

# ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЭКСТРАКЦИОННОЙ СМЕСИ 30% ТБФ В ISOPAR-M НА НИЖНИЙ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПРЕДЕЛ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ

© 2020 г. А. В. Родин<sup>a,b</sup>, И. В. Скворцов<sup>a,b</sup>, Е. В. Белова<sup>a,\*</sup>, К. Н. Двоеглазов<sup>c</sup>, Б. Ф. Мясоедов<sup>a,d</sup>

<sup>a</sup> Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, 119071, Москва, Ленинский пр., д. 31, корп. 4

<sup>b</sup> Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности, 107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5

<sup>c</sup> Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. акад. А. А. Бочвара, 123098, Москва, ул. Рогова, д. 5а

<sup>d</sup> Межведомственный центр аналитических исследований по проблемам в области физики, химии и биологии при Президиуме РАН, 117342, Москва, Профсоюзная ул., д. 65, стр. 6

\*e-mail: bl174@bk.ru

Получена 12.12.2019, после доработки 28.04.2020, принята к публикации 29.04.2020

Исследовано влияние облучения ускоренными электронами экстракционной смеси 30% ТБФ в изопарафиновом разбавителе Isopar-M на величину нижнего температурного предела распространения пламени ( $T_n$ ). Установлено, что при облучении до дозы 2 МГр значение  $T_n$  экстракционной смеси может снижаться до 45°C, что необходимо учитывать при организации технологического процесса. Показано, что при продувании воздухом облученной экстракционной смеси значение  $T_n$  практически достигает  $T_n$  исходного раствора.

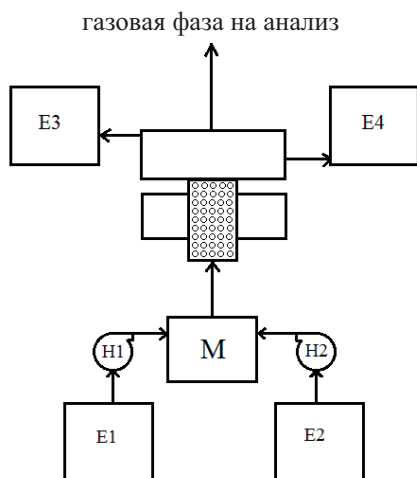
**Ключевые слова:** пожаровзрывоопасность, переработка ОЯТ, экстракционная смесь, Isopar-M, нижний температурный предел распространения пламени

**DOI:** 10.31857/S0033831120060039

При гидрометаллургической переработке ОЯТ широко применяются экстракционные смеси на основе экстрагента ТБФ в легком углеводородном разбавителе [1]. Несмотря на большой накопленный опыт использования линейных углеводородов в качестве разбавителя, при высоких концентрациях металлов в водном растворе существует риск образования третьей фазы в процессе экстракции [2], что создает технологические трудности и угрозу ядерной и радиационной безопасности. Одним из решений является поддержание концентрации суммы металлов на низком уровне, но при этом увеличивается количество РАО. Альтернативный способ – использование экстракционной смеси, менее склонной к образованию третьей фазы. С этой целью в качестве экстракционной смеси исследуется возможность использования 30%-ного

раствора ТБФ в изопарафиновом разбавителе [3] Isopar-M в технологиях опытно-демонстрационного центра ГХК [4, 5] и модуля переработки ОЯТ РУ БРЕСТ-ОД-300 [6].

В ходе переработки ОЯТ экстракционная смесь подвергается радиационному воздействию, что сопровождается радиационно-химическими превращениями с образованием продуктов деградации. Это снижает эффективность разделения радионуклидов [7] и ухудшает характеристики пожаровзрывоопасности технологического процесса [8]. Одним из факторов риска является снижение показателя нижнего температурного предела распространения пламени ( $T_n$ ) при облучении экстракционной смеси, который определяет верхний температурный предел проведения экстракционных процессов для предотвращения



**Рис. 1.** Схема установки регенерации облученного экстрагента. Е1 – емкость с экстракционной смесью, Е2 – емкость с регенерирующим раствором, Е3 – емкость сбора регенерированной экстракционной смеси, Е4 – емкость сбора отработанного регенерирующего раствора, Н1 и Н2 – насос-дозатор, М – мешалка, С1 – сепаратор.

образования взрывоопасных смесей [9]. Температура проведения процесса должна быть не менее чем на  $10^{\circ}\text{C}$  ниже, чем значение  $T_n$  экстракционной смеси, свойства которой изменяются по мере воздействия на нее технологических факторов [9]. Степень влияния радиации на изменение свойств экстракционной смеси зависит от типа излучения, поглощенной дозы, концентрации  $\text{HNO}_3$  в органической фазе. Для разбавителей линейной структуры влияние излучения на  $T_n$  изучено достаточно полно [4, 10–12], а для разветвленных соединений, в частности Isopar-M, данные в открытых источниках отсутствуют. Цель работы – изучение влияния облучения на величину  $T_n$  экстракционной смеси состава 30 об% ТБФ в разбавителе Isopar-M и разработка метода ее межциклового регенерации.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

ТБФ марки х.ч., очищенный перманганатом калия [13] смешивали с изопарафиновым разбавителем Isopar-M.

В качестве источника ионизирующего излучения использовали электронный ускоритель УЭЛВ-10-10-С-70 (энергия 8 МэВ, длительность импульса 6 нс, частота повторения импульсов 300 Гц, средний ток пучка 700 мкА, частота вертикальной развертки 1 Гц, ширина развертки 245 мм). Облу-

чение экстракционных смесей проводили в цилиндрическом стеклянном реакторе, снабженном гидрозатвором, вращающемся на карусельном столе, до дозы 2 МГр. Для дозиметрии использовали пластинки из сополимера с феназиновым красителем производства ВНИИФТРИ. Величину поглощенной дозы определяли по разнице оптической плотности облученной и необлученной пластинок, измеренной на спектрофотометре при  $\lambda = 512 \text{ нм}$ , с помощью калибровочной таблицы.

Облучению подвергали экстракционную смесь трех составов: 1) 30%-ный ТБФ в Isopar-M; 2) 30%-ный ТБФ в Isopar-M, уравновешенный с 4 моль/л  $\text{HNO}_3$ ; 3) 30%-ный ТБФ в Isopar-M, уравновешенный с 8 моль/л  $\text{HNO}_3$ .

$T_n$  определяли по методике, описанной в ГОСТ [14]. Некоторое отступление от ГОСТ заключалось в снижении объема испытуемого образца с рекомендованных  $70 \pm 2$  до 10 мл. Поскольку это может привести к завышению значения  $T_n$  [15], была проведена серия экспериментов с разбавителем Isopar-M, которая показала отсутствие влияния объема образца на  $T_n$  для изучаемых смесей.

Для определения природы продуктов деградации при облучении экстракционных смесей использовали методы ИК спектроскопии и газовой хроматографии. ИК спектры записаны на приборе IR Prestige-21 с преобразованием Фурье фирмы Shimadzu. В качестве источника использовали гелий-неоновый лазер мощностью 0.5 мВт производства JDU Uniphase с длиной волны  $\lambda = 632.8 \text{ нм}$ . Схема записи спектров однолучевая. Для записи спектров использовали стекла  $\text{CaF}_2$  и кювету со свинцовой прокладкой толщиной 0.129 мм. Концентрацию различных классов соединений определяли по интенсивности поглощения с использованием калибровочных кривых, построенных для полос  $-\text{NO}_2$  ( $1556 \text{ см}^{-1}$ , 2-нитрооктан),  $-\text{ONO}_2$  ( $1639 \text{ см}^{-1}$ , 1-октилнитрат),  $-\text{COOH}$  ( $1730 \text{ см}^{-1}$ , миристиновая кислота),  $-\text{CO}-$  ( $1721 \text{ см}^{-1}$ , 4-метил-2-пентанон),  $-\text{COOR}$  ( $1740 \text{ см}^{-1}$ , гексиловый эфир масляной кислоты). Для определения групп  $-\text{CO}-$  (кетоны,  $1721 \text{ см}^{-1}$ ) и  $-\text{COOR}$  ( $1740 \text{ см}^{-1}$ ) пробы нейтрализовали. При проведении количественного анализа использовали стандартную процедуру построения калибровочных зависимостей светопоглощения от навески стандартов (область соблюдения закона Ламберта–Бера).

Газовую хроматографию проводили на приборе ГАЛС по методике, описанной в работе [16].

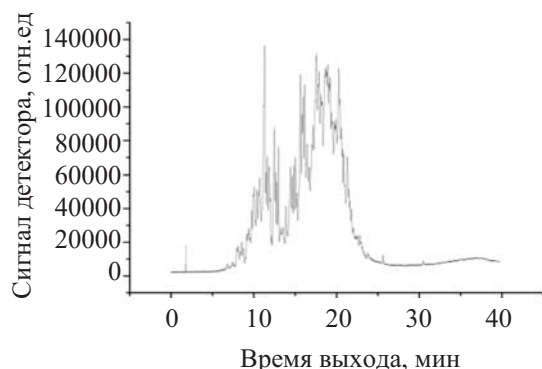


Рис. 2. Хроматограмма образца разбавителя Isopar-M.

Разработку методов межциклового регенерации облученной экстракционной смеси проводили с использованием сепаратора с верхней разделительной камерой [17], схема проведения представлена на рис. 1. Регенерацию проводили как промывкой водными растворами, так и продувкой воздуха. Объемное соотношение потоков органической фазы к водной фазе составляло 10 : 1, органической фазы к воздуху — 1 : 100. Использовали следующие водные растворы: 1 моль/л карбоната натрия, 0.1 моль/л гидроксида натрия, 0.1 моль/л карбоната метиламмония, 1 моль/л карбоната аммония.

Регенерацию с заданным соотношением скоростей потоков проводили после полного заполнения насадки колонны промывным раствором или воздухом. Температура теплоносителя в рубашке колонны на протяжении эксперимента составляла 40°C. Водную и органическую фазу после прохождения насадки колонны собирали во фракции объемом по 11 мл. Первые 4–5 фракций не содержали следов органической фазы. В последующих фракциях по мере выхода на режим доля органической фазы увеличивалась, к 10-й пробе соотношение органической фазы к водной составило 10 : 1. При продувке воздухом собирали фракции регенерированного органического раствора по 10 мл.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Isopar-M представляет собой смесь изопарафинов, содержащих от 12 до 16 атомов углерода со значением температуры вспышки ( $T_{всп}$ ) в закрытом тигле, равным 82°C. На хроматограмме Isopar-M

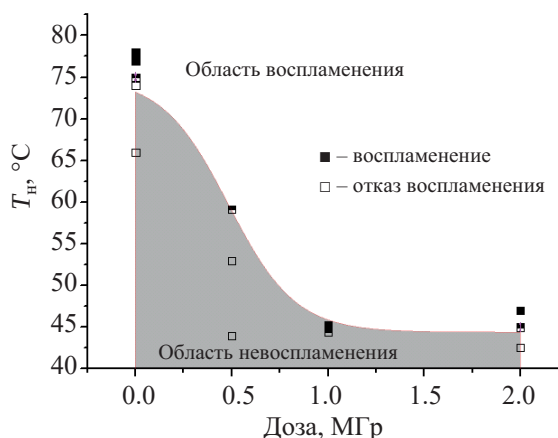


Рис. 3. Зависимость  $T_n$  от поглощенной дозы ионизирующего излучения для экстракционной смеси 30% ТБФ в Isopar-M.

(рис. 2) можно выделить порядка 70 индивидуальных соединений, идентифицировать которые не представилось возможным. Нами определены значения  $T_n$  для исходного разбавителя Isopar-M, 30%-ного раствора ТБФ в Isopar-M, а также 30%-ного раствора ТБФ в Isopar-M, обработанного 4 и 8 моль/л  $HNO_3$ . Все определенные нами значения  $T_n$  равны между собой и составляют  $74 \pm 1^\circ C$ . Исходя из полученных результатов предположено, что определяющую роль играет разбавитель, а влияние экстрагированной  $HNO_3$  на значение  $T_n$  необлученной смеси минимально. Этот вывод находится в соответствии с принятыми методами расчета значения  $T_n$  для смесей горючих жидкостей [12], где при большой разнице в значениях  $T_n$  для разных жидкостей в смеси определяющий вклад вносит компонент с минимальным значением  $T_n$ .

Облучение экстракционной смеси ускоренными электронами до поглощенной дозы 2 МГр снижает  $T_n$  до значений 44, 58 и 56°C для экстракционной смеси 30% ТБФ в Isopar-M и этой же смеси, обработанной 4 и 8 моль/л  $HNO_3$  соответственно. Влияние поглощенной дозы на значения  $T_n$  для экстракционной смеси 30% ТБФ в Isopar-M и этой же смеси, обработанной 8 моль/л  $HNO_3$ , представлено на рис. 3 и 4.

Как видно из полученных данных, присутствие  $HNO_3$  в экстракционной смеси повышает значения  $T_n$  по отношению к предварительно необработанному азотной кислотой органическому раствору, что может свидетельствовать о протекании реакций с образованием продуктов радиолиза с меньшим парциальным давлением [18, 19].

**Таблица 1.** Содержание легколетучих продуктов радиолитического распада в фракциях регенерированной экстракционной смеси

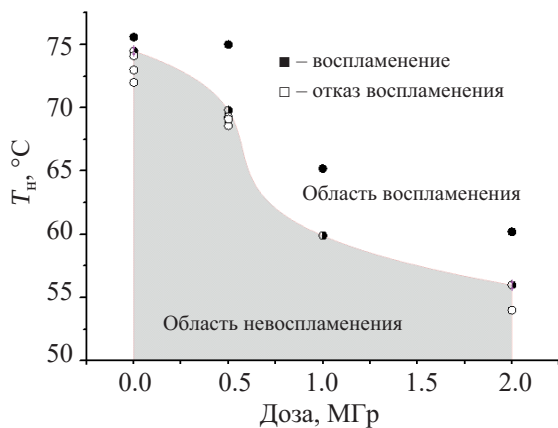
| Номер фракции                                                                   | Содержание продуктов радиолитического распада в облученной экстракционной смеси, мас. % |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Исходный раствор экстрагента, облученный до 2 МГр                               | 1.22                                                                                    |
| Регенерация водным раствором 1 моль/л $\text{Na}_2\text{CO}_3$                  |                                                                                         |
| 6 <sup>a</sup>                                                                  | 0.58                                                                                    |
| 7                                                                               | 0.55                                                                                    |
| 11                                                                              | 0.71                                                                                    |
| 14                                                                              | 0.91                                                                                    |
| Регенерация водным раствором 0.1 моль/л $\text{NaOH}$                           |                                                                                         |
| 5 <sup>a</sup>                                                                  | 0.70                                                                                    |
| 7                                                                               | 0.77                                                                                    |
| 9                                                                               | 1.01                                                                                    |
| 11                                                                              | 1.01                                                                                    |
| Регенерация водным раствором 0.1 моль/л $(\text{CH}_3\text{NH}_3)_2\text{CO}_3$ |                                                                                         |
| 5 <sup>a</sup>                                                                  | 0.58                                                                                    |
| 7                                                                               | 0.88                                                                                    |
| 9                                                                               | 0.95                                                                                    |
| Регенерация водным раствором 1 моль/л $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$              |                                                                                         |
| 5 <sup>a</sup>                                                                  | 0.75                                                                                    |
| 7                                                                               | 0.89                                                                                    |
| 9                                                                               | 0.94                                                                                    |
| 13                                                                              | 0.92                                                                                    |
| 14                                                                              | 0.97                                                                                    |

<sup>a</sup> В предыдущих фракциях органической фазы не наблюдалось.

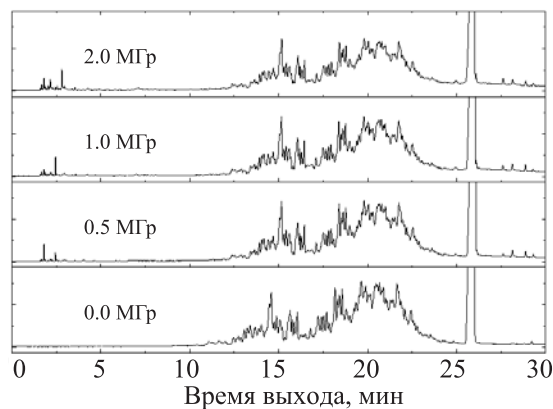
Результаты хроматографического разделения экстракционной смеси, насыщенной 8 моль/л  $\text{HNO}_3$  (рис. 5), показывают, что в процессе радиолитического распада образуются продукты деградации, время выхода которых (до 5 мин) значительно ниже времени выхода основных компонентов экстракционной смеси (с 12-й по 25-ю минуту – Isopar-M, на 26-й

минуте – ТБФ). Несмотря на небольшой выход указанных продуктов радиолитического распада (около 1.5 мас. %), они вносят определяющую роль в снижение  $T_n$  облученной экстракционной смеси, поскольку имеют большее парциальное давление.

Для удаления образующихся продуктов радиолитического распада использовали промывку водными рас-



**Рис. 4.** Зависимость  $T_n$  от поглощенной дозы ионизирующего излучения для экстракционной смеси 30% ТБФ в разбавителе Isopar-M, обработанной 8 моль/л  $\text{HNO}_3$ .



**Рис. 5.** Хроматограммы облученной экстракционной смеси 30% ТБФ в Isopar-M, обработанной 8 моль/л  $\text{HNO}_3$ .

**Таблица 2.** Содержание продуктов деструкции во фракциях регенерированной водными растворами обработанной 4 моль/л  $\text{HNO}_3$  и облученной до дозы 2 МГр экстракционной смеси 30%ТБФ в Isopar-M

| Номер фракции регенерированного раствора                       | Концентрация компонента, моль/л |                 |                |                 |                  |
|----------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|------------------|
|                                                                | $\text{RNO}_2$                  | $\text{RONO}_2$ | $\text{RCOOH}$ | $\text{RCOR}_1$ | $\text{RCOOR}_1$ |
| Исходный раствор экстрагента, облученный до 2 МГр              |                                 |                 |                |                 |                  |
| –                                                              | 0.109                           | 0.019           | 0.077          | 0.059           | 0.002            |
| Регенерация 1 моль/л $\text{Na}_2\text{CO}_3$                  |                                 |                 |                |                 |                  |
| 9-11                                                           | 0.102                           | 0.009           | 0.041          | 0.056           | 0.003            |
| Регенерация 0.1 моль/л $\text{NaOH}$                           |                                 |                 |                |                 |                  |
| 9-11                                                           | 0.111                           | 0.010           | 0.051          | 0.067           | 0.003            |
| Регенерация 0.1 моль/л $(\text{CH}_3\text{NH}_3)_2\text{CO}_3$ |                                 |                 |                |                 |                  |
| 5-7                                                            | 0.106                           | 0.010           | 0.009          | 0.068           | 0.003            |
| Регенерация 1 моль/л $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$              |                                 |                 |                |                 |                  |
| 9-11                                                           | 0.112                           | 0.010           | 0.055          | 0.065           | 0.002            |

творами, а также продувку воздухом. Изменение концентрации продуктов радиолитического распада определяли методами газовой хроматографии и ИК спектроскопии.

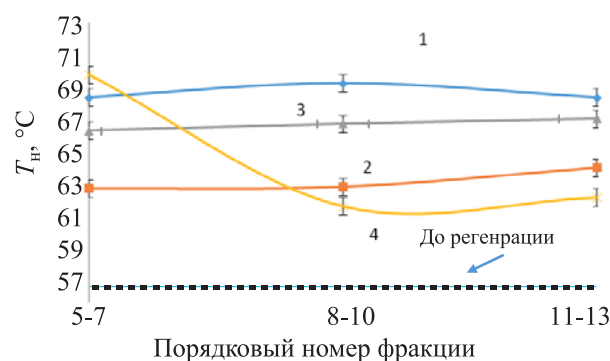
Проведенные исследования по регенерации водными растворами образцов экстракционной смеси, обработанной 4 моль/л  $\text{HNO}_3$  и облученной до 2 МГр, показали, что эффективность очистки экстракционной смеси от низкокипящих продуктов радиолитического распада в процессе межциклового регенерации не постоянна во времени. В начальный момент регенерации продукты радиолитического распада в большей мере удаляются из органической фазы, что связано с предварительным заполнением насадки колонны регенерирующим раствором. Соотношение органической фазы к водной в начальный период процесса регенерации в объеме насадки меньше единицы, что обуславливает повышенную эффективность регенерации. По мере повышения соотношения потоков органической и водной фаз на выходе из насадки до стационарного значения эффективность регенерации от легколетучих компонентов снижается, что подтверждается данными хроматографического анализа, представленного в табл. 1.

Значения  $T_n$  для регенерированной водными растворами экстракционной смеси, представленные на рис. 6, также показывают снижение содержания низкокипящих продуктов радиолитического распада в процессе межциклового регенерации, что приводит к повышению  $T_n$ .

Согласно полученным данным, водные растворы по снижению эффективности восстановления показателя  $T_n$  располагаются в ряду: 1 моль/л  $\text{Na}_2\text{CO}_3 > 0.1$  моль/л  $(\text{CH}_3\text{NH}_3)_2\text{CO}_3 > 0.1$  моль/л  $\text{NaOH} > 1$  моль/л  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ .

Для определения природы соединений, удаляемых при регенерации облученной экстракционной смеси, был использован метод ИК спектроскопии. Установленные концентрации функциональных групп в отдельных фракциях приведены в табл. 2. Результаты показывают, что в процессе регенерации экстракционной смеси независимо от состава применяемых регенерационных растворов практически не удаляются нитросоединения и кетоны, а количество нитратов и карбоновых кислот снижается почти в 2 раза. Сложные эфиры определяются на уровне следовых количеств, и судить об очистке от них не представляется возможным.

Увеличение  $T_n$  смеси после регенерации указывает на то, что легкокипящие продукты радиолитического распада частично удаляются из органического раствора. К таким продуктам также относятся углеводороды с короткой длиной углеродной цепи, которые не

**Рис. 6.** Значения  $T_n$  отдельных фракций обработанной 4 моль/л  $\text{HNO}_3$  и облученной до 2 МГр экстракционной смеси 30% ТБФ в Isopar-M после регенерации растворами: 1 – 1 моль/л  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 2 – 0.1 моль/л  $\text{NaOH}$ , 3 – 0.1 моль/л  $(\text{CH}_3\text{NH}_3)_2\text{CO}_3$ , 4 – 1 моль/л  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ .



**Таблица 3.** Содержание продуктов радиолитиза при регенерации воздухом обработанной 4 моль/л  $\text{HNO}_3$  и облученной до 2 МГр экстракционной смеси 30% ТБФ в Isopar-M

| Номер фракции регенерированного раствора          | Концентрация компонента, моль/л |                 |                |                 |                  |
|---------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|------------------|
|                                                   | $\text{RNO}_2$                  | $\text{RONO}_2$ | $\text{RCOOH}$ | $\text{RCOR}_1$ | $\text{RCOOR}_1$ |
| Исходный раствор экстрагента, облученный до 2 МГр |                                 |                 |                |                 |                  |
| –                                                 | 0.109                           | 0.019           | 0.077          | 0.059           | 0.002            |
| Регенерация потоком воздуха                       |                                 |                 |                |                 |                  |
| 5                                                 | 0.111                           | 0.008           | 0.071          | 0.062           | 0.003            |

определяются методом ИК спектроскопии на фоне углеводородного разбавителя. Для их удаления не подходят методы, предполагающие образование солей продуктов деградации и переход их в водную фазу. Более целесообразно применять методы, основанные на фракционной перегонке компонентов. Для этого провели регенерацию продувкой воздуха вместо водного промывного раствора. Результаты хроматографического разделения регенерированной экстракционной смеси показали, что для данного метода регенерации практически отсутствует переходный режим, максимальная эффективность достигается с первых моментов и не изменяется со временем. Процентное содержание продуктов радиолитиза со временем выхода менее 5 мин составляет 0.25 мас%, что указывает на максимальную эффективность регенерации от легколетучих продуктов для проведенной серии испытаний. Определенное значение  $T_n$  для регенерированной потоком воздуха экстракционной смеси составляет 72°C, что подтверждает максимальную эффективность примененного метода регенерации, направленного на восстановления параметра  $T_n$ .

Данные ИК спектроскопии экстракционной смеси после регенерации потоком воздуха показывают (табл. 3), что в отличие от регенерации водными растворами практически не происходит снижения содержания карбоновых кислот в органической фазе. Содержание остальных анализируемых компонентов изменяется схожим образом.

Наблюдаемая низкая эффективность удаления карбоновых кислот указывает на низкую летучесть данных соединений и требует для их удаления применять водные растворы с солеобразующими компонентами.

Таким образом, разработанный способ регенерации с использованием потока воздуха показывает наибольшую эффективность в отношении восстановления параметра, определяющего температурный режим использования экстракционной

смеси для целей обеспечения пожаровзрывобезопасности, и может быть применен в комбинации с промывкой водными растворами, позволяющими также удалять нелетучие продукты радиолитиза.

В целом проведенные исследования показывают, что воздействие ускоренных электронов на 30%-ный ТБФ в разбавителе Isopar-M снижает значения  $T_n$  в большей мере, чем для смесей с линейными углеводородами в качестве разбавителя, что нужно учитывать при разработке мероприятий по обеспечению пожаровзрывобезопасности технологических процессов экстракционного передела.

Показано, что величина падения  $T_n$  зависит от содержания  $\text{HNO}_3$  в органической фазе, меньшему снижению  $T_n$  подвержены растворы, содержащие  $\text{HNO}_3$ , что объясняется связыванием образующихся в процессе радиолитиза углеводородных радикалов азотной кислотой с образованием менее летучих соединений [19]. Так, для облученной до дозы 2 МГр экстракционной смеси  $T_n$  снижается на 30°C и составляет 45°C, что соответствует классу легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), тогда как для органического раствора, обработанного 8 моль/л  $\text{HNO}_3$ , снижение  $T_n$  при воздействии ускоренных электронов до поглощенной дозы 2 МГр не превышает 18°C.

Регенерация обработанной азотной кислотой и облученной до дозы 2 МГр экстракционной смеси 30% ТБФ в Isopar-M водными растворами позволяет повысить значение  $T_n$  на 5–13°C, что можно учитывать при обосновании безопасности технологических процессов экстракционного передела. Наибольшая эффективность в повышении  $T_n$  достигается путем регенерации облученного раствора потоком воздуха с использованием сепаратора с верхней разделительной камерой. Значение  $T_n$  при этом вырастает до 72°C, что допускает использование данной экстракционной смеси при температурах порядка 60°C в соответствии с рекомендациями РБ-060-10. Разработанный метод регенерации

потоком воздуха может быть использован в комбинации с промывкой водными солеобразующими растворами, необходимыми для удаления нелетучих продуктов радиолиза.

#### ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-33-70032).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копырин А.А., Карелин А.И., Карелин В.А. Технология производства и радиохимической переработки ядерного топлива. М.: Атомэнергоиздат, 2006. 576 с.
2. Vasudeva Rao P.R., Kolarik Z. // Solvent Extr. Ion Exch. 1996. Vol. 14, N 6. P. 955. doi 10.1080/07366299608918378
3. Renard E.V., Pyatibratov Yu.P., Neumoev N.V., Chizhov A.A., Kulikov I.A., Gol'dfarb Yu.Ya., Sirotkina I.G., Semenova T.I. // Soviet Radiochemistry (English Translation). 1989. Vol. 30, N 6. P. 734.
4. Алексеенко В.Н., Марченко В.И., Двоеглазов К.Н., Волк В.И., Алексеенко С.Н., Бондин В.В., Бычков С.И. // Радиохимия. 2012. Т. 54, № 3. С. 227.
5. Alekseenko V.N., Dvoeglazov K.N., Marchenko V.I., Alekseenko S.N., Volk V.I., Podrezova L.N. // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2015. Vol. 304, N 1. P. 201. doi 10.1007/s10967-014-3882-7
6. Full-fledged affination extractive-crystallizing platform for technology validation of the fast reactor spent fuel reprocessing on fast neutrons—the results of first experiments: IAEA-CN245-376, FR-17. Yekaterinburg, 2017.
7. Bond W.D. Light Water Reactor Nuclear Fuel Cycle, Purex Solvent Extraction Chemistry. Boca Raton, Florida: CRC, 1981. P. 139.
8. Назин Е.Р., Зачиняев Г.М. Пожаровзрывобезопасность технологических процессов радиохимических производств. М.: НТЦ ЯРБ, 2009. 195 с.
9. НП 016-05: Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла (ОПБ ОЯТЦ).
10. Назин Е.Р. // Атом. энергия. 1989. Т. 66, № 6. С. 406.
11. Das B., Kumar S., Mondal P. // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2011. Vol. 289. P. 503.
12. Ikeda H. // J. Nucl. Sci. Technol. 2004. Vol. 41, N 4. P. 534.
13. Скворцов И.В., Белова Е.В., Никитина Ю.В., Родин А.В., Зильберман Б.Я., Голецкий Н.Д. // Ядерн. и радиац. безопасность. 2016. Т. 4, № 82. С. 14.
14. ГОСТ 12.1.044-2018: Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.
15. Affens W.A., Carhart H.W. NRL Memorandum Report 1735, Washington DC, 1966.
16. Dzhivanova Z., Kadyko M., Smirnov A., Belova E. // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2019. Vol. 321, N 2. P. 439.
17. Патент RU 2397002.
18. Tahraoui A., Morris J.H. // Sep. Sci. Technol. 1995. Vol. 30, N 13. P. 2603.
19. Егоров Г.Ф. Радиационная химия экстракционных систем. М.: Энергоатомиздат, 1986. 208 с.