

УДК 697.244;697.328.

Никольский В.Е., Лободенко А.В.

## ТЕРМИЧЕСКОЕ ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ АППАРАТОВ ПОГРУЖНОГО ГОРЕНИЯ

**Введение.** Переработка жидких радиоактивных отходов (ЖРО) направлена на решение двух главных задач: очистки основной массы отходов от радионуклидов и концентрирования последних в минимальном объеме. Для этого используют три группы методов: термические, сорбционные, мембранные. Термические и сорбционные методы хорошо разработаны и широко применяются на практике: в настоящее время на их основе работают очистные сооружения, перерабатывающие отходы, которые образуются при эксплуатации ядерных реакторов различного назначения, установок регенерации ядерного топлива и других объектов, использующих радиоактивные вещества.

Термические методы, применяемые на практике, предполагают использование тепла для концентрирования отходов переводом основного компонента отходов – воды – в пар.

Основные термические методы – термическая дистилляция (упаривание) и сушка. Сушка обычно используется для подготовки (обезвоживания) концентратов радиоактивных отходов к отверждению. Термическая дистилляция различается характером парообразования (кипение в объеме или испарение с поверхности), видом теплоносителя (пар, горячие газы, электричество, органические продукты) и способом подвода теплоты (непосредственный контакт с теплоносителем или передача теплоты через стенку аппарата). В практике обезвреживания отходов наиболее широко применяют дистилляцию парообразованием при кипении с подводом теплоты водяным паром через стенку выпарного аппарата. Такая организация процесса обеспечивает теплопередачу при отсутствии контакта чистого теплоносителя с радиоактивным упариваемым раствором.

В отличие от других методов (сорбционных и мембранных) термическая дистилляция позволяет очистить конденсат от радионуклидов, находящихся в любой форме: ионной, молекулярной или коллоидной. Ограничивает очистку в этом случае только летучесть радионуклидов. Невысокая требовательность к качеству отходов, поступающих на термическую дистилляцию, (наличие колоидов, детергентов), позволяет исключить применение перед ней специальных осадительных операций. Это выгодно отличает термическую дистилляцию от сорбционных (динамических) и некоторых мембранных методов. И, наконец, возможность получения высоких коэффициентов очистки позволяет термической дистилляции, при необходимости, самостоятельно и полностью решить проблему очистки конденсата до сбросных норм или норм на оборотную воду.

Метод термической дистилляции (упаривания) ЖРО в объеме с помощью аппаратов погружного горения (АПГ) в промышленности не применяется. В настоящей работе приведены результаты опытных исследований по применению метода термической дистилляции ЖРО с помощью АПГ.

**Опытные исследования применения метода термической дистилляции ЖРО с помощью АПГ.** Для условий экспериментального ядерного реактора Института ядерных исследований АН Украины разработана, апробирована и введена в эксплуатацию установка термического обезвреживания ЖРО на основе АПГ (рис.1) [1–3].

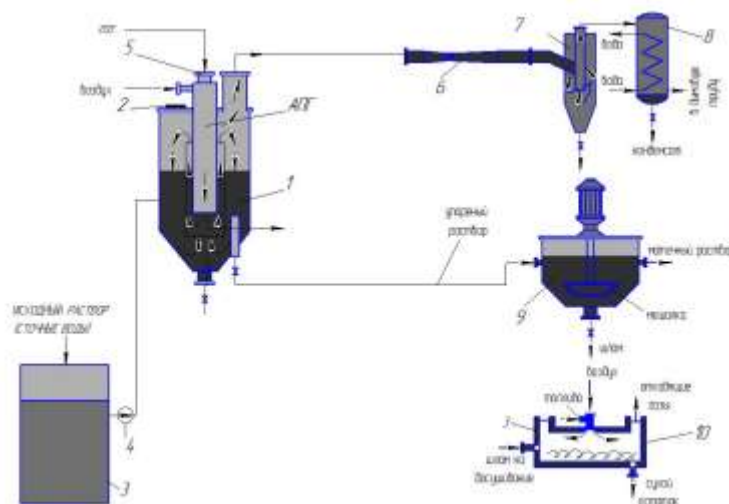


Рисунок 1 – Установка термического обезвреживания ЖРО на основе АТГ:

- 1–теплоизолированная огнеупорная камера; 2–взрывной клапан; 3 –емкость для сбора ЖРО;  
 4 – насосная установка; 5 – горелочный блок; 6 – газоход; 7 – циклон; 8 – конденсатор;  
 9 – отстойник; 10 – радиационная камера

Основная задача, решаемая в рамках обозначенной проблемы, заключалась в разработке энерготехнологической системы (ЭТС), которая обеспечивает: очистку отходов от радионуклидов, концентрирование последних до минимальных объемов, осушивание радиоактивных концентратов солей с целью дальнейшей переработки, исключая выход радионуклидов в окружающую среду.

Применяемая в практике переработки солевых и трапных радиоактивных отходов на отечественных и зарубежных АЭС с водоводяными реакторными установками (РУ) типа ВВЭР, ВWR и PWR технологическая схема, включает: предварительную очистку отходов на механических фильтрах, термическую дистилляцию (упаривание) фильтрата с помощью водяного пара в щелочной или нейтральной среде на выпарных аппаратах различной конструкции с последующим сбросом солевого концентрата в баки временного хранения или отверждение концентрата (кубового остатка) традиционными методами гидратационного цементирования или битумирования [4].

Достоинства данной технологической схемы заключаются в увеличении ~ в 2 раза степени упаривания ЖРО с 300 до 650 г/л по солям без выпадения твердой фазы.

Приведенной схеме присущи следующие недостатки:

- ограниченная степень концентрирования ЖРО по солям (не более 650–800 г/л);
- возможность инкрустации (осаждение солей) греющих поверхностей при большем солесодержании концентрата (кубового остатка), что приводит к снижению производительности процесса и необходимости проведения периодических химических промывок выпарных аппаратов;
- при глубоком упаривании ЖРО возникают трудности последующего обращения с гетерогенным кубовым остатком, который при снижении температуры практически нетекуч, его нельзя длительно хранить во временных емкостях-хранилищах из-за выпадения осадков;
- коррозионная агрессивность азотнокислых солевых концентратов;
- низкая степень включения солей в цементную массу, которая составляет всего 5–6 % (солесодержание не выше 150 г/л), что требует многократного разбавления соле-

вого концентрата водой при проведенні його гидратационного отвердження цементом [4].

Задачей, на решение которой направлена разработка, было создание способа и подбор соответствующего оборудования, позволяющего повысить степень концентрирования ЖРО, предотвратить инкрустацию греющих поверхностей выпарных аппаратов и установок солевыми отложениями, упростить операции обращения (транспортировки, хранения и отверждения) с кубовым остатком, перевести солевой концентрат в пожаро-взрывобезопасное состояние и, как следствие, упростить всю технологическую схему переработки (обезвреживания) жидких радиоактивных отходов.

Для решения поставленной задачи было предложено термическую дистилляцию производить в АПГ до степени глубокого упаривания и осушивания в специально разработанной радиационной камере.

Разработанная ЭТС по термическому обезвреживанию ЖРО (рис. 1) представляет собой теплоизолированную огнеупорную камеру (1) в форме вертикально ориентированного цилиндра  $\varnothing$  1800 мм из нержавеющей стали с расположенным в ней АПГ. Камера снабжена взрывным клапаном (2), смонтированным в верхней части её корпуса. Кроме того, ЭТС оборудована автономной (производительностью 1580 м<sup>3</sup>/ч) воздушной, ёмкостью для сбора ЖРО (3), насосной установкой (4), блоком контрольно-измерительных приборов и автоматики. В центральной части по оси огневой камеры расположена плоскопламенная горелка ГППс-5 (расход топлива 160 м<sup>3</sup>/ч, давление 12 кН/м<sup>2</sup>) с системой подвода топлива и воздуха горения и запорно-регулируемой аппаратурой. Газовая обвязка и запорная аппаратура укомплектованы измерительными датчиками.

Система управления (шкафы КИП и А) предназначены для автоматической подачи ЖРО в огневую камеру, контроля радиоактивности, сигнализации и защиты оборудования.

Продукты сгорания из огневой камеры удаляются через газозод (6), циклон (7) производительностью 5600 м<sup>3</sup>/ч, конденсатор (8), дымосос, производительностью 6800 м<sup>3</sup>/ч, соединенный с дымовой трубой.

Кроме того, ЭТС снабжена отстойником (9) с мешалкой, электродвигателем и радиационной камерой (10) для досушивания упаренных в огневой камере ЖРО до состояния сухого остатка.

Весь комплекс оборудования, входящий в ЭТС, размещен в здании, отдельно вынесенном из зоны действия экспериментального реактора, с системой трубопроводов подачи ЖРО, подключенной к накопительной ёмкости ЖРО, с помещением для размещения оператора. Газовая обвязка смонтирована в соответствии со значениями давления на входе в горелочное устройство.

Установку работает следующим образом. Заполняют до установленной отметки огневую камеру ЖРО. Поджигают свечу горелочного устройства АПГ и добиваются устойчивого горения. В результате сжигания топлива образуются дымовые газы, содержащие N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, C, а также молекулы вредных веществ, выброс в атмосферу которых недопустим.

Очистка дымовых газов происходит в циклоне с осаждением вредных веществ в бункер и далее – через конденсатор и дымосос очищенные дымовые газы направляются в дымовую трубу.

Разработанная ЭТС позволяет производить эффективное уничтожение ЖРО объемом ~ 1000 л/ч.

При проведенні пусконаладочних робіт на ЕТС по термічному обезвреживанню ЖРО проведені технологічні експерименти ефективності роботи пристрою. Термічне обезвреживання проводили на розчині з ємкостей кубового остатка наступного складу:  $\text{H}_3\text{BO}_3$  20; Na 48;  $\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}$  20; ЭДТК 9;  $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$  1,0; ОЭДФК 1,0; Si 2,0; Fe 0,2; Cr, Ni, Co, Mn по 0,05;  $\text{NO}_3$  90; солесодержание 100-200 г/л; рН 8-9. Початкова концентрація солей в кубовому остатку становила 150-200 г/л.

При проведенні упарювання в АПГ кінцеві продукти залишалися текучими при  $\rho = 1,3-2,0 \text{ г/см}^3$  і солесодержания 1300-2000 г/л продукту, що практично  $\sim 2$  рази вище показувачів упарювання пристроїв, застосовуваних на практиці технологічної переробки солевих ЖРО (650 г/л). При цьому випарювання кристалів солей в огневій камері починається при досягненні солесодержания 800–1000 г/л.

Позитивним являється те, що запропонований спосіб переробки ЖРО дозволяє стадію глибокого концентрування виробляти практично без інкрустації солями поверхностей теплообміну, що обумовлено конструктивними особливостями камери згорання АПГ [3].

Сушіння упарених ЖРО до ступені сухого остатка проводили в радіаційній камері, обладнаній плоскоплам'яною горілкою ГППс-2 з витратою палива  $20 \text{ нм}^3/\text{ч}$  і тиском  $12 \text{ кН/м}^2$ .

Продукти згорання, покидають радіаційну камеру в з'єднанні з технологічним паром, утвореним при сушінні пульпи, направляли в циклон і далі через конденсатор, димосос – в димову трубу.

**Висновки.** Розроблена ЕТС і спосіб термічної переробки ЖРО на основі глибокого термічного упарювання в АПГ в порівнянні з діючими технологіями термічного обезвреживання має суттєвими перевагами і забезпечує:

- практично в 2–3 рази (з 600 г/л до 1300–2000 г/л) підвищення ступеня концентрування радіоактивних відходів;
- запобігає інкрустації солевими відкладеннями гріючих поверхностей АПГ і установки в цілому;
- спрощає операції обробки з кубовим остатком (не потрібно його попередньої технологічної і механічної підготовки перед подачею на термічне обезвреживання в АПГ);
- дозволяє отримати кінцевий продукт в формі сухого остатка, який виключає замоноличивання (отвердження) радіоактивних концентратів солей в технологічний продукт, запобігаючий виходу радіонуклідів в оточуюче середовище;
- отримання кінцевого продукту в формі сухих солей радіонуклідів, який може бути повернутий назад в технологію, або направлений на збереження в спеціальних контейнерах.

Оскільки призначення установки по термічному обезвреживанню ЖРО – розробка технології і обладнання для реалізації вказаного процесу, енергетичну ефективність знову розробленої ЕТС не оцінювали.

### Література

1. Пат. 101001 Україна, МКВ<sup>2015.01</sup> F23D 14/44. Апарат зануреного горіння для випарювання рідини. / В.Є. Нікольський, В.М. Задорський, Г.Т. Циганков, Н.Б. Сиволоб; заявник та власник ДВНЗ "Український державний хіміко-технологічний університет". – № а201500132, заявл. 12.01.2015; опубл. 25.08.2015. – Бюл. № 16.

2. Пат. 101002 Україна, МКВ<sup>2015.01</sup> F23D 14/44. Апарат зануреного горіння. / В.Є. Нікольський, В.М. Задорській, Н.Б. Сиволоб; заявник та власник ДВНЗ "Український державний хіміко-технологічний університет". – № а 201500133, заявл. 12.01.2015; опубл. 25.08.2015, – Бюл. № 16.

3. Нікольський, В.Є. Разработка и исследование цельнометаллической камеры сгорания для аппаратов погружного горения. / В.Є. Нікольський, А.В. Лободенко. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2016 – № 1. – С. 59–65.

4. Никифоров, А.А. Обезвреживание жидких радиоактивных отходов. [Текст] / А.А. Никифоров, В.В. Куличенко, М.Н. Жихарев. – М.: Энергоатомиздат. – 1985. – 236 с.

Bibliography (transliterated)

1. Pat. 101001 Ukraina, MKV<sup>2015.01</sup> F23D 14/44. Aparat zanurenogo gorinya dlya vuparyvanya ridunu. / V.Ye. Nikolsky, V.M. Zadorsky, G.T. Zugankov, N.B. Sivolob; zayuvnik ta vlasnik DVNZ UDHTU "Ukrainsky dergavny himiko-tehnologichny universitet". – № a201500132, zayavl. 12.01.2015; opubl. 25.08.2015. – bul. № 16.

2. Pat. 101002 Ukraina, MKV<sup>2015.01</sup> F23D 14/44. Aparat zanurenogo gorinya. / V.Ye. Nikolsky, V.M. Zadorsky, N.B. Sivolob; zayuvnik ta vlasnik DVNZ UDHTU "Ukrainsky dergavny himiko-tehnologichny universitet". – № a 201500133, zayavl. 12.01.2015; opubl. 25.08.2015, – bul. № 16.

3. Nikolsky, V.Ye. Razrabotka i isledovanie zelnometalicheskoy kameru sgoraniya dlya aparatov pogrugnogo goreninya. / V.Ye. Nikolsky, A.V. Lobodenko. // Integrovany tehnologii ta energozberezenya. – 2016 – № 1. – P. 59–65.

4. Nikiforov, A.A. Obezvrezivanie zhidkih radioaktivnuh othodov. / A.A. Nikiforov, V.V. Kulichenko, M.N. Ziharev. – М.: Energoizdat. – 1985. – 236 p.

УДК 697.244;697.328.

Нікольський В.Є., Лободенко А.В.

**ТЕРМІЧНЕ ЗНЕШКОДЖЕННЯ РІДКИХ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ  
З ВИКОРИСТАННЯМ АПАРАТІВ ЗАНУРЕНОГО ГОРІННЯ**

У даній роботі наведені результати досліджень щодо застосування методів термічної дистиляції рідких радіоактивних відходів за допомогою АПГ. Показано переваги запропонованого способу в порівнянні з діючими технологіями знешкодження.

Nikolsky V.Ye., Lobodenko A.V.

**THERMAL NEUTRALIZATION OF LIQUID RADIOACTIVE WASTE USING  
IMMERSED APPARATUS**

The study presents the results of thermal distillation of liquid radioactive waste using immersed apparatus. As was shown the proposed method have an advantage over the existing neutralization technologies.