

В. А. Герлига¹, В. П. Кравченко²,
И. А. Притыка¹, Ганем Хуссам²

¹ Обособленное подразделение «Научно-технический центр» НАЭК «Энергоатом», г. Одесса, Украина

² Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса, Украина

Очистка водных растворов от солей и радионуклидов

Предлагается технология очистки промышленных отходов, основанная на использовании природного минерального сорбента — бентонита, имеющего большую удельную поверхность. Показана возможность очистки жидких радиоактивных отходов (ЖРО) на примере трапных вод, имеющих значительное содержание солей, а также масла и поверхностно-активные вещества. Кроме сорбции радионуклидов примененный наноструктурный сорбент обладает способностью сорбировать тяжелые металлы, соли, бораты.

Предложен и испытан метод очистки реальных растворов ЖРО для последующей обработки сорбционно-кристаллическим концентратом для остекловывания. Коэффициент снижения активности составляет 10^3 . Стоимость технологии незначительна, поскольку она основана на использовании дешевого бентонита. Предлагаемый метод может быть использован для очистки общих промышленных отходов.

Ключевые слова: жидкие радиоактивные отходы, очистка промышленных отходов, трапные воды, кубовый остаток, поверхностно-активные вещества, сорбционно-окислительная технология.

В. А. Герлига, В. П. Кравченко, І. А. Прітика, Ганем Хуссам

Очищення водних розчинів від солей та радіонуклідів

Запропоновано технологію очищення промислових відходів, яка заснована на використанні природного мінерального сорбенту — бентоніту. Показано можливість очищення рідких радіоактивних відходів (РРВ) на прикладі трапних вод, що мають значний сольовий вміст, а також масла та поверхнево-активні речовини.

Крім сорбції радіонуклідів застосований наноструктурний сорбент має здатність сорбувати важкі метали, солі, борати.

Запропоновано та випробувано методику очищення реальних розчинів РРВ для подальшої обробки сорбційно-кристалічним концентратом для склеювання. Коефіцієнт зниження активності становить 10^3 . Вартість технології незначна, оскільки вона базується на використанні дешевого бентоніту. Пропонована методика може бути використана також для очищення загальних промислових відходів.

Ключові слова: рідкі радіоактивні відходи, очищення промислових відходів, трапні води, кубовий залишок, поверхнево-активні речовини, сорбційно-окислювальна технологія.

© В. А. Герлига, В. П. Кравченко, И. А. Притыка, Ганем Хуссам, 2018

Существует большое количество источников загрязнения водоемов и рек. Разработка эффективных и дешевых способов их очистки — актуальная задача, стоящая перед современной наукой. К наиболее значительным источникам загрязнения относятся сточные бытовые сбросы, отходы агрохимии и пестициды, поверхностно-активные вещества (ПАВ), промышленные сточные воды, нефтепродукты, а также сбросы АЭС.

Основными технологическими этапами при обращении с жидкими радиоактивными отходами (ЖРО), вызывающими наибольшие затруднения, являются их переработка и кондиционирование [1].

В иностранной литературе за последние 25 лет отсутствуют какие-либо новые идеи по созданию технологий и оборудования на принципиально новых физико-химических эффектах для переработки ЖРО. Из списка зарубежных стран только Франция не остановилась в поисках путей переработки ЖРО и продолжает совершенствование своей двустадийной технологии [2].

Переработка ЖРО предназначена, прежде всего, для очистки основной массы отходов от радионуклидов и концентрирования последних в минимальном объеме. При переработке ЖРО низкого и среднего уровней активности используют три группы методов: термические, сорбционные и мембранные. Переработка отходов высокого уровня активности возможна только термическими методами — упариванием для последующего кальцинирования и остекловывания. Однако этот метод эффективен и для низко- и среднеактивных отходов. Основная цель упаривания заключается в сведении к минимуму объема отходов и предварительной очистке конденсата вторичных паров от активности.

Остекловывание может быть реализовано в одно- или двустадийном процессе. При одностадийном процессе ЖРО совместно со стеклообразующими добавками подаются в плавитель, где последовательно обезвреживаются, кальцинируются и плавятся, образуя стеклоподобные материалы. При двустадийном процессе обезвреживание и кальцинирование проводятся на одном оборудовании, плавление — на другом.

Предварительное глубокое обезвреживание отходов позволяет значительно увеличить производительность (или уменьшить габаритные размеры) плавителя. Так, при использовании роторного концентратора для увеличения концентрации солей в жидких отходах с 450 до 900 г/л производительность плавителя удается повысить в 2,5 раза.

Нынешние технологии предусматривают применение различных физико-химических процессов и оборудования, при этом их выбор определяется безопасностью и стоимостью [3].

Авторы публикации [4], исходя из анализа технологий переработки РАО, пришли к выводу, что для переработки кубовых остатков (КО), представляющих большую проблему для АЭС из-за наполнения емкостей хранения, наиболее эффективен метод предварительного доупаривания до солесодержания 700—800 г/л с последующим цементованием. Однако, по нашему мнению, цементование оказалось неудачной технологией, что показал мировой опыт эксплуатации. Например, на Ростовской АЭС прекращено ее использование. Аргументов «против» имеется достаточное количество, главные из них — короткий срок безопасного хранения без разрушения и большой объем материалов, идущих на захоронение.

Цель статьи — рассмотреть предложенную авторами новую технологию очистки ЖРО, названную «сорбционно-кавитационно окислительной» (СОК).

Суть СОК-технологии заключается в очистке ЖРО путем ультразвуковой и наносорбентной обработки. В качестве сорбента предложено использовать бентонит, дробление которого, частично до наноразмеров, осуществляется ультразвуковым способом. Выпаривание целесообразно проводить при низком давлении с использованием рекомпрессии вторичного пара [5].

Состояние развития технологии упаривания. Применяемое в настоящее время доупаривание КО до солевого концентрата в установках УГУ-500 с расфасовкой в бочки накладывает ограничения на их окончательную изоляцию. Это объясняется тем, что установки УГУ-500 не позволяют получить качественный солевой плав ввиду быстрого зарастания теплообменных трубок отложениями, из-за чего в солевом плаве вместо допустимых 15 % содержится до 30 % воды. Наличие несвязанной воды приводит к повышенной коррозии бочек с соевым плавом, а их к настоящему моменту накопилось на АЭС уже много. Кроме того, загрузка бочек в дорогостоящие железобетонные контейнеры малоэффективна с точки зрения использования объема контейнера и создает дополнительные трудности на последующих этапах обращения с РАО. К тому же показатели энергетической эффективности УГУ-500 существенно ниже показателей современных выпарных установок. Именно поэтому стоит пересмотреть практику использования УГУ-500.

Для низкосолевых ЖРО наиболее предпочтительным авторы публикации [4] считают метод многоступенчатой фильтрации ЖРО. Однако сорбционно-мембранные технологии могут и не дать требуемой степени очистки от радионуклидов. Кроме того, после насыщения или «отравления» фильтрующего материала он сам становится существенной проблемой для окончательного захоронения. Поэтому и для низкоактивных ЖРО в качестве оптимального стоит рассмотреть термический способ выпаривания, применив для кардинального снижения энергетических затрат технологию рекомпрессии вторичного пара. Эта технология широко используется в современных опреснительных установках, а также в установке для переработки ЖРО фирмы NUKEM. Однако в последней применяется кипение раствора в теплообменных трубках, что усиливает образование отложений, в первую очередь вызванных наличием масел и ПАВ.

Эффективная переработка накопленных ЖРО с минимальными затратами возможна, в первую очередь, при очистке ЖРО от органических и неорганических масел и от ПАВ. Далее технология переработки включает пленочное упаривание в барабанных пленочных аппаратах без процесса кипения [5, 6]; непрерывную очистку греющей поверхности в процессе работы установки; рекомпрессию вторичного пара.

Непрерывность очистки греющей поверхности установки от отложений в процессе упаривания и отсутствие кипения позволяют обеспечивать безостановочную переработку ЖРО в течение нескольких месяцев, что выгодно отличает предложенный в [5, 6] процесс от процессов в УГУ-500.

Экспериментальная проверка применения СОК-технологии. Основное внимание при лабораторных исследованиях было уделено изменению активности и солесодержания реальных трапных вод при их переработке.

Выпаривание ЖРО проводилось на лабораторной установке, представленной на рис. 1.

По приведенной схеме трапные воды из бака 1 с помощью питательного насоса 2 подаются в бак 3, к которому

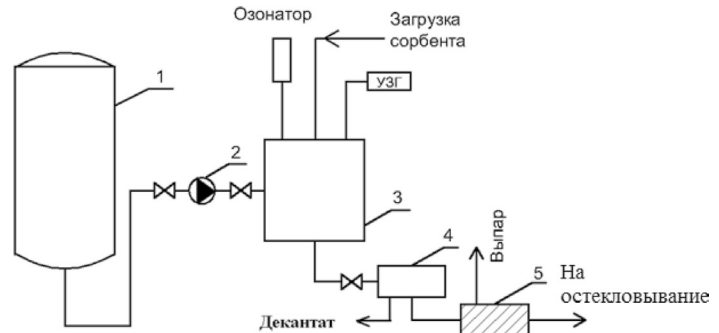


Рис. 1. Принципиальная схема узла очистки трапных вод от органики и ПАВ

подключен озонатор. В баке 3 раствор насыщается озоном и ОН-радикалами и происходят процессы окисления. Затем трапная вода подвергается ультразвуковой обработке, при которой идет физический процесс дробления больших пузырьков воздуха на более мелкие и их распространение по всему объему, а также протекают химические процессы наработки радикалов (Н, ОН, HO_2) с последующим их взаимодействием с растворенными веществами. Таким образом, на этом участке происходят такие основные процессы: осаждение растворенных металлов (Fe^{3+} , Mg^{2+} , Cu^{2+} и др.) в результате их взаимодействия с O_3 и образования нерастворимых продуктов реакции;

окисление сложных органических веществ с образованием простых, разрыв ненасыщенных и ароматических органических соединений по углерод-углеродной связи $\text{C}=\text{C}$; интенсификация коагуляции за счет полученных при окислении полярных молекул.

Для кавитационной обработки ЖРО использовался ультразвуковой генератор.

Таким образом, происходящие в установке преобразования базируются на протекающих физико-химических процессах кавитации и окисления.

Для реализации СОК-технологии очистки ЖРО и получения стекловидной массы, пригодной к безопасному транспортированию и длительному хранению, необходимы природные минералы, обладающие (в естественном виде или после модификации) ярко выраженными сорбционными свойствами к основным радионуклидам, входящим в состав ЖРО АЭС; с другой стороны, указанные материалы должны служить основой для получения стекольной матрицы. Такими материалами могут быть, в частности, кальциты, цеолиты, бентониты. В данной работе для испытания был выбран бентонит. Основным компонентом бентонита является монтмориллонит — глинистый минерал, относящийся к подклассу слоистых силикатов.

Выбор бентонита обусловлен следующими обстоятельствами:

- доступностью и дешевизной сырья;
- высокими сорбционными свойствами, особенно после ультразвуковой модификации;
- химически связанным видом содержащихся в бентоните оксидов, необходимых для получения стекла, что способствует ускорению процесса стеклообразования;

образованием однородной и устойчивой к расслаиванию суспензии при смешении бентонита с растворами ЖРО;

устойчивостью к климатическим условиям при транспортировке и хранении [8–10].

Предлагаемая технология очистки ЖРО от радионуклидов опробовалась на Южно-Украинской АЭС в 2013 году. Для проведения лабораторных испытаний были взяты пробы трапных вод объемом 20 л из бака TZ40B01. Далее две пробы объемом 500 мл были переданы на радионуклидный и химический анализ в лабораторию ЮУАЭС. Измерения проводились спектрометрическим комплексом с точностью $\pm 10\%$. Были получены следующие результаты спектрометрических измерений исходного радионуклидного состава пробы бака TZ40B01:

Изотоп	^{137}Cs	^{134}Cs	^{60}Co	^{54}Mn
Активность, Бк/л	$2,8 \cdot 10^5$	$3,4 \cdot 10^4$	$4,2 \cdot 10^4$	$8,6 \cdot 10^2$

Пробы последовательно прошли этапы очистки по СОК-технологии. Использовалась комбинация способов обработки ЖРО, осуществляемая в следующей последовательности. На ЖРО, помещенные в сосуд с порцией наноструктурного сорбента, воздействовали акустической кавитацией. При воздействии на жидкость звука с амплитудой звукового давления, превосходящей некоторую пороговую величину, во время полупериодов разрежения возникают кавитационные пузырьки, зародышами которых являются газовые включения, содержащиеся в жидкости и порах сорбента.

Пузырьки схлопываются во время полупериодов сжатия, создавая кратковременные (порядка 10^{-6} с) импульсы давления (10^4 кгс/см² и более), способные разрушить даже весьма прочные материалы [7].

Разрушение органических примесей и ПАВ, а также последующее диспергирование входящих в состав ЖРО веществ происходят за счет акустической кавитации и связанных с ней физических явлений, обусловленных гидроударами при захлопывании пузырьков и микропотоками вблизи них [11].

После диспергирования и растворения в воде входящих в состав ЖРО веществ освободившиеся от связей радионуклиды вступают в ионообменные реакции с содержащимся в растворе наноструктурным сорбентом, изготовленным из природного алюмосиликатного минерала (бентонита).

После ультразвуковой обработки на пробы ЖРО воздействовали озоном — сильным окислителем [7]. Озонатор вырабатывает озон из кислорода, содержащегося в атмосферном воздухе. После взаимодействия с загрязняющими химическими и микробиологическими веществами озон превращается в обычный кислород [7].

Озонирование ЖРО приводит к глубокому озонолизу и окислению органических примесей с образованием хорошо диссоциирующих, преимущественно карбоновых кислот, которые образуют с радионуклидами комплексные соединения, не участвующие в реакциях сорбции. Под действием озона в ЖРО происходит окисление органических соединений и ПАВ с последующим образованием осадка, содержащего, в основном, органические соединения ^{54}Mn и ^{60}Co .

Далее раствор поступал на центрифугу 4, где разделялся на две фракции: декантат и сорбционно-кристаллический осадок, который направлялся в роторно-плёночный испаритель 5. Осадок сдавался на анализ в радиохимическую лабораторию АЭС.

Результаты радионуклидного анализа проб, прошедших последовательную обработку кавитацией и озонированием в присутствии наноструктурного сорбента, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты радионуклидного анализа после обработки ЖРО трапных вод ЮУАЭС в присутствии сорбента кавитацией, а затем озоном

Проба		Объемная активность, Бк/л			
		^{54}Mn	^{60}Co	^{134}Cs	^{137}Cs
TZ40B01 (исходная)		$8,6 \cdot 10^2$	$4,2 \cdot 10^4$	$3,4 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^5$
Проходка	1	$8,1 \cdot 10^2$	$3,7 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^5$
	2	$5,9 \cdot 10^2$	$1,3 \cdot 10^4$	$4,3 \cdot 10^3$	$3,6 \cdot 10^4$
	3	$1,3 \cdot 10^2$	$6,3 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^4$

Обрабатываемая проба ЖРО пропускалась несколько раз через емкость 3. Перед каждой новой проходкой в ЖРО добавлялся сорбент из расчета 4 г на 1 л обрабатываемого раствора. Длительность каждой проходки — 30 мин. В конечном счете, с учетом процесса остекловывания, затрачивается 1 кг бентонита на 10 л кубового остатка. При этом объем стекловидной массы более чем в 9 раз меньше объема КО.

Из данных табл. 1 видно, что имеет место снижение удельной активности, а следовательно, и уменьшение концентрации радионуклидов, входящих в состав ЖРО трапных вод ХЖО-2 ЮУАЭС: менее чем на порядок за проход по ^{134}Cs , ^{137}Cs и менее чем на полпорядка за проход по ^{54}Mn , ^{60}Co .

Из полученных экспериментальных данных по активности радионуклидов, входящих в состав ЖРО трапных вод ЮУАЭС, подвергшихся последовательному воздействию ультразвуковой кавитации и озона в присутствии наноструктурного сорбента, имеется незначительное снижение объемной активности радионуклидов.

Далее лабораторная установка была перестроена так, чтобы трапная вода подвергалась одновременному воздействию кавитации и озонированию при наличии сорбента. Результаты экспериментов представлены в табл. 2.

Как следует из табл. 1 и 2, за каждый проход объемная активность радионуклидов, входящих в состав ЖРО трапных вод ЮУАЭС, подвергшихся одновременному воздействию ультразвуковой кавитации и озона в присутствии наноструктурного сорбента, значительно снижается.

В результате одновременного воздействия кавитации и озонирования на раствор при наличии наноструктурного сорбента происходят более эффективные разрушение химических соединений и высвобождение радионуклидов, которые связываются капсулированным (под действием кавитации) наноструктурным сорбентом и оседают.

Результаты эксперимента показывают, что ультразвуковая кавитация является эффективным безреагентным высокоэкологичным методом деструкции органических загрязняющих веществ. Особенно эффективно использование ультразвукового воздействия в комбинации с озонированием, что объясняется возникновением синергетического эффекта.

Данные химического анализа исходных ЖРО (начальная концентрация) и раствора (декантата) после обработки совместно ультразвуком и озонированием при наличии сорбента (конечная концентрация) представлены в табл. 3. Обработка ЖРО предлагаемым способом, как следует

Таблица 2. Снижение активности ЖРО трапных вод ЮУАЭС при одновременной обработке кавитацией и озоном в присутствии сорбента

Проба		Объемная активность, Бк/л					Коэффициент дезактивации
		^{54}Mn	^{60}Co	^{134}Cs	^{137}Cs	Сумма	
TZ40B01 (исходная)		$8,6 \cdot 10^2$	$4,2 \cdot 10^4$	$3,4 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^5$	$3,57 \cdot 10^5$	
Проходка	1	$2,2 \cdot 10^2$	$1,0 \cdot 10^4$	$9,2 \cdot 10^3$	$8,5 \cdot 10^4$	$1,04 \cdot 10^5$	3,41
	2	$1,3 \cdot 10^2$	$6,3 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^3$	$2,4 \cdot 10^4$	$3,19 \cdot 10^4$	11,2
	3	$5,4 \cdot 10^{-1}$	$5,7 \cdot 10^2$	$2,8 \cdot 10^2$	$1,5 \cdot 10^3$	$2,35 \cdot 10^3$	152
	4	$5,4 \cdot 10^{-1}$	$7,8 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^1$	$2,7 \cdot 10^2$	$2,86 \cdot 10^2$	1250

из табл. 3, позволяет снизить удельное солесодержание почти в 2500 раз и рекомендовать предложенный способ и для очистки общепромышленных стоков.

Таблица 3. Сравнение результатов химического анализа проб до и после обработки

Вещество	Концентрация		Коэффициент очистки
	начальная	конечная	
H_3BO_3	1,4 г/дм ³	0,25 г/дм ³	5,6
Cu^{2+}	1,0 г/дм ³	0,2 г/дм ³	5
K^+	16,8 г/дм ³	16,8 г/дм ³	1
Fe^{3+}	1,0 г/дм ³	0,5 г/дм ³	2
Na^+	2,8 г/дм ³	0,352 г/дм ³	7,95
Cl^-	212 мг/дм ³	98 мг/дм ³	2,16
SO_4^{2-}	2,2 г/дм ³	1,2 г/дм ³	1,8
Li^+	0,04 г/дм ³	0,01 г/дм ³	4
pH	8,6	9,2	—
Соли	12 г/дм ³	4,9 мг/дм ³	2448,5

Выводы

Для очистки водных растворов ЖРО предлагается их обработка с использованием ультразвука и озонирования в присутствии сорбента — бентонита (СОК-технология). Экспериментально показано, что одновременная обработка растворов ЖРО озонированием и ультразвуком дает лучшие результаты, чем последовательная. Коэффициент снижения активности пробы трапных вод после четырехкратного воздействия на нее составил 1250, что свидетельствует о высокой эффективности предложенной технологии.

Рассмотренный способ очистки повышает эффективность проведения последующих этапов переработки ЖРО. Так, при упаривании уменьшается количество отложений

на теплообменных поверхностях, а при остекловывании уменьшается количество образующихся пузырей.

Экспериментально проверенная методика очистки ЖРО может применяться также и для других сбросов с целью снижения солесодержания, концентрации ПАВ и масел. Общее солесодержание реальных трапных вод после переработки уменьшилось почти в 2500 раз.

Список использованной литературы

1. Узигов В.А., Безреагентная технология концентрирования ЖРО и других растворов. URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=7531> (дата обращения 20.10.2017)
2. Lefevre J., Les Dechets Nucléaires, Synthesis Book Series, Commissariat à l'énergie atomique, Eyrolles, Paris, 2014, p. 342—344.
3. Basner C., Hillmer T., Markind J., Waste boric reclamation. Proc. Symp. on Waste Management, Tucson, Arizona, Feb. 1981, vol. 2, p. 656—661.
4. Муратов О.Э., Тихонов М.Н. Радиоэкологические аспекты обращения с РАО и ОЯТ в условиях инновационного развития ядерной энергетики. URL: <http://nuclear-submarine-decommissioning.ru/node/755> (дата обращения 20.10.2017).
5. Поворов А. А., Павлова В. Ф., Корнилова Н. В., Шиненкова Н. А. Выпарные аппараты с рекомпрессией водяного пара — энергосберегающая технология и оборудование. URL: <http://zaobmt.com/index.php/articles/153-vacuum-evaporator-article.html> (дата обращения 20.10.2017).
6. Узигов В. А., Кочнов Я. К., Осипова Н. Е., Узигова И. В. Патент РФ № 2488421 МПК (2013) B01D1/22G21F9/00. Способ концентрирования жидких растворов. Опубликовано 27.07.2013.
7. Драгинский В. Л., Алексеева Л. П. Озонирование в процессах очистки воды. М.: ДеЛи принт, 2007. 400 с.
8. Никифоров А. Ф. Очистка питьевой воды от техногенных радионуклидов алюмосиликатными сорбентами. [Экологические проблемы промышленных регионов: мат. Седьмой всерос. науч.-практ. конф.]. Екатеринбург: АМБ, 2006. С. 103104.
9. Clark, D.E., Lerch, R.E. Volume reduction options for the management to low-level radioactive wastes. In: Management of low-level radioactive waste. Ed. By M.W. Carter, e.a. N. Y. etc., Pergamon Press, 1979, v. 1, p. 235—287.
10. Грушичева Е. А., Богданович Н. Г., Емельянов В. П., Петрухина Г. Н., Старков О. В. Неорганические сорбенты: сорбционные свойства природных силикатов. Сорбционные и хроматографические процессы. Воронеж, 2006. Т. 6, вып. 6. С. 922—927.
11. Федоткин И. М., Гулый И. С. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности (теория, расчеты и конструкции кавитационных аппаратов). Ч. 1. К.: Полиграфкнига, 1997. 940 с.

References

1. Uzikov, V. A. (2017) "Reagentless Technology for the Concentration of Liquid Radioactive Waste and Other Solutions" [Bezreagentnaia tekhnologiia kontsentrirvaniia ZhRO i drugih rastvorov], URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=7531> (Rus)
2. Lefevre, J., (2014), "Les Dechets Nucléaires", Synthesis Book Serier, Commissariat a l'énergie atomique, Eyrolles, Paris, 2014, pp. 342—344.
3. Basner, C., Hillmer, T., Markind, J., (1981), "Waste Boric Reclamation", Proc. Symp. on Waste Management, Tucson, Arisona, Feb. 1981, Vol. 2, p. 656—661.
4. Muratov, O. E., Tykhonov, M. N. (2017), "Radioecological Aspects of Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel Management in Conditions of Innovative Development of Nuclear Energy" [Radioekologicheskie aspekty obrashcheniia s RAO i OYaT v usloviakh innovatsionnogo razvitiia yadernoi energetiki], URL: <http://nuclear-submarine-decommissioning.ru/node/755> (Rus)
5. Povorov, A. A., Pavlova, V. F., Kornilova, N. V., Shynenkova N. A. (2017), "Evaporators with Water Vapor Recompression — Energy Saving Technology and Equipment" [Vyparnye apparaty s rekompresiei vodianogo para — energosberegaiushchaia tekhnologiia i oborudovaniie], URL: <http://zaobmt.com/index.php/articles/153-vacuum-evaporator-article.html>
6. Uzikov, V. A., Kochnov, Ya. K., Osipova, N. E., Uzikova, I. V. (2013) "Patent of Russian Federation No. 2488421 MPK (2013) B01D1/22G21F9/00. Liquid Solution Concentration Method" [Patent RF No. 2488421 MPK (2013) B01D1/22G21F9/00. Sposob kontsentrirvaniia zhidkikh rastvorov]. (Rus)
7. Draginskii, V. L., Alekseeva, L. P. (2007), "Ozonation in the Process of Water Purification" [Ozonirovaniie v protsessakh ochistki vody], Moscow, DeLi print, 400 p. (Rus)
8. Nikiforov, A. F. (2006), "Potable Water Purification from Man-Made Radionuclides by Aluminosilicate Sorbents" [Ochistka pitievoi vody ot tekhnogennykh radionuklidov aluminosilikatnymi sorbentami], Environmental Problems of Industrial Regions, Proceedings of the Seventh Scientific and Practical Conference, Yekaterinburg, AMB, 103104. (Rus)
9. Clark, D. E., Lerch, R. E. (1979), Volume Reduction Options for the Management of Low-Level Radioactive Waste. Management of Low-Level Radioactive Waste, Pergamon Press, V. 1, pp. 235—287.
10. Hrushycheva, E. A., Bogdanovych, N. G., Yemelianov, V. P., Petrukhina, H. N., Starkov, O. V. (2006), "Inorganic Sorbents: Sorption Properties of Natural Silicates" [Neorganicheskie sorbenty: sorbtionnyie svoistva prirodnkh silikatov], Sorption and Chromatographic Processes, Voronezh, 2006, Vol. 6, No. 6, pp. 922—927. (Rus)
11. Fedotkin, I. M., Hulyi, I. S. (1997), "Cavitation, Cavitation Technique and Technology, Their Use in Industry (Theory, Calculations and Designs of Cavitation Devices)" [Kavitatsiia, kavitatsionnaia tekhnika i tekhnologiia, ikh ispolzovaniie v promyshlennosti (teoriia, raschioty i konstruktzii kavitatsionnykh apparatov)], Part 1, Kyiv, Poligrafkniga, 1997, 940 p. (Rus)

Получено 09.11.2018.