at: [https://archive.org/details/sim\\_journal-of-chromatography-a\\_1995\\_706\\_index\\_0](https://archive.org/details/sim_journal-of-chromatography-a_1995_706_index_0) (accessed: 01.09.2024).

15. Murakami M., Takada H. Perfluorinated surfactants (PFSs) in size-fractionated street dust in Tokyo. *Chemosphere*. 2008;73(8):1172–1177. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.07.063>

16. Амелин В.Г., Большаков Д.С. Идентификация и определение неионогенных поверхностно-активных веществ методом ультра высокоэффективной жидкостной хроматографии-масс-спектрометрии высокого разрешения. *Журнал органической химии*. 2021;76(2):166–182. <https://doi.org/10.31857/S0044450220120026>

Amelin V.G., Bol'shakov D.S. Identification and determination of nonionic surfactants by ultrahigh-performance liquid chromatography-high-resolution. *Journal of analytical chemistry*. 2021;76(2):226–242. <https://doi.org/10.31857/S0044450220120026>

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Поваров В.П.** – проведение исследований процессов разложения (ПАВ) в дебалансных водах атомных электростанций посредством коррекционной обработки перекисью водорода с последующим нагревом;

**Росновский С.В.** – организация исследований; выполнение исследований на модельных растворах, контроль качества и координацию работы команды;

#### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Povarov V.P.** – research on the processes of surfactant decomposition of surfactants in unbalance water of nuclear power plants by means of corrective treatment with hydrogen peroxide and subsequent heating;

**Rosnovsky S.V.** – organizing research, performing research on model solutions; quality control and coordination of the team's work;

**Мельников Э.С.** – методическая и организационная поддержка при разработке плана исследований, прободборе, анализе полученных результатов;

**Литовченко М.Н.** – пробоотбор технологических сред, техническая поддержка при проведении исследований;

**Росновский В.С.** – обработка и систематизация результатов исследований, подготовка материалов к печати;

**Гордеева Е.Л.** – проведение исследований в дебалансных водах атомных электростанций посредством коррекционной обработки перекисью водорода с последующим нагревом;

**Харин А.Н.** – исследование зависимости эффективности очистки раствора от исходной концентрации ПАВ, времени и температуры, от наличия дополнительного контаминатора (перманганата калия);

**Шихалиев Х.С.** – методика определения вида и концентрации ПАВ в водных растворах на основе ВЭЖХ-МС; план исследований, методическая поддержка при выполнении работ;

**Потапов М.А.** – обобщение полученных результатов, построения аналитических зависимостей.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Финансирование за счет средств Нововоронежской АЭС.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Владимир Петрович Поваров**, доктор технических наук, директор Филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (Нововоронежская АЭС), г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-9092-9160>

e-mail: [nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru)

**Росновский Сергей Викторович**, кандидат технических наук, заместитель главного инженера по радиационной защите Филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (Нововоронежская АЭС), г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

e-mail: [RosnovskySV@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:RosnovskySV@nvnpp1.rosenergoatom.ru)

**Мельников Эдуард Сергеевич**, начальник цеха по обращению с радиоактивными отходами Филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (Нововоронежская АЭС), г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

e-mail: [MelnikovES@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:MelnikovES@nvnpp1.rosenergoatom.ru)

**Литовченко Михаил Николаевич**, ведущий инженер цеха по обращению с радиоактивными отходами Филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (Нововоронежская АЭС), г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

e-mail: [LitovchenkoMN@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:LitovchenkoMN@nvnpp1.rosenergoatom.ru)

**Росновский Виктор Сергеевич**, оператор реакторного цеха Филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Новово-

**Melnikov E.S.** – methodological and organizational support in the development of the research plan, sampling, and analysis of the results obtained;

**Litovchenko M.N.** – sampling of technological media, technical support for research;

**Rosnovsky V.S.** – processing and systematization of research results, preparation of materials for printing;

**Gordeeva E.L.** – research on the processes of surfactant decomposition of surfactants in unbalance water of nuclear power plants by means of corrective treatment with hydrogen peroxide and subsequent heating;

**Kharin A.N.** – study of dependence of solution cleaning efficiency on initial surfactant concentration, time and temperature, on the presence of an additional contaminant (potassium permanganate);

**Shikhaliev H.S.** – methodology for determining the type and concentration of surfactants in aqueous solutions based on the method of high-performance liquid chromatography in tandem with mass spectrometry (HPLC-MS), research plan, methodological support in the implementation of work;

**Potapov M.A.** – summarizing of the obtained research results, construction of analytical dependencies.

#### FUNDING:

Financing from Novovoronezh NPP funds.

#### CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Vladimir P. Povarov**, Vladimir P. Povarov, Dr. Sci. (Engin.), Head of Novovoronezh Nuclear Plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC (Novovoronezh NPP), Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-9092-9160>

e-mail: [nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru)

**Sergey V. Rosnovsky**, Can. Sci. (Engin.), Deputy Chief Engineer for Radiation Protection Novovoronezh Nuclear Plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC (Novovoronezh NPP), Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.

e-mail: [RosnovskySV@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:RosnovskySV@nvnpp1.rosenergoatom.ru)

**Eduard S. Melnikov**, Head of the Radioactive Waste Management Department Novovoronezh Nuclear Plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC (Novovoronezh NPP), Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.

e-mail: [MelnikovES@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:MelnikovES@nvnpp1.rosenergoatom.ru)

**Mikhail N. Litovchenko**, Lead engineer of the Radioactive Waste Management Department Novovoronezh Nuclear Plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC (Novovoronezh NPP), Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.

e-mail: [LitovchenkoMN@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:LitovchenkoMN@nvnpp1.rosenergoatom.ru)

**Victor S. Rosnovsky**, Reactor shop operator Novovoronezh Nuclear Plant the branch of Rosenergoatom

ронежская атомная станция» (Нововоронежская АЭС), г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

e-mail: rvs05071999@yandex.ru

**Гордеева Елена Львовна**, Генеральный директор Общества с ограниченной ответственностью «АтомИнфо», г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

e-mail: atominfo@bk.ru

**Харин Алексей Николаевич**, кандидат физико-математических наук, Начальник Управления инновация и предпринимательства Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0003-3689-2859>

e-mail: kharin@vsu.ru

**Шихалиев Хидмет Сафарович**, доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой органической химии Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: shikh@online.ru

**Потапов Михаил Андреевич**, кандидат химических наук, научный сотрудник кафедры органической химии Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: potapov@vsu.ru

Concern JSC (Novovoronezh NPP), Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.

e-mail: rvs05071999@yandex.ru

**Elena L. Gordeeva**, General Principal of the AtomInfo Limited Liability Company, Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.

e-mail: atominfo@bk.ru

**Alexey N. Kharin**, Can. Sci (Phys. and Math.), Head of the Department of Innovation and Entrepreneurship of Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0003-3689-2859>

e-mail: kharin@vsu.ru

**Khidmet S. Shikhaliev**, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Head of the Department of Organic Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation.

e-mail: shikh@online.ru

**Mikhail A. Potapov**, Can. Sci. (Chem.), Researcher at the Department of Organic Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation.

e-mail: potapov@vsu.ru

Поступила в редакцию / Received 10.09.2024

После доработки / Revised 11.12.2024

Принята к публикации / Accepted 17.12.2024