

# Современные окислительные и фотоокислительные методы разрушения комплексонов в жидких радиоактивных отходах

**А.С. Камруков**, заведующий отделом, канд. тех. наук

**Д.О. Новиков**, научный сотрудник

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

e-mail: zerooo@list.ru

## Ключевые слова:

жидкие радиоактивные отходы, плазменно-оптические технологии, металлоорганические комплексы, фотоокислительная деструкция, фотохимические технологии, ультрафиолетовое излучение.

*Проведен анализ современного уровня развития окислительных технологий разрушения комплексонов и металлоорганических комплексов в жидких радиоактивных отходах. Рассмотрены способы как уже применяемые на практике, так и экспериментальные. Подробно рассмотрены окисление перманганатом калия и пероксидом водорода, а также озонирование и фотоокисление. Показано, что окисление перманганатом калия с последующей фильтрацией, приводит к снижению активности изотопов, однако при этом образуется значительный объем диоксида марганца. Применение озонирования позволяет значительно сократить объем ЖРО, но при этом озон является крайне токсичным и взрывоопасным веществом, требующим специального оборудования для его производства. Эффективность применения окисления пероксидом водорода и фотоокисления без катализаторов низка. Особое внимание уделено комбинированным окислительным методам (АОР) на основе применения ультрафиолетового (УФ) излучения совместно с озоном и/или пероксидом водорода. Такие методы позволяют применять для обработки ЖРО сильнейший окислитель – гидроксильный радикал. Эффективность АОР-методов и их технологические возможности в значительной степени определяются характеристиками используемых источников УФ излучения. Проведен детальный анализ широкого спектра возможных источников УФ излучения (ртутные лампы низкого и среднего давления, амальгамные лампы, экимерные лампы, светодиоды и импульсные ксеноновые лампы), выполнена их сравнительная оценка. Отмечены большие потенциальные возможности импульсных ксеноновых ламп, обеспечивающих сплошной спектр излучения в УФ области и высокую интенсивность потока высокоэнергичных фотонов.*

## 1. Общая информация

Жидкие радиоактивные отходы (ЖРО) образуются на каждом этапе ядерного топливного цикла — от добычи урановых руд до переработки и захоронения отработанного ядерного топлива. ЖРО имеют максимальную опасность по причине их больших объемов и значительной активности, а также потенциальной возможности их неконтролируемого проникновения в окружающую среду.

К жидким радиоактивным отходам относятся не подлежащие дальнейшему использованию органические и неорганические жидкости, пульпы и шламы

[1], в которых удельная активность радионуклидов более чем в 10 раз превышает значения уровней вмешательства (УВ) при поступлении с водой, приведенных в приложении П-2 «Норм радиационной безопасности» [2] (табл. 1).

ЖРО представляют собой жидкость (природную или обессоленную и умягченную воду), содержащую химические загрязнители и радионуклиды. Содержание органических и неорганических загрязнителей в ЖРО может составлять от единиц миллиграммов до сотен граммов (кубовые остатки) в литре [3].

Документами [1, 2, 4, 5] на основании которых определяется возможность сброса очищенных ЖРО в окружающую среду, строго запрещается:

- сброс ЖРО в хозяйственно бытовую и ливневую канализацию, водоемы, поглощающие ямы, колодцы, скважины, на поля орошения, поля фильтрации, в системы подземного орошения и на поверхность земли;
- сброс ЖРО в поверхностные и подземные водные объекты на водосборные площадки и на почву;
- смешивание радиоактивных и нерадиоактивных отходов, а также радиоактивных отходов разных категорий с целью снижения их уровня активности.

Также нормируется содержание органических и неорганических примесей в уже свободной от радионуклидов воде.

К основным источникам формирования ЖРО можно отнести протечки теплоносителя первого контура, воду бассейнов выдержки, дезактивационные растворы, слив вод спецпрачечных и душевых [6]. Для сбора жидкостей, попавших в результате протечек на пол, во всех производственных помещениях АЭС, в которых данные протечки возможны, оборудована система трапов, представляющая собой систему трубопроводов и приемных баков. Жидкости, попадающие в трап, образуют вместе с другими отходами так называемую «трапную воду». Одновременно с этим протечки из контура загрязняют радионуклидами помещения и оборудование.

Таблица 1

Допустимые уровни активности наиболее опасных и часто встречающихся в ЖРО радионуклидов для потребления населением в питьевой воде – УВ и для сброса – 10УВ

Нуклид	Период полураспада	УВ по НРБ-99/2010 для населения, Бк/кг	Допустимая активность по ОСПОРБ-99, Бк/л
<sup>23</sup> Na	2,6 года	43	430
<sup>54</sup> Mn	312 суток	200	2000
<sup>58</sup> Co	70,8 суток	190	1900
<sup>60</sup> Co	5,27 лет	41	410
<sup>63</sup> Ni	96 лет	930	9300
<sup>65</sup> Zn	244 суток	36	360
<sup>90</sup> Sr	29,1 года	5	50
<sup>95</sup> Zr	64 суток	150	1500
<sup>95</sup> Nb	35,1 суток	240	2400
<sup>106</sup> Ru	1,01 года	20	200
<sup>124</sup> Sb	60,2 суток	56	560
<sup>125</sup> Sb	2,77 года	45	450
<sup>131</sup> I	8,04 суток	6,3	63
<sup>134</sup> Cs	2,06 года	7,3	73
<sup>137</sup> Cs	30 лет	11	110
<sup>144</sup> Ce	284 суток	27	270
<sup>210</sup> Po	138 суток	0,12	1,2
<sup>226</sup> Ra	1600 лет	0,5	5
<sup>228</sup> Ra	5,75 лет	0,2	2
<sup>227</sup> Ac	21,8 лет	0,13	1,3
<sup>228</sup> Th	1,91 лет	1,9	19
<sup>235</sup> U	700 000 000 лет	3,0	30
<sup>238</sup> U	4 500 000 000 лет	3,1	31
<sup>239</sup> Pu	24 000 лет	0,56	5,6
<sup>241</sup> Am	430 лет	0,69	6,9

Таблица 2

Состав и эффективность наиболее употребляемых растворов для дезактивации [7]

Шифр раствора	Состав раствора	Режим дезактивации			Скорость коррозии г/(м <sup>2</sup> ч)		Назначение
		T, °C	t, ч	КД <sup>1</sup>	12X18N10T	Углеродистая сталь	
T	0,06–3% ЭДТА, рН = 9, 10	60	1–3	–	0,007	10	Для удаления рыхлых отложений
T–Окс	0,5%ЭДТА+0,4% H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	100	1	7,3	0,007	10	Для съемного оборудования и контуров
T–Ц	0,15% H <sub>3</sub> Cit + 0,25–0,5% ЭДТА	100–170 90	2–6 2	1,4–3,1 12,8	–	–	Для дезактивации контуров реакторов кипящего типа
ДАЦ–Т (ACE)	10% (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HCit+ 0,04% ЭДТА + 0,45% фенилтиомочевины	85	1–4	(4,2–8)	–	–	Для удаления отложений
Фос–Т	2–3% H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> + 0,1–0,15% ЭДТА + 0,02–0,03% каптакса	90	5	12–18	-	-	Для дезактивации конденсатно-питательного тракта реакторов РБМК
T–Ц–Г	0,1–0,7% ЭДТА+0,2–0,5% H <sub>3</sub> Cit+0,01–0,3% NH <sub>2</sub> OH (или N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ), рН>3	100 150–160	4–8 4–5	2,3 2–20	0,16 0,1–0,4 мкм	102 –	Для дезактивации контуров
СА–Т–Г (RDS)	2,5%NH <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> H + 0,35%ЭДТА + 0,5% N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> + 0,1% уротропина	–	–	1,7–7	–	–	Для дезактивации нержавеющей стали

<sup>1</sup> КД — коэффициент дезактивации.

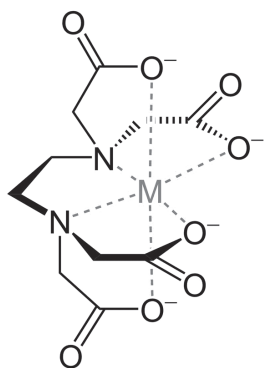


Рис. 1. Структура комплекса иона металла и ЭДТА

Загрязненные поверхности требуют их регулярной дезактивации. Дезактивации подлежат помещения, оборудование, одежда и персонал. Дезактивацию проводят специализированными растворами (см. табл. 2). Растворы после дезактивации представляют собой радиоактивные отходы.

Очевидно, что в результате дезактивационных процедур в ЖРО поступают значительные количества комплексов, применяемых для смывки радиоактивных отходов, таких как щавелевая кислота и этилендиаминтетрауксусная кислота (ЭДТА).

Суммарное содержание различных компонентов в смеси отходов составляет обычно для отечественных АЭС с реактором РБМК 2 г/л, а с реактором ВВЭР — до 5 г/л [8].

Очистка стандартными методами фильтрации существенно усложняется и затрудняется из-за присутствия в ЖРО больших количеств комплексов (ЭДТА или щавелевой кислоты) [8]. Эти комплексы образуют очень устойчивые комплексы с радиоактивными ионами, в частности, ЭДТА с  $^{60}\text{Co}$  (рис. 1). Предварительное удаление упомянутых комплексов могло бы существенно упростить дальнейшие процессы очистки ЖРО.

Также большие концентрации органических веществ является препятствием в работе выпарных аппаратов, поскольку при определенных концентрациях этих веществ в процессе концентрирования отходов происходит забивание змеевиков и выход оборудования из строя [9].

## 2. Окислительные методы удаления комплексов из ЖРО

Учитывая высокую устойчивость комплексов, в настоящее время наиболее эффективным методом удаления комплексов и комплексов из ЖРО считается их окислительное разрушение [10]. Для этой цели были испытаны различные химические окислители: перманганат калия [11], озон [10],  $\text{H}_2\text{O}_2$  [12],  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ,  $\text{NaClO}$ ,  $\text{NaBrO}$  [13], реагент Фентона [14].

Особое внимание уделено изучению фотохимического разрушения комплексов [15]. Рассмотрим основные методы подробнее.

### 2.1. Окисление перманганатом калия

Перманганат калия, являясь достаточно сильным окислителем, находит применение в системах очистки вод от органических и токсических примесей [16]. Были проведены исследования на Ленинградской и Калининской АЭС, показавшие значительное снижение активности кубовых остатков по  $^{60}\text{Co}$  (~50%) [3].

Еще одна серия экспериментов, проведенная на объекте «Укрытие» (Чернобыльская АЭС), продемонстрировала снижение активности по  $^{137}\text{Cs}$  на 25%, а по  $^{90}\text{Sr}$  — на 99,7% [11]. При этом было обнаружено оптимальное соотношение «органические вещества-перманганат калия» равное 1,5:1 при значении pH = 1. В работе [9] установлено, что более эффективна окислительная очистка пероксидом водорода с последующей обработкой перманганатом калия и ультрафильтрацией на мембране ПС-100. При этом снижена концентрация урана на 94–99 %, активность изотопов  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  — на 74–87 %,  $^{241}\text{Am}$  — на 94–95 %,  $^{244}\text{Cm}$  — на 90–95 %.

Существуют запатентованные решения по переработке ЖРО, в которых в качестве окислителя предлагается к применению перманганат калия, например [17].

Однако в процессе обработки в жидкости образуется большой объем осадка диоксида марганца (до 20% от начального объема кубового остатка) [13], что заметно снижает эффективность переработки, а также значительно увеличивает объем вторичных радиоактивных отходов [12, 18, 19]. Еще одним недостатком технологии является то, что даже при очень больших добавках  $\text{KMnO}_4$  (до 70 г/л) полного окисления ЖРО не достигается [3].

### 2.2. Озонирование

Озон известен как реагент, используемый в системах водоподготовки, уже более 100 лет [20]. Окислительная деструкция озонем является одним из наиболее эффективных методов удаления оксалат-ионов и ЭДТА из водных сред [21], имеющих промышленное применение [22]. Кинетика потребления растворенного озона различными органическими соединениями рассмотрена в [23, 24]. Характеристика реакций основных органических соединений с озоном является достаточно сложной задачей. Однако можно отметить некоторые общие тенденции [24, 25]: насыщенные алкильные соединения реагируют с озоном очень медленно; большинство хлорированных углеводородов и даже ненасыщенные углеводороды не реагируют напрямую с озоном (в этом слу-

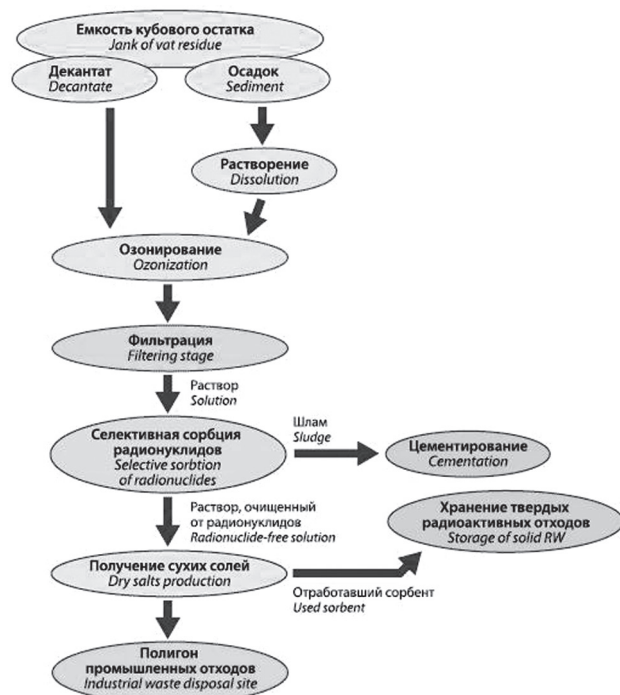


Рис. 2. Принципиальная схема переработки кубовых остатков ЖРО на Кольской АЭС [22]

чае необходимо косвенное взаимодействие с озоном через радикал  $\cdot\text{OH}$ ; бензол окисляется озоном очень медленно, а полициклические углеводороды быстрее.

Технологии озонирования в настоящее время уже применяются на объектах атомной промышленности. Исследования проводились на Курской, Калининской и Ленинградской АЭС, а также на Мангышлакском атомно-энергетическом комбинате (город Актау, Казахстан). Обнаружен оптимальный режим обработки ЖРО: значение pH должно составлять 12–13, температура обрабатываемого раствора 60–80 °C [12]. При этих условиях происходит практически полное разложение органических соединений и образуется осадок гидроксидов переходных металлов, на котором сосаждаются радионуклиды  $^{60}\text{Co}$  и  $^{54}\text{Mn}$  [12, 26, 27]. На Кольской АЭС в 2006 г. был построен комплекс, реализующий технологию озонирования, результатом его промышленной эксплуатации стало сокращение объема радиоактивных отходов в 50 раз [22]. Схема данного процесса приведена на рис. 2.

Однако, несмотря на неоспоримые достоинства [3], данный метод не лишен ряда существенных недостатков:

- озонирующее оборудование является крайне сложным и дорогим, требует установки в специальные помещения и высококвалифицированного обслуживания;

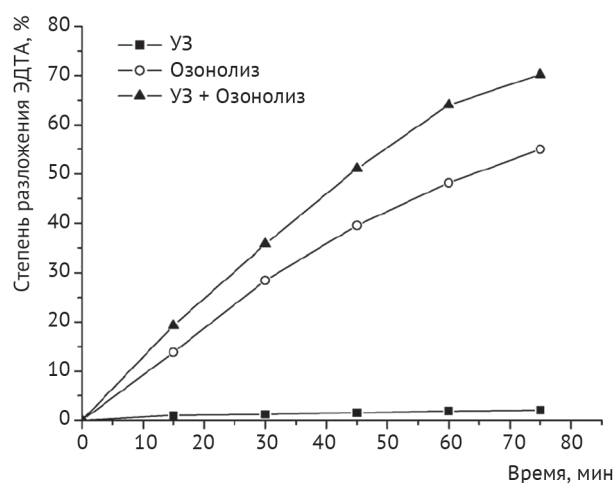


Рис. 3. Разрушение ЭДТА (0,25 мМ) под действием озона, УЗ и их комбинации (pH – 5,2; УЗ – 20 кГц, 150 Вт; ОЗ ~ 1 г/л) [28]

- озон слабо растворим в воде, требуется оборудование, позволяющее эффективно растворять озон в обрабатываемых растворах;
- озон токсичен;
- озон крайне пожаро- и взрывоопасен;
- получение озона является энергоемким процессом;
- процесс озонирования может занимать длительное время (до нескольких часов).

Также известен способ, позволяющий несколько повысить эффективность озонирования, — обработка раствора ультразвуком [28]. В этом процессе происходит генерация, а затем разрушение кавитационных пузырей, приводящих к образованию  $\cdot\text{H}$ ,  $\cdot\text{O}$ ,  $\cdot\text{OH}$  и  $\text{H}_2\text{O}_2$  [29], которые в свою очередь могут окислять органические соединения. Результаты экспериментов по применению данного способа отражены на рис. 3.

### 2.3. Окисление пероксидом водорода

Главным достоинством пероксида водорода является то, что он полностью способен разлагаться до кислорода и воды, не образуя какие-либо другие вещества, что превращает его в потенциально наиболее перспективный метод обработки ЖРО. Его использование в качестве окислителя имеет ряд преимуществ по сравнению с другими окислительными методами обработки воды: низкая стоимость; возможность хранения, не зависящая от температуры; неограниченная растворимость в воде; простота использования [30]. Однако применение пероксида водорода непосредственно в качестве окислителя малоэффективно [31] по причине того, что  $\text{H}_2\text{O}_2$  является селективным окислителем, т.е. окисление целого ряда соединений происходит крайне медленно [32]. Для повышения эффективности предлагается ис-



пользовать различные дополнительные методы как химические, так и физические.

Например, ООО «Наука-технологии-производства» запатентовало способ переработки ЖРО с использованием дополнительного катализатора — гидропероксида титана [33]. Данный метод был применен на установке очистки кубовых остатков Нововоронежской АЭС [34].

В ИХ ДВО РАН был разработан и в настоящее время активно продвигается метод гидротермальной переработки ЖРО [35–37]. Суть его заключается в пропускании горячего раствора под высоким давлением через одноразовый каталитический реактор в присутствии пероксида водорода. В результате кристаллы радионуклида кобальта оседают в реакторе, а очищенная жидкость его покидает. К основным достоинствам этого метода относятся исключение из процесса переработки стадии фильтрации радиоактивного шлама, а также высокая степень снижения объема ЖРО (до 300 раз). Недостатком является сложность оборудования и наличие в системе расходного элемента с ограниченным ресурсом, требующим утилизации как твердые радиоактивные отходы.

Известно [3] об экспериментах, проводимых НИЦ «Курчатовский институт», по разрушению больших концентраций ЭДТА (400 мг/л) в щелочных растворах с высоким содержанием солей до 300 г/л при температуре 80 °С с применением пероксида водорода, где в качестве катализатора использовался двухвалентный кобальт. Эффективность данной технологии не превышала 90%.

#### 2.4. Фотоокисление

Фотохимические реакции проходят в результате воздействия излучения на химические вещества. Суть фотоокисления составляет перенос электрона от возбужденной молекулы донора D к невозбужденной молекуле акцептора A. Фотоокисление состоит из нескольких стадий и начинается с поглощения

донором квантов света, которое приводит к переходу электрона с высшей занятой орбитали на низшую свободную орбиталь и образованию возбужденных частиц D\*. В присутствии невозбужденных молекул A электрон переходит с низшей свободной орбитали донора D\* на низшую свободную орбиталь акцептора A. В результате происходит окисление донора D\*, энергетически невозможное для обычного переноса электрона с высшей занятой орбитали донора на низшую свободную орбиталь акцептора. При переносе электрона между D\* и A образуются радикальные продукты D+\* (D\*) в том случае, если в качестве донора выступает нейтральная молекула D или анион D-, либо продукты нерадикальной природы D(D+), если донором электрона является анион-радикал D\* или нейтральный радикал D.) [38].

В таблице 3 приведены характерные энергии связи фрагментов органических молекул.

Из вышесказанного видно, что энергия связи, как правило, совпадает с энергией фотонов в УФ части спектра. В частности, излучение с длиной волны менее 315 нм, способно провоцировать фотохимические реакции в органических веществах.

К ультрафиолетовому излучению согласно [40] относится излучение с длиной волн в диапазоне от 100 до 400 нм, которое в свою очередь разделяется на: вакуумный ультрафиолет (V-UV) от 100 до 200 нм; ультрафиолет C (UV-C) от 200 до 280 нм; ультрафиолет B (UV-B) от 280 до 315 нм и ультрафиолет A (UV-A) от 315 до 400 нм.

Напрямую фотоокисление для разрушения металлорганических комплексов и комплексонов не применяется ввиду его низкой эффективности [41] по причине разнообразного состава ЖРО [3] и широкой вариации их концентрации [8].

#### 2.5. Комбинированные окислительные процессы

Наиболее перспективным методом разрушения представляется применение АОР-технологий. АОР (Advanced Oxidation Processes) — это применение окислителя (пероксида водорода и озона) и катализаторов в сочетании с активацией процесса УФ излучением, ультразвуком и т.д. В этом случае в воде проходят реакции с образованием гидроксильного радикала HO• [42]. Гидроксильный радикал является сильнейшим окислителем [38] (табл. 4), с высокой скоростью реагирующим со всеми органическими веществами [41] (табл. 5).

Было показано, что при совместном действии химических реагентов и УФ облучения эффективность окислительного разложения ЭДТА значительно возрастает [44]. При этом достигаются наилучшие результаты, сравнимые, а по ряду характеристик превышающие те, что дает перспективная методика

Таблица 3

Типичные энергии связи фрагментов органических молекул и соответствующие длины волн [39]

Связь	Характерные энергии связи (кДж/М)	Длина волны (нм)
O–H	460	260
C–H	410	290
N–H	390	310
C–O	370	320
C=C	830	140
C=N	850	140
C=O	740	160
C=N	600	200

Таблица 4  
Окислительный потенциал некоторых веществ [38]

Окислитель	Окислительный потенциал (вольт)	Относительный окислительный потенциал к ОК пот, хлор
Фтор	3,06	2,25
Гидроксил радикал	2,80	2,05
Атомный кислород	2,42	1,78
Озон	2,07	1,52
Пероксид водорода	1,77	1,30
Хлорноватистая кислота	1,49	1,10
Хлор	1,36	1,00
Бром	1,07	0,74
Диоксид хлора	0,95	0,69
Йод	0,5	0,37

Таблица 5  
Константы скоростей реакций с участием ОН-радикалов [43]

Соединение	Озон, 1/Мс	ОН, 1/Мс
Ацетилен	50	108–109
Спирты	0,01–1	108–109
Альдегиды	10	109
Насыщенные УВ	0,01	108–109
Ароматические УВ	1–100	108–1010
Карбоновые кислоты	0,001–0,01	107–109
Непредельные хлоруглеводороды	0,1–1000	109–1011
Кетоны	1	108–1010
Фенолы	1000	108–1010

фотокаталитического окислительного разложения ЭДТА на диоксиде титана [14]. Для последнего наилучшие показатели получены при использовании наноразмерных частиц анатаза в качестве фотокатализатора [45]. Сравнительный анализ этих двух методов показал, что они приводят к 100% высвобождению кобальта в результате разрушения ЭДТА. Они обеспечивают также эффективную минерализацию органических соединений, причем УФ/Н<sub>2</sub>О<sub>2</sub> процесс дает лучшие результаты в плане минерализации, а УФ/ТiО<sub>2</sub> более эффективно снижает содержание кобальта. Применение к реальным ЖРО УФ/Н<sub>2</sub>О<sub>2</sub> процесса, вслед за которым была проведена адсорбция на ТiО<sub>2</sub> и фильтрация, привели к значительному увеличению фактора дезактивации [46]. В [44] также показано, что скорость деградации ЭДТА и характер образующихся продуктов при использовании УФ/ТiО<sub>2</sub> и УФ/Н<sub>2</sub>О<sub>2</sub> процессов были аналогичны, при условии однако, что Н<sub>2</sub>О<sub>2</sub> непрерывно добавлялась в течение УФ/Н<sub>2</sub>О<sub>2</sub> процесса; при этом квантовая эффективность в УФ/Н<sub>2</sub>О<sub>2</sub> процессе была 1,4%, что несколько больше, чем в случае фотокатализа — 0,9%. Кроме того, Н<sub>2</sub>О<sub>2</sub>/УФ-процесс оказался более эффективным

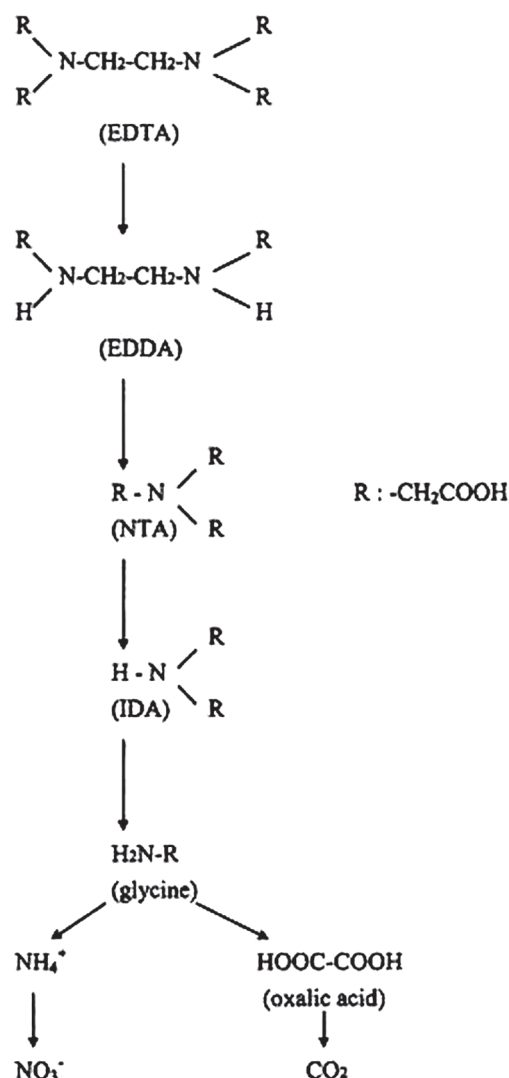


Рис. 4. Возможный механизм разложения ЭДТА в Н<sub>2</sub>О<sub>2</sub>/УФ процессе. [31]

в области кислых pH. Приведенные результаты подтверждают перспективность УФ/Н<sub>2</sub>О<sub>2</sub> процесса для обработки реальных ЖРО. Применение же АОР на основе использования озона приводит к проявлению всех недостатков озонирования, указанных выше. На рис. 4 приведен один из возможных механизмов окисления ЭДТА под действием комбинированного процесса с применением УФ излучения и пероксида водорода.

### 3. Источники УФ излучения

В настоящее время существует ряд технических источников УФ излучения, потенциально пригодных для реализации перспективных фотоокислительных технологий: ртутные лампы низкого давления, включая амальгамные, ртутные лампы среднего давления,

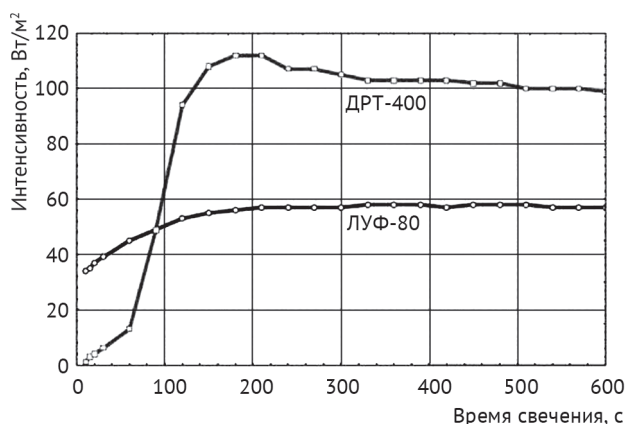


Рис. 5. Зависимость интенсивности излучения ртутных ламп низкого (ЛУФ-80) и среднего (ДРТ-400) давления от времени их работы [50]

эксимерные лампы, светодиоды, импульсные ксеноновые лампы. Ртутные лампы низкого и среднего давлений являются доминирующими по объемам применения в промышленности [47].

### 3.1. Ртутные лампы низкого давления

Ртутные лампы низкого давления на текущий момент являются наиболее отработанным изделием; средняя мощность находится в диапазоне 4–150 Вт, выход излучения составляет 30–38% от электрической мощности, на ультрафиолетовую область приходится до 80% всего излучения, интенсивность излучения составляет 0,05–0,3 Вт/см<sup>2</sup>. Обычно ресурс лампы составляет порядка 8000 часов, за это время выход УФ излучения снижается до 60% [48]. Компания Light Sources, Inc декларирует ресурс до 16 000 часов [49] за счет применения особых покрытий колбы лампы. Еще одним достоинством таких ламп является сравнительно низкая цена используемого для их питания оборудования.

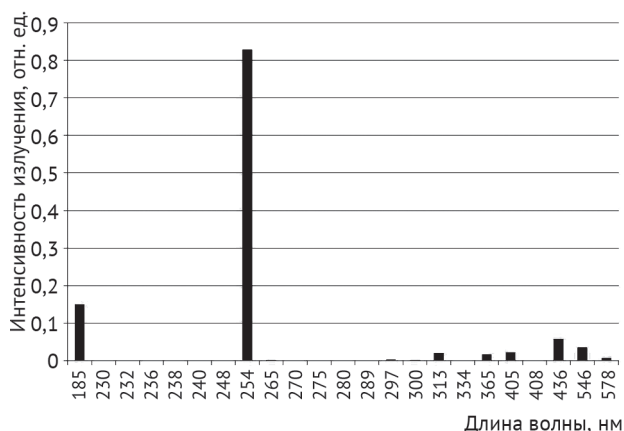


Рис. 6. Характерный спектр излучения ртутной лампы низкого давления

Особенностью ртутных ламп всех типов является “немгновенность” включения — лампы выходят на рабочий режим спустя некоторое время (60–900 секунд), необходимое для их прогрева до оптимальной рабочей температуры (рис. 5).

Характерный спектр ртутных ламп низкого давления приведен на рис. 6.

### 3.2. Ртутные лампы среднего давления

У ртутных ламп среднего давления выход излучения составляет 15–20% от электрической мощности, на ультрафиолетовую область может приходиться до 40% всего излучения. Средняя мощность лежит в диапазоне от 25 до 60 000 Вт, интенсивность излучения превышает 1 Вт/см<sup>2</sup>, ресурс по сравнению с лампой низкого давления несколько снижен и зависит от особенностей применения [51]. В [52] были проведены испытания на ресурс нескольких ртутных ламп среднего давления; показано, что ресурс сильно колеблется от 4000 до 16 000 часов, снижение выхода излучения составляло до 50%. К особенностям данного источника можно отнести то, что при работе температура колбы лампы поднимается до 600–900 °С. Данный тип источника света также находит применение в оборудовании, в котором УФ излучение применяется для фиксации различных покрытий.

Характерный спектр ртутных ламп среднего давления приведен на рис. 7.

### 3.3. Амальгамные лампы

Амальгамные лампы отличаются от ртутных ламп низкого давления значительно более низким содержанием токсичных элементов (ртути) и в первую очередь предназначены для применения на пищевых и медицинских производствах по причине низкого тепловыделения. Их средняя мощность находится в диапазоне 10–1000 Вт. Ресурс аналогичен ресурсу

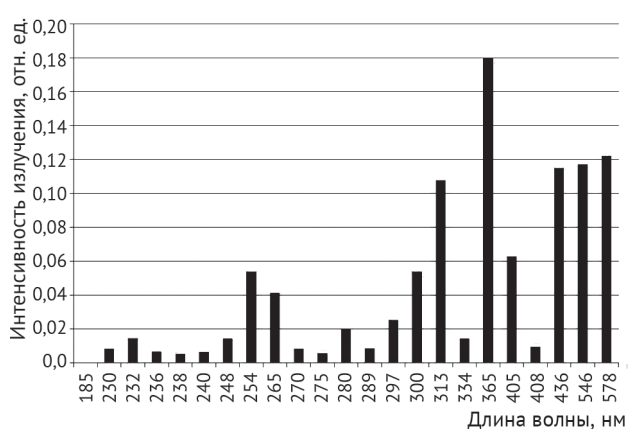


Рис. 7. Характерный спектр излучения ртутной лампы среднего давления

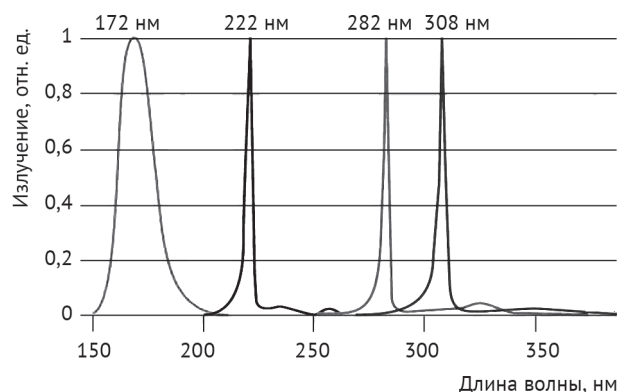


Рис. 8. Спектры эксимерных ламп

ртутных ламп низкого давления. Интенсивность излучения до  $0,5 \text{ Вт/см}^2$ . Выход излучения составляет до 40% от электрической мощности. На ультрафиолетовую область приходится до 90% всего излучения. [53]. В целом для задач разрушения органических соединений в ЖРО их свойства аналогичны лампам низкого давления.

### 3.4. Эксимерные лампы

Эксимерные лампы испускают свет в результате неравновесного излучения эксимерных или экциплесных молекул [54]. Особенностью этих молекул является их устойчивость в электронно-возбужденном состоянии и отсутствие прочной связи в основном [55]. Ряд таких молекул имеет интенсивный В-Х переход в УФ или ВУФ диапазонах спектра, что позволяет с высокой эффективностью трансформировать введенную в среду энергию в оптическое излучение. В зависимости от используемой в лампе смеси газов лампа может излучать квазимонохроматическое (полуширина спектрального интервала зависит от давления смеси газов) излучение в диапазоне от 172 до 345 нм [56]. Выход излучения составляет 10–15% от электрической мощности. Известны работы по применению эксимерных ламп с длиной волны 172 нм [57] для разрушения органических соединений в промышленных стоках. Эти данные позволяют рассматривать эксимерные лампы как потенциальный источник УФ излучения для применения в системах обработки ЖРО.

Характерный спектр различных эксимерных ламп приведен на рис. 8.

### 3.5. Светодиоды

Самым молодым источником УФ излучения являются светодиоды, бурное развитие которых началось в XXI веке. К их достоинствам можно отнести огромный декларируемый ресурс (до 100 000 часов).

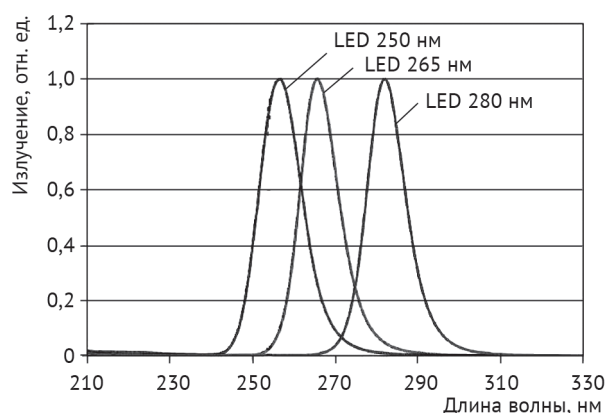


Рис. 9. Спектры излучения светодиодов УФ-С диапазона. [59]

Однако на текущий момент УФ светодиоды с диапазоном излучения короче 365 нм относятся, скорее, к лабораторным изделиям, имеют значительную цену (несколько сотен долларов за штуку), небольшой ресурс (до 1000 часов) и крайне низкую эффективность преобразования энергии в излучение от 15% для светодиодов с длиной волны 365 нм до 0,01% для 230 нм [58]. Несмотря на это, уже начинают появляться работы, посвященные возможности применения этих устройств как для дезинфекции [59], так и для разрушения органических веществ фотокаталитическим методом [60, 61]. В ближайшей перспективе применение светодиодов в системах очистки ЖРО маловероятно, ввиду недостаточной проработки данной технологии, малого объема экспериментальных данных, а также возможной ускоренной деградации полупроводниковой структуры под воздействием ионизирующего излучения [62]. Характерный спектр различных светодиодов приведен на рис. 9.

### 3.6. Ксеноновые лампы

Для обработки ЖРО гораздо больше подходят импульсные источники УФ излучения — ксеноновые лампы с непрерывным спектром в диапазоне 190–300 нм, имеющие высокую интенсивность (до  $10\,000 \text{ Вт/см}^2$ ). Такие источники света обеспечивают при одинаковых дозах энергии более высокую степень разложения органических соединений по сравнению с УФ лампами, имеющими линейчатый спектр. Такой эффект обусловлен тем, что непрерывный спектр ксеноновой лампы гораздо лучше перекрывает спектры поглощения большинства органических соединений, содержащихся в ЖРО [15].

Преимуществами этих ламп являются следующие факторы.

1. Непрерывный энергетический спектр излучения в УФ области спектра, охватывающий область



- высокоэнергетичных квантов (при  $\lambda$  от 200 до 300 нм). Это позволяет обеспечить квазирезонансное деструктивное воздействие на молекулы различных классов органических соединений (рис. 10).
2. Чрезвычайно высокая плотность потока мощности энергетического воздействия (или интенсивность), не сопоставимая по масштабу величин с широко применяемыми ртутными УФ лампами непрерывного действия. Импульсные технологии используют трубчатые УФ лампы, поверхностная плотность мощности излучения которых в десятки тысяч раз превосходит мощность самых мощных ртутно-кварцевых и эксимерных ламп — характерные значения плотности УФ излучения ксеноновых ламп составляют десятки киловатт с 1 см<sup>2</sup> поверхности лампы (в импульсе). Такая высокая интенсивность импульсного УФ излучения (также как и характер спектра) приводит к радикальному изменению химизма протекающих под действием излучения реакций деструкции и фотоокисления. Прежде всего, это выражается в том, что вследствие высокой мгновенной концентрации химически активных первичных продуктов фотолиза (возбужденных молекул и радикалов) будут реализовываться условия для хорошо разветвленных цепных реакций окисления с высокими скоростями протекания (реакции могут носить взрывной характер, аналог — фотоиницированное окисление водорода фтором). Это должно способствовать достижению более глубоких степеней фотодеструкции исходных органических примесей и снижению удельных энергетических затрат на очистку.
  3. Короткая длительность воздействия (от 5 до 150 мкс), совпадающая по порядку величин со временем жизни многих возбужденных состояний молекул и характерного времени элементарных процессов и химических реакций.

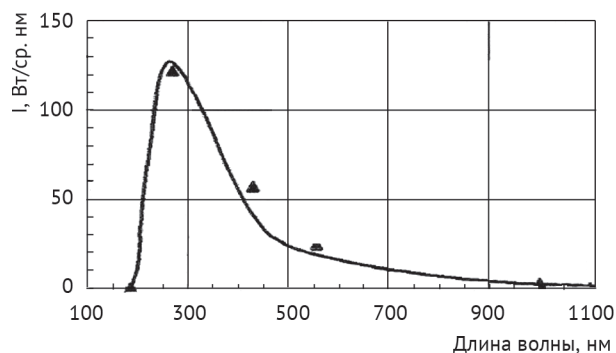


Рис. 10. Характерный спектр излучения импульсной ксеноновой лампы

4. Форма или характер воздействия — импульсно-периодический (частотный), при котором частота посылок энергетических импульсов (особенно при использовании шаровой лампы, работающей с высокой частотой следования импульсов — порядка 1000 и более Гц) может выступать в роли параметра, определяющего (самостоятельно или в комплексе с другими) результирующую эффективность воздействия.

Вышеперечисленные преимущества воздействия импульсного УФ излучения на деструкцию сложных органических подтверждены большим количеством экспериментальных исследований [63–69].

Впервые возможность применения высокоинтенсивного импульсного УФ излучения, генерируемого ксеноновой лампой, для разрушения органических комплексообразователей в растворах, моделирующих по своему составу жидкие радиоактивные стоки АЭС, экспериментально показана в [64].

В этой работе исследовалось фотохимическое и фотоокислительное разрушение ЭДТА в водном растворе, имитирующем дезактивационный раствор (концентрация 6 г/л, рН = 12,0), который обычно применяется для очистки оборудования, загрязненного радиоактивными веществами. В экспериментах использовались импульсная ксеноновая лампа ИНП-7/80 со средней электрической мощностью ~100 Вт ( $W_0=100$  Дж,  $\tau_{0,5} \sim 80$  мкс) и (для сравнения) непрерывная ртутная лампа низкого давления. Средняя мощность коротковолнового УФ излучения (200–300 нм) ксеноновой лампы составляла 12 Вт, импульсная — 0,15 МВт, мощность УФ излучения ртутной лампы ~5 Вт. В качестве дополнительного окислителя применялся пероксид водорода. Кинетические кривые разложения ЭДТА в модельном растворе при различных условиях представлены на рис. 11.

В темновых условиях (т.е. без УФ облучения) окисление ЭДТА пероксидом водорода протекает с низ-

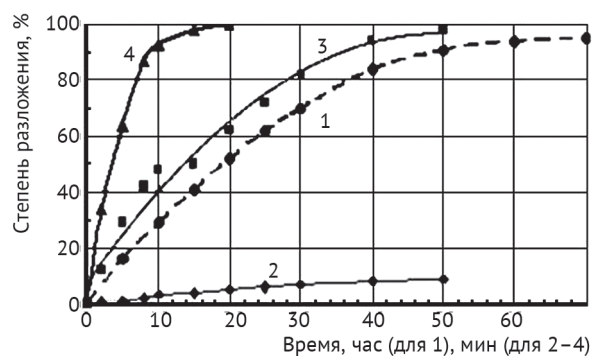


Рис. 11. Кинетика деструкции ЭДТА под воздействием различных факторов: 1 — H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (3 г/л); 2 — Hg-лампа; 3 — Xe-лампа; 4 — Xe-лампа + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (3 г/л)

кой скоростью — степень разложения составляет 95% за 70 часов (кривая 1). Кривые 2 и 3 демонстрируют кинетику прямого (т.е. без дополнительных окислителей) фотолиза ЭДТА под действием УФ излучения ртутной лампы (2) и импульсной ксеноновой лампы (3). Видно, что при использовании импульсной ксеноновой лампы процесс деструкции протекает в 10–12 раз более эффективно и, следовательно, появляется возможность применение прямого излучения такой лампы для разрушения органических комплексов. Экспериментально исследовано также влияние УФ излучения ксеноновой лампы на кинетику окисления ЭДТА пероксидом водорода. Установлено, что воздействие высокоинтенсивного импульсного УФ излучения на окислительную систему ЭДТА —  $H_2O_2$  ускоряет процесс окисления более чем в 200 раз (кривые 1, 4). По сравнению с процессом прямого фотолиза комбинированное применение импульсного УФ излучения и пероксида водорода приводит к снижению в несколько раз удельных энергозатрат на очистку.

В работах [70] и [71] было показано, что эффективность вышеописанного метода обработки сохраняется даже при наличии в растворе солей ( $NaNO_3$ ), концентрация которых превышает концентрацию ЭДТА в 30 раз (рис. 12).

#### 4. Выводы

В табл. 6 приведено сравнение наиболее распространенных источников УФ излучения.

При выборе метода окислительного разрушения органических соединений, содержащихся в ЖРО, помимо его эффективности, необходимо учитывать и другие факторы: стоимость, безопасность, сложность аппаратного оформления и эксплуатации. Например, применение в качестве окислителя озона, не менее эффективного, чем  $H_2O_2$ , влечет за собой использование дополнительного оборудования — довольно энергоемких озонаторов, а также создает условия

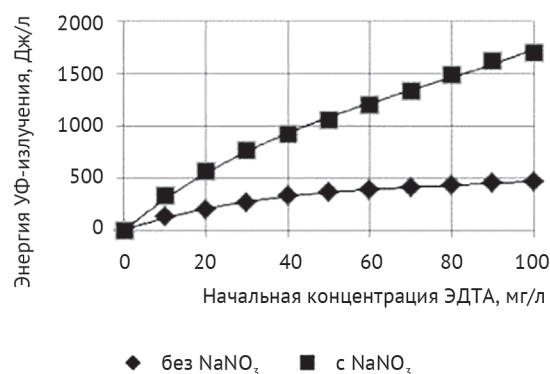


Рис. 12. Энергия УФ облучения, необходимая для деструкции ЭДТА, содержащегося в 1 л при разных начальных концентрациях [71]

повышенной пожароопасности. Метод каталитического окислительного разрушения органики требует дополнительных затрат на создание наноструктурированных катализаторов и их обслуживание.

По совокупности характеристик наиболее перспективным выглядит метод совместного использования химического окислителя  $H_2O_2$  и УФ облучения с использованием ксеноновых ламп со сплошным эмиссионным спектром в диапазоне 190–300 нм и высокой интенсивностью. Для создания оборудования, эффективно работающего с большими объемами реальных ЖРО, этот метод представляется наиболее приемлемым.

В настоящее время специалистами МГТУ им. Н.Э. Баумана и ФГУП ЭЗАН (г. Черноголовка) при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы» начата работа (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57414X0067), направленная на практическую реализацию вышеописанной технологии.

Таблица 6

Сравнение источников УФ излучения

Тип источника	Выход излучения от электрической мощности, %	Доля УФ излучения в спектре, %	Интенсивность излучения, Вт/см <sup>2</sup>	Ресурс, ч	Тип спектра
Ртутная лампа низкого давления	30–38	до 80	0,05–0,3	до 16 000	монохроматичный
Ртутная лампа среднего давления	15–20	до 40	1–10	4 000–16 000 <sup>3</sup>	полихроматичный
Амальгамная лампа	до 40	85–90	0,5–1	до 16 000	монохроматичный
Экцимерная лампа	10–15	до 95	0,2–0,4	1 000–2 000	монохроматичный
Светодиод	0,1–0,01 (УФ-С)	100	0,01 (УФ-С)	1 000 (УФ-С)	монохроматичный
Ксеноновая лампа	50–70	15–30	более 10 000	10 000 000 имп.	непрерывный

## ЛИТЕРАТУРА

1. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010). СП 2.6.1.2612–10. — Москва: Минздрав России, 2010.
2. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СанПин 2.6.1.2523–09. Москва: Минздрав России, 2009.
3. Рябчиков Б.Е. Очистка жидких радиоактивных отходов. — Москва: ДеЛи принт, 2008. 512 с.
4. Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами (СПОРО-2002). СП 2.6.6.1168–02. — Москва: Минздрав России, 2002.
5. Сбор переработка хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности. НП-019–2000 // Вестник Госатомнадзора России. 2000; 6 (12).
6. Кульский Л.А., Страхов Э.Б., Волошинова А.М. Технология водоочистки на атомных энергетических установках. — Киев: Наукова Думка, 1986. 272 с.
7. Амелогова Н.И., Симановский Ю.М., Трапезников А.А. Дезактивация в ядерной энергетике. — Москва: Энергоатомиздат, 1982. — 256 с.
8. Никифоров А.С., Куличенко В.В., Жихарев М.И. Обезвреживание жидких радиоактивных отходов. — Москва: Энергоатомиздат, 1985. — 184 с.
9. Руденко Л.И., Джужа О.В., Хан В.Е. Разработка способа очистки кубовых остатков жидких радиоактивных отходов от органических соединений и трансурановых элементов // Материалы 5-й Международной конференции «Сотрудничество для решения проблемы отходов». — Харьков, 2008.
10. Seliverstov A.F., Lagunova Y.O., and Ershov B.G. Recovery of Radioactive Cobalt from Aqueous EDTA Solutions Using Concentrated Ozone // Radiochemistry. 2009; Vol. 51. No. 3. pp. 326–328.
11. Руденко Л.И., Джужа В.Е., Хан О.В. Окислительная очистка жидких радиоактивных отходов от органических соединений и радионуклидов перманганатом калия // Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2007; 2: 143–146.
12. Савкин А.Е., Моренова А.Г., Захарова Е.В. Окислительно-сорбционная очистка кубовых остатков Ленинградской АЭС от радионуклидов // Радиохимия. 2003; Т. 45. 4: 362.
13. Garnov A.Y., Gogolev A.V., and Shilov V.P. Catalytic Decomposition of Organic Anions in Alkaline Radioactive Waste: 1. EDTA Oxidation // Radiochemistry. 2002. Vol. 44. No. 5. pp. 482–488.
14. Venkatadri R., Peters R.W. Chemical Oxidation Technologies: Ultraviolet Light/Hydrogen Peroxide, Fenton's Reagent, and Titanium Dioxide-Assisted Photocatalysis // Hazardous Waste & Hazardous Materials. 1993. Vol. 10. No. 2. pp. 107–149.
15. Seliverstov A.F., Ershov B.G., and Kamrukov A.S. Oxidative Degradation of EDTA in Aqueous Solutions under UV Irradiation // Radiochemistry. 2008. Vol. 50. No. 1. pp. 70–74.
16. Шевченко М.А., Марченко П.В., Таран П.Н. Окислители в технологии водообработки. — Киев: Наукова думка, 1979. — 176 с.
17. Мартынов П.Н. и др. Способ переработки жидких радиоактивных отходов от применения дезактивирующих растворов. — 2473145, 2013.
18. Лагунова Ю.О., Селиверстов А.Ф., Милютин В.В., Ершов Б.Г. Выделение радиоактивного кобальта (60со) из водных растворов, содержащих ЭДТА // Материалы научно-технического семинара молодых ученых и аспирантов ФГУП «РАДОН» и ИФХЭ РАН. — Сергиев Посад, 2013.
19. Аleshин А.М., Гусев Б.А., Мирошниченко И.В. Анализ эффективности рецептур растворов и технологий дезактивации парогенераторов ПГ-440 И ПГВ-1000М // Материалы 7-го международного семинара по горизонтальным парогенераторам. — Подольск, 2006.
20. Караффа-Корбутть В.В. Озон и его применение в промышленности и санитарии. — СПб.: Образование, 1912.
21. Лагунова Ю.О., Селиверстов А.Ф., Ершов Б.Г. Окислительное разложение оксалат-ионов в водных растворах концентрированным озоном // Атомная энергия. 2012; Т. 111. № 5: 31–35.
22. Омельчук В.В., Стахив М.Р., Савкин А.Е. Разработка технологии и переработка кубовых остатков на Кольской АЭС. // Безопасность окружающей среды. 2007; 3: 34–37.
23. Hoigne J. In Progress Technologies for water treatment. Ed. Plenum. Press, 1988.
24. Разумовский С.Д., Заиков Г.Е. Озон и его реакции с органическими соединениями. — М.: Наука, 1974. — 322 с.
25. Masschelein W.J. Processes unitaires du traitement de l'eau potable. Ed. CEBEIOS. — Hiege, 1996.
26. Дмитриев С.А., Савкин А.Е., Варлаков А.П. Переработка жидких радиоактивных концентратов первой в мире АЭС // Сб. докладов. Безопасность ядерных технологий. Обращение с радиоактивными отходами. 7-я международная конференция. — СПб., 2004.
27. Савкин А.Е. Переработка кубовых остатков АЭС с использованием селективных сорбентов. — М., 1999. 24 с.
28. Wang J., Wang X., Li G. Degradation of EDTA in aqueous solution by using ozonolysis and ozonolysis combined with sonolysis // Journal of Hazardous Materials, 2009. Vol. 176. pp. 333–338. 2009. Vol. 176. pp. 333–338.
29. Appaw C., Adewuyi Y.G. Destruction of carbon disulfide in aqueous solutions by sonochemical oxidation // J. Hazard. Mater. 2002. No. 90. pp. 237–249.
30. William H.G., Joon-Wun Kang, Douglas H.C. The chemistry of water treatment processes involving Ozone, Hydrogen Peroxide and ultraviolet radiation. // Ozone science & engineering. 1987. Vol. 9. pp. 335–352.
31. Ku Y., Wang L., and Shen Y. Decomposition of EDTA in aqueous solution by UV/H2O2 process // J. Hazard. Mater. 1998. Vol. 60. pp. 41–55.

32. Лагунова Ю.О. Использование озона и пероксида водорода для окислительного разложения органических комплексонов в процессах очистки ЖРО. 2011. 165 с.
33. Авраменко ВА и др. Способ переработки кубового остатка жидких радиоактивных отходов. №2297055, 2006.
34. Avramenko V.A., Zheleznov V.V., Kaplun E.V. Sorption-reagent method in liquid radioactive waste management // В сборнике: Materials Research Society Symposium — Proceedings Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXV. Boston. 2002.
35. Avramenko V., Mayorov V., Marinin D. Macroporous catalysts for hydrothermal oxidation of metallorganic complexes at liquid radioactive waste treatment // В сборнике: Proceedings of the International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, ICEM Сер. «ASME 2010 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management ICEM2010». 2010.
36. Braehler G., Rieck R., Avramenko V.A. Nuclide separation by hydrothermal treatment and ion exchange: a highly effective method for treatment of liquid effluents // В сборнике: Proceedings of the International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, ICEM Сер. «ASME 2011 14th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM 2011». 2011.
37. Сергиенко В.И., Авраменко В.А., Голуб А.В. Гидротермальная переработка кубовых остатков АЭС // Материалы конференции «Вологдинские чтения». 2008.
38. Химическая энциклопедия.
39. Block S.S., editor. Disinfection, Sterilization, and Preservation. 5th ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2001. 1481 pp.
40. ISO 21348 Process for Determining Solar Irradiances. 2007.
41. Novikov D.O., Lagunova Y.O., Kamrukov A.S. Photooxidative degradation of oxalate ions with concentrated ozone using high-intensity pulsed continuum UV radiation // High Energy Chemistry. 2014. Vol. 48. No. 6. pp. 389–390.
42. Beltran F.J. Ozone Reaction Kinetics for Water and Wastewater Systems. CRC Press, 2003. 384 pp.
43. Веб-сайт компании «Xenozone». URL: <http://www.xenozone.ru/support/aop> (дата обращения: 3.12.2014).
44. Rekab K., Lepeyre C., Dunanda M. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and/or photocatalysis under UV-C irradiation for the removal of EDTA, a chelating agent present in nuclear waste waters // Applied Catalysis A: General. 2014. Vol. 488. pp. 103–110.
45. Seshadri H., Sinha P.K. Efficient decomposition of liquid waste containing EDTA by advanced oxidation nanotechnology // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2012. Vol. 292. pp. 829–835.
46. Rekab K., Lepeyre C., Goettmann F., Dunand M. Degradation of a cobalt(II)-EDTA complex by photocatalysis and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV-C. Application to nuclear wastes containing <sup>60</sup>Co // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2014.
47. Koutchma T. Preservation and Shelf Life Extension UV Applications for Fluid Foods. Academic Press, 2014. 50 pp.
48. Schalk S., Volker A., Erich A. UV-Lamps for Disinfection and Advanced Oxidation — Lamp Types, Technologies and Applications. Heraeus Noblelight GmbH, 2013.
49. Каталог продукции Light Sources, Inc. 2013.
50. Peneta B.B., Шибанов В.В. Устройства, генерирующие УФ излучение // Флексо плюс. 2006. № 1,
51. Liua X.L., Wua F., Denga N.S. Photodegradation of 17-ethynylestradiol in aqueous solution exposed to a high-pressure mercury lamp (250 W) // Environmental Pollution. 2013. Vol. 126. No. 3. pp. 393–398.
52. Jin S., Sharpless C., Linden K. Aging evaluation of medium-pressure mercury lamps under typical operating conditions for drinking water disinfection applications // Proceedings of the Water Environment Federation, Disinfection 2007. 2007.
53. Каталог продукции НПО ЛИТ. 2014.
54. Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.А. Эксилампы — эффективные источники спонтанного УФ и ВУФ излучения // Успехи физических наук. 2003. Т. 173. № 2: 201–217.
55. Kogelschatz U. Silent-discharge driven excimer UV sources and their applications // J. Appl. Surface Science. 1992. No. 54. pp. 410–423.
56. Соснин Э.А., Пикулев А.А., Тарасенко В.Ф. Исследование оптических характеристик цилиндрических эксиплексных и эксимерных ламп с сверхвысокочастотным возбуждением // Журнал технической физики. 2011. Т. 81. № 4.
57. Izyumov S.V., Chabak A.F., Shchekotov E.Y. Optimization of Integrated Advanced VUV/UV/O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Destruction of Organic Matter and Degasification of Dissolved Oxygen in Industrial Condensate Water // Материалы «The 19th International Conference on Advanced Oxidation Technologies for Treatment of Water, Air and Soil». San Diego. 2013.
58. Каталог продукции Roithner Lasertechnik GmbH. 2014.
59. Charter C. Master degree thesis: «UV-LED irradiation technology for point-of-use water disinfection in developing communities». Colorado. 2009. 75 pp.
60. Korovina E., Selishcheva D., Besova A. UV-LED TiO<sub>2</sub> photocatalytic oxidation of acetone vapor: Effect of high frequency controlled periodic illumination // Applied Catalysis B: Environmental. 2015. Vol. 163. pp. 143–149.
61. Mohammadhossein R., Mostafa F. Kinetic study for photocatalytic degradation of Direct Red 23 in UV-LED/nano-TiO<sub>2</sub>/S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup> process: Dependence of degradation kinetic on operational parameters // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2014. Vol. 20. No. 5. pp. 3695–3702.
62. Бобыль А.В., Конников С.Г., Устинов В.М. Радиационно-стимулированная деградация поверхности GaAs и транзисторных структур с высокой подвижностью электронов // Физика и техника полупроводников. 2012. Vol. 46. No. 6.
63. Еришов Б.Г., Камруков А.С., Селиверстов А.Ф. Разработка комбинированного фотохимического метода очистки воды от высокотоксичных соединений // Сб. научн. трудов «Проекты развития инфраструктуры города». Москва. 2004.
64. Еришов Б.Г., Камруков А.С., Козлов Н.П. Новая фотохимическая технология переработки жидких радио-



- активных отходов // Сб. научных трудов VI Междуна- р. Симпозиума по радиационной плазмодинамике. РПД-2003. 2003.
65. Сковрцов Л.С., Варшавский В.Я., Камруков А.С. Очистка сильно загрязненных стоков от полигонов захороне- ния твердых бытовых отходов // Тез. Докл. II Между- нар. Конгресса «Вода: экология и технология» Аква- тэк-96. 1996.
66. Сковрцов Л.С., Варшавский В.Я., Камруков А.С. Очистка фильтрата полигонов твердых бытовых отходов // Чи- стый город. 1998; 2: 2–7.
67. Гончарова А.Я., Камруков А.С., Кирпиченков А.Б. Фо- тоокислительная деструкция гемоглобина в водных растворах под действием высокоинтенсивного им- пульсного излучения сплошного спектра // Химико- фармацевтический журнал. 2008. Т. 42. № 10: 30–32.
68. Камруков А.С., Козлов Н.П., Селиверстов А.Ф. Фотохими- ческая очистка воды широкополосным импульсным УФ излучением // Безопасность в техносфере. 2006; 1: 38–44.
69. Козлов Н.П. Плазменная техника и плазменные техно- логии: Сб. научн. Трудов. НИЦ «Инженер», 2003.
70. Новиков Д.О., Камруков А.С., Козлов Н.П. Фотоокисли- тельная деструкция эдта в водных растворах импульс- ным уф излучением сплошного спектра // Материалы 40-й Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС. — Звенигород, 2013.
71. Камруков А.С., Козлов Н.П., Новиков Д.О. Эксперимен- тальные исследования деструкции этилендиаминтетра- уксусной кислоты (ЭДТА) в водных растворах с высокой концентрацией азотнокислого натрия при воздействии импульсного широкополосного ультрафиолетового из- лучения // Наука и образование. 2013; 6: 71–80.

## REFERENCES

1. *Osnovnyye sanitarnyye pravila obespecheniya radiatsion- noy bezopasnosti* [Basic Sanitary Rules for Radiation Safety] (OSPORB 99/2010). SP 2.6.1.2612–10. Moscow: Mizdrav Russia, 2010. [in Russian]
2. *Normy radiatsionnoy bezopasnosti* [Radiation Safety Norms] (NRB-99/2009). SanPin 2.6.1.2523–09. Moscow: Mizdrav Russia, 2009. [in Russian]
3. Ryabchikov B.E. *Ochistka zhidkikh radioaktivnykh otkho- dov*. [Purification of liquid radioactive waste.]. Moscow: DeLi print, 2008. 512 p. [in Russian]
4. *Sanitarnyye pravila obrashcheniya s radioaktivnymi otkho- dami* [Sanitary rules for radioactive waste management] (SPORO-2002). SP 2.6.6.1168–02. Moscow: Mizdrav Russia, 2002. [in Russian]
5. *Sbor pererabotka khraneniye i konditsionirovaniye zhid- kikh radioaktivnykh otkhodov. Trebovaniya bezopasnosti*. [Gathering processing storage and conditioning of liquid radioactive waste. Safety requirements.] NP-019–2000 // Vestnik Gosatomnadzora Rossii. 2000. № 6 (12). [in Russian]
6. Kul'skiy L.A., Strakhov E.B., Voloshinova A.M. *Tekhnologiya vodoочистки na atomnykh energeticheskikh ustanovkakh*. [Water purification technology for nuclear power plants] Kiev: Naukova Dumka, 1986. 272 p. [in Russian]
7. Ampelogova N.I., Simanovskiy YU.M., Trapeznikov A.A. *Dezaktivatsiya v yadernoy energetike*. [Deactivation in Nuclear Energy] Moscow: Energoatomizdat, 1982. 256 p. [in Russian]
8. Nikiforov A.S., Kulichenko V.V., Zhikharev M.I. *Obez- vrezhivaniye zhidkikh radioaktivnykh otkhodov*. [Neutra- lization of liquid radioactive waste.] Moscow: Energo- atomizdat, 1985. 184 p. [in Russian]
9. Rudenko L.I., Dzhuzha O.V., Khan V.E. *Razrabotka sposoba ochistki kubovykh ostatkov zhidkikh radioaktivnykh otkho- dov ot organicheskikh soyedineniy i transuranovykh elemen- tov* [Development of treatment method for stillage residues of liquid radioactive wastes to remove organic substances and transuranium elements] // *Materialy 5-y Mezhdun- arodnoy konferentsii «Sotrudnichestvo dlya resheniya prob- lemy otkhodov»* [Proceedings of the 5th International Con- ference «Cooperation for Waste Issues»]. Khar'kov. 2008. [in Russian]
10. Seliverstov A.F., Lagunova Y.O., and Ershov B.G. Recovery of Radioactive Cobalt from Aqueous EDTA Solutions Us- ing Concentrated Ozone // *Radiochemistry*. 2009. Vol. 51. No. 3. pp. 326–328. DOI: 10.1134/S1066362209030205
11. Rudenko L.I., Dzhuzha V.Ye., Khan O.V. *Okislitel'naya ochistka zhidkikh radioaktivnykh otkhodov ot organicheskikh soyedineniy i radionuklidov permanganatom kaliya* [The ox- idizing purification of liquid radioactive waste from organic substances and radionuclides with the use of a water solution of potassium permanganate] // *Reports of the National Acad- emy of Sciences of Ukraine*. 2007; 2: 143–146. [in Russian]
12. Savkin A.E., Morenova A.G., Zakharova E.V., Rodygina N.I. Oxidative Sorption Treatment To Remove Radionu- clides from the Bottoms of the Leningrad Nuclear Power Plant // *Radiochemistry*. 2003. 45 (4): 399–402. DOI: 10.1023/A:1026121906560
13. A. Yu. Garnov, A. V. Gogolev, V. P. Shilov, L. N. Astafuro- va, N. N. Krot. Catalytic Decomposition of Organic Ani- ons in Alkaline Radioactive Waste: 1. EDTA Oxidation // *Radiochemistry*. 2002. Vol. 44. No. 5. pp. 482–488. DOI: 10.1023/A:1021183509099
14. Venkatadri R., Peters R.W. Chemical Oxidation Technolo- gies: Ultraviolet Light/Hydrogen Peroxide, Fenton's Rea- gent, and Titanium Dioxide-Assisted Photocatalysis // *Haz- ardous Waste & Hazardous Materials*. 1993. Vol. 10. No. 2. pp. 107–149. DOI: 10.1089/hwm.1993.10.107
15. Seliverstov A.F., Ershov B.G., Lagunova Yu.O., Morozov P.A., Kamrukov A.S., Shashkovskii S.G. Oxidative Degrada- tion of EDTA in Aqueous Solutions under UV Irradia- tion // *Radiochemistry*. 2008. Vol. 50. No. 1. pp. 70–74. DOI: 10.1134/S1066362208010116
16. Shevchenko M.A., Marchenko P.V., Taran P.N. Okisliteli v tekhnologii vodoобработки. [Oxidants in water treatment technology.] Kiyev: Naukova dumka, 1979. 176 pp. [in Russian]
17. Martynov P.N. et al. *Sposob pererabotki zhidkikh radio- aktivnykh otkhodov ot primeneniya dezaktiviruyushchikh*



- rastvorov*. [Method for processing liquid radioactive waste from the use of decontamination solutions] Patent RF, No. 2473145, 2013. [in Russian]
18. Lagunova Yu.O., Seliverstov A.F., Milyutin V.V., Yershov B.G. *Vydeleniye radioaktivnogo kobal'ta (60so) iz vodnykh rastvorov, soderzhashchikh EDTA* [Isolation of radioactive cobalt (60Co) from aqueous solutions containing EDTA] // *Materialy nauchno-tekhnicheskogo seminarov molodykh uchennykh i aspirantov FGUP «RADON» i IFKHE RAN* [Proceedings of scientific and technical seminar for young scientists and graduate students FSUE «Radon» and IPCE]. Sergiyev Posad. 2013. [in Russian]
  19. Aleshin A.M., Gusev B.A., Miroshnichenko I.V. *Analiz effektivnosti retseptur rastvorov i tekhnologiy dezaktivatsii parogeneratorov PG-440 I PGV-1000M* [Analysis of the effectiveness of formulations and solutions of decontamination of steam generators PG-440 and PGV-1000M] // *Materialy 7-go mezhdunarodnogo seminarov po gorizontallym parogeneratoram*. [Proceedings of 7th international seminar on horizontal steam generators.] Podol'sk. 2006. [in Russian]
  20. Karaffa-Korbutt' V.V. *Ozon i yego primeneniye v promyshlennosti i sanitarii*. [Ozon and its application in industry and sanitation.] St. Petersburg: Obrazovaniye, 1912. [in Russian]
  21. Lagunova Yu.O., Seliverstov A.F., Ershov B.G., Basiev A.G. Oxidative decomposition of oxalate ions in water solutions of concentrated ozone // *Atomic energy*. 2012. Vol. 113. No. 2. pp. 112–116. DOI: 10.1007/s10512-012-9603-9.
  22. Omel'chuk V.V., Stakhiv M.R., Savkin A.Ye. *Razrabotka tekhnologii i pererabotka kubovykh ostatkov na Kol'skoy AES*. [Process development and vat residue treatment at the Kola NPP ] // *Bezopasnost' okruzhayushchey sredy* [Environmental Safety]. 2007; 3: 34–37. [in Russian]
  23. Hoigne J. In *Progress Technologies for water treatment*. Ed. Plenum. Press, 1988.
  24. Razumovskiy S.D., Zaikov G.E. *Ozon i yego reaktsii s organicheskimi soyedineniyami*. [Ozone and its reaction with organic compounds.] Moscow: Nauka, 1974. 322 p. [in Russian]
  25. Masschelein W.J. *Processes unitaires du traitement de l'eau potable*. Ed. CEBEIOC. Hiege., 1996.
  26. Dmitriyev S.A., Savkin A.E., and Varlakov A.P. *Pererabotka zhidkikh radioaktivnykh kontsentratsiy pervoy v mire AES* [Treatment of liquid radioactive concentrates the world's first nuclear power plant] // *Sb. dokladov. Bezopasnost' yadernykh tekhnologiy. Obrashcheniye s radioaktivnymi otkhodami. 7 mezhdunarodnaya konferentsiya*. [Proc. reports. Safety of nuclear technology. Management of radioactive waste. 7 International Conference.] St. Petersburg. 2004.
  27. Savkin A.E. *Pererabotka kubovykh ostatkov AES s ispol'zovaniyem selektivnykh sorbentov*. *Cand. Diss* [Processing resid NPP using selective sorbents. *Cand. Diss*] Moscow, 1999. 24 s. [in Russian]
  28. Wang J., Wang X., Li G. Degradation of EDTA in aqueous solution by using ozonolysis and ozonolysis combined with sonolysis // *J. Hazard. Mater.*, 2009, Vol. 176. pp. 333–338. DOI:10.1016/j.jhazmat.2009.11.032
  29. Appaw C., Adewuyi Y.G. Destruction of carbon disulfide in aqueous solutions by sonochemical oxidation // *J. Hazard. Mater.* 2002; 90: 237–249. DOI:10.1016/S0304-3894(01)00350-8
  30. William H.G., Joon-Wun Kang, and Douglas H.C. The chemistry of water treatment processes involving Ozone, Hydrogen Peroxide and ultraviolet radiation. // *Ozone science & engineering*. 1987. Vol. 9. pp. 335–352. DOI:10.1080/01919518708552148
  31. Ku Y., Wang L., and Shen Y. Decomposition of EDTA in aqueous solution by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process // *J. Hazard. Mater.* 1998. Vol. 60. pp. 41–55. DOI:10.1016/S0304-3894(97)00153-2
  32. Lagunova Yu.O. *Ispol'zovaniye ozona i peroksida vodoroda dlya oksilitel'nogo razlozheniya organicheskikh kompleksov v protsessakh ochistki ZHRO*. *Cand. Diss*. [The use of ozone and hydrogen peroxide for the oxidative decomposition of organic complexing processes LRW treatment *Cand. Diss*.] Moscow, 2011. 165 p. [in Russian]
  33. Avramenko V.A. et al. *Sposob pererabotki kubovogo ostatka zhidkikh radioaktivnykh otkhodov*. [Method for processing distillation residue liquid radioactive wastes], Patent RF, No. 2297055, 2006. [in Russian]
  34. Avramenko V.A., Zheleznov V.V., and Kaplun E.V. Sorption-reagent method in liquid radioactive waste management // *Materials Research Society Symposium — Proceedings Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXV*. Boston. 2002.
  35. Avramenko V., Mayorov V., and Marinin D. Macroporous catalysts for hydrothermal oxidation of metallorganic complexes at liquid radioactive waste treatment // *Proceedings of the International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, ICEM Cep. «ASME 2010 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management ICEM2010»*. 2010.
  36. Braehler G., Rieck R., and Avramenko V.A. Nuclide separation by hydrothermal treatment and ion exchange: a highly effective method for treatment of liquid effluents // *Proceedings of the International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, ICEM Cep. «ASME 2011 14th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM 2011»*. 2011.
  37. Sergiyenko V.I., Avramenko V.A., Golub A.V. *Gidrotermal'naya pererabotka kubovykh ostatkov AES* [Hydrothermal processing resid NPP] // *Materialy konferentsii «Vologdinskiye chteniya»* [Proceedings of the conference «Vologdinskiye chteniya»]. 2008. [in Russian]
  38. Zefirov N.S. (gl. red.) i dr. *Khimicheskaya entsiklopediya*. [Chemical encyclopedia] Moscow.: Bol'shaya Rossiyskaya entsikl., 1998. 3400 p. [in Russian]
  39. Block S.S., editor. *Disinfection, Sterilization, and Preservation*. 5th ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2001. 1481 pp.
  40. ISO 21348 Process for Determining Solar Irradiances. 2007.
  41. Novikov D.O., Lagunova Y.O., Kamrukov A.S. Photo-oxidative degradation of oxalate ions with concentrated ozone using high-intensity pulsed continuum UV radiation //

- High Energy Chemistry. 2014. Vol. 48. No. 6. pp. 389–390. DOI: 10.1134/S001814391406006X.
42. Beltran F.J. Ozone Reaction Kinetics for Water and Waste-water Systems. CRC Press, 2003. 384 pp.
43. AOP technology. Available at <http://www.xenozone.ru/support/aop> (accessed 3.12.2014). [in Russian]
44. Rekab K., Lepeyre C., Dunanda M. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and/or photocatalysis under UV-C irradiation for the removal of EDTA, a chelating agent present in nuclear waste waters // Applied Catalysis A: General. 2014. Vol. 488. pp. 103–110. DOI:10.1016/j.apcata.2014.09.036
45. Seshadri H., Sinha P.K. Efficient decomposition of liquid waste containing EDTA by advanced oxidation nanotechnology // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2012. Vol. 292. pp. 829–835. DOI: 10.1007/s10967-011-1595-8
46. Rekab K., Lepeyre C., Goettmann F., Dunand M. Degradation of a cobalt(II)-EDTA complex by photocatalysis and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV-C. Application to nuclear wastes containing 60Co // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2015. Vol. 303. pp. 131–137. DOI: 10.1007/s10967-014-3311-y.
47. Koutchma T. Preservation and Shelf Life Extension UV Applications for Fluid Foods. Academic Press, 2014. 50 pp.
48. Schalk S., Volker A., and Erich A. UV-lamps for disinfection and advanced oxidation — Lamp types, technologies and applications. IUVA News 8(1): 32–37. UL. 2006.
49. Product catalogue Light Sources, Inc. 2013.
50. Repeta V.B., Shibanov V.V. Ustroystva, generiruyushchiye UF izlucheniye [UV radiation generating devices] // Flekso plus, № 1, 2006.
51. Liua X.L., Wua F., and Denga N.S. Photodegradation of 17-ethynylestradiol in aqueous solution exposed to a high-pressure mercury lamp (250 W) // Environmental Pollution. 2003. Vol. 126. No. 3. pp. 393–398. DOI:10.1016/S0269-7491(03)00229-X
52. Jin S., Sharpless C., and Linden K. Aging evaluation of medium-pressure mercury lamps under typical operating conditions for drinking water disinfection applications // Proceedings of the Water Environment Federation, Disinfection 2007. 2007.
53. Product catalogue NPO LIT. 2014.
54. Lomaev M.I., Skakun V.S., Sosnin E.A., Tarasenko V.F., Shitts D.V., Erofeev M.V. “Excilamps: efficient sources of spontaneous UV and VUV radiation” Phys. Usp. 46: 193–209 (2003); DOI: 10.1070/PU2003v046n02ABEH001308.
55. Kogelschatz U. Silent-discharge driven excimer UV sources and their applications // J. Appl. Surface Science. 1992; 54: 410–423. DOI:10.1016/0169-4332(92)90080-H.
56. Sosnin E. A., Pikulev A. A., Tarasenko V. F. Optical characteristics of cylindrical exciplex and excimer lamps excited by microwave radiation // Technical Physics. 2011. Vol. 56. No. 4. pp. 526–530 DOI: 10.1134/S1063784211040293
57. Izyumov S.V., Chabak A.F., Shchekotov E.Y. Optimization of Integrated Advanced VUV/UV/O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Destruction of Organic Matter and Degasification of Dissolved Oxygen in Industrial Condensate Water // «The 19th International Conference on Advanced Oxidation Technologies for Treatment of Water, Air and Soil». San Diego. 2013.
58. Product catalogue Roithner Lasertechnik GmbH. 2014.
59. Charter C. Master degree thesis: «UV-LED irradiation technology for point-of-use water disinfection in developing communities». Colorado. 2009. 75 pp.
60. Korovina E., Selishcheva D., and Besova A. UV-LED TiO<sub>2</sub> photocatalytic oxidation of acetone vapor: Effect of high frequency controlled periodic illumination // Applied Catalysis B: Environmental. 2015. Vol. 163. pp. 143–149. DOI:10.1016/j.apcatb.2014.07.034
61. Mohammadhossein R., Mostafa F. Kinetic study for photocatalytic degradation of Direct Red 23 in UV-LED/nano-TiO<sub>2</sub>/S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup> process: Dependence of degradation kinetic on operational parameters // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2014. Vol. 20. No. 5. pp. 3695–3702. DOI:10.1016/j.jiec.2013.12.068.
62. Bobyl A. V., Konnikov S. G., Ustinov V. M., et al. Radiation-induced surface degradation of GaAs and high electron mobility transistor structures // Semiconductors. 2012. Vol. 46. No. 6. pp. 814–824 DOI: 10.1134/S1063782612060085 [in Russian]
63. Yershov B.G., Kamrukov A.S., Seliverstov A.F. *Razrabotka kombinirovannogo fotokhimicheskogo metoda ochistki vody ot vysokotoksichnykh soyedineniy* [Development of a combined photochemical method of water purification from highly toxic compounds] // *Sb. nauchn. trudov «Proyekty razvitiya infrastruktury goroda»* [Proc. Scien. Works «Proyekty razvitiya infrastruktury goroda»]. Moscow. 2004. [in Russian]
64. Yershov B.G., Kamrukov A.S., Kozlov N.P. *Novaya fotokhimicheskaya tekhnologiya pererabotki zhidkikh radioaktivnykh otkhodov* [New technology photochemical processing of liquid radioactive wastes] // *Sb. nauchnykh trudov VI Mezhdunar. Simpoziuma po radiatsionnoy plazmodinamiki*. [Proc. scientific papers VI Intern. Symposium on Radiation plasma dynamics] RPD-2003. 2003.
65. Skvortsov L.S., Varshavskiy V.Ya., Kamrukov A.S. *Ochistka sil'no zagryaznennykh stokov ot poligonov zakhroneniya tverdykh bytovykh otkhodov* [Purification of highly contaminated waste from landfill disposal of solid wastes] // *Tez. Dokl. II Mezhdunar. Kongressa «Voda: ekologiya i tekhnologiya» Akvatek-96*. [Proc. II International. Congress «Water: Ecology and Technology» Akvatek-96.] 1996. [in Russian]
66. Skvortsov L.S., Varshavskiy V.Ya., Kamrukov A.S. *Ochistka fil'trata poligonov tverdykh bytovykh otkhodov* [Leachate treatment of solid waste landfills] // *Chisty gorod*. 1998; 2: 2–7. [in Russian]
67. Goncharova A. Ya., Kamrukov A. S., Kirpichenkov A.B. et al. Photo-oxidative destruction of hemoglobin in aqueous solutions using high-intensity pulsed continuous-spectrum radiation // Pharmaceutical Chemistry Journal 2008. Vol. 42. No. 10. pp. 596–598. DOI: 10.1007/s11094-009-0178-2 [in Russian]
68. Kamrukov A.S., Kozlov N.P., Seliverstov A.F. *Fotokhimicheskaya ochistka vody shirokopolosnym impul'snym UF izlucheniym* [Photochemical water purification broadband

- pulsed UV radiation] // *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in technosphere]. 2006; 1: 38–44. [in Russian]
69. Kozlov N.P. *Plazmennaya tekhnika i plazmennyye tekhnologii: Sb. nauchn. Trudov.* [The plasma technology and plasma technology: Collection of scientific. Works] Moscow, NITS «Inzhener», 2003. [in Russian]
70. Kamrukov A.S., Kozlov N.P., Novikov D.O., Yalovik M.S. Photooxidative degradation of edta in aqueous solutions by pulsed uv radiation with continuous spectrum // Proceedings of the 40th Zvenigorod Conference on Plasma Physics and CF. Zvenigorod. 2013. [in Russian]
71. Ivahnenko E.U., Kamrukov A.S., Kozlov N.P., Novikov D.O., Yalovik M.S. Experimental studies of degradation of ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) in aqueous solutions with high concentration of sodium nitrate under pulsed broadband ultraviolet radiation // Science and education. 2013; 6: 71–80. DOI: 10.7463/0613.0577231. [in Russian]

## Modern Oxidizing and Photo Oxidative Methods of Complexons Destruction in Liquid Radioactive Waste

**A.S. Kamrukov**, Head of Department, Ph.D. of Engineering, Bauman Moscow State Technical University  
**D.O. Novikov**, Researcher, Bauman Moscow State Technical University

*State-of-the-art analysis for oxidizing technologies related to destruction of complexons and metalloorganic complexes in liquid radioactive waste has been carried out. Ways already put into practice, as well as the experimental ones have been considered. Oxidation by potassium permanganate and hydrogen peroxide and also ozonization and photo oxidation have been considered in detail. It has been shown that oxidation by potassium permanganate with subsequent filtration leads to decrease of isotopes activity, but hereby a considerable volume of manganese dioxide is formed. The ozonization application allows reduce considerably the liquid radioactive waste (LRW) volume, but along with this ozone is the extremely toxic and explosive substance demanding a special equipment for its production. Efficiency of oxidation by hydrogen peroxide and photo oxidation without catalysts is low. The special attention has been paid to combined oxidizing methods (AOP) based on use of ultra-violet (UV) radiation together with ozone and/or hydrogen peroxide. Such methods allow apply the strongest oxidizer – hydroxyl radical – for LRW processing. Efficiency of AOP-methods and their technological capabilities are substantially defined by characteristics of used UV radiation sources. A detailed analysis for a wide range of UV radiation possible sources (low and average pressure mercury lamps, amalgamate lamps, excimer lamps, light-emitting diodes and pulse xenon lamps) has been carried out, their comparative assessment has been executed. Great potential opportunities for the pulse xenon lamps providing a continuous range of radiation in UV area and high intensity for a stream of high-vigorous photons have been noted.*

**Keywords:** liquid radioactive waste, plasma and optical technologies, metalloorganic complexes, photo oxidative destruction, photochemical technologies, ultra-violet radiation.

### Результаты проверок Рособнадзора

Итоги инспекционных проверок в более чем тысяче вузах и филиалах, проведенных в 2014 году Федеральной службой по надзору в сфере образования и науки, подтвердили низкое качество образования в большинстве учреждений и результаты мониторинга эффективности высших учебных заведений.

В сентябре 2013 года в стране функционировало почти 2500 вузов и филиалов, реализующих программы высшего образования. За полтора года их количество сократилось на 600, такое число лицензий было исключено из реестра, сообщил зам. руководителя Рособнадзора Александр Бисеров.

По итогам инспекционных проверок в 2014 году из реестра лицензий исключено 357 вузов, в 73 запрещен прием обучающихся, также было приостановлено действие 25 лицензий. Во время проверок составлено 1390 протоколов об административных правонарушениях на сумму более 21 млн рублей.

Что касается мониторинга эффективности вузов 2013 г., по его результатам Рособнадзору необходимо было проверить 508 вузов и филиалов, показавших низкие результаты или не принявших участие в мониторинге. В итоге 123 вуза и филиала отзывали свои лицензии до начала проверок, которые начались в марте 2014 года.

Контрольно-надзорные мероприятия были проведены в 385 вузах и филиалах. По результатам проверок, 82 лицензии вузов и филиалов исключены из реестра, в 55 запрещен прием обучающихся, у 18 вузов и филиалов приостановлено действие лицензии. Во время проверок составлено 758 протоколов об административных правонарушениях на сумму более 17,7 млн рублей. Устранили выявленные нарушения только 26 вузов и филиалов. По остальным проверки не закончены.

Студентам закрывающихся вузов и филиалов учредители обязаны обеспечить перевод в действующие образовательные организации с сохранением условий обучения.