

ТЕРМИЧЕСКАЯ И ГИДРОЛИТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ОБЛУЧЕННОГО ТРИ-*n*-БУТИЛФОСФАТА

© 2022 г. И. А. Большакова^а, А. В. Пономарев^а, А. В. Смирнов^а, Е. В. Белова^{а, *}

^а Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,
119071, Москва, Ленинский пр., д. 31, корп. 4
*e-mail: bl174@bk.ru

Поступила в редакцию 05.04.2022, после доработки 12.07.2022, принята к публикации 19.07.2022

Доминирующим радиолитическим превращением трибутилфосфата является отщепление бутокси- и бутил-групп с образованием продуктов рекомбинации (диспропорционирования и димеризации) соответствующих радикалов. Радиолитическое и пострadiaционное окисление азотной кислотой при температуре до 110°C вносят сопоставимый конкурентный вклад в разложение трибутилфосфата. Более высокие температуры интенсифицируют окисление и разложение радиолитических продуктов с образованием легколетучих соединений (до 30 мас% при 150°C), что увеличивает пожаро- и взрывоопасность использования облученных экстракционных смесей на основе ТБФ.

Ключевые слова: трибутилфосфат, азотная кислота, радиолитическое окисление, кислотный гидролиз, термолиз

DOI: 10.31857/S0033831122060053, **EDN:** MFSVDJ

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при переработке отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) для извлечения U и Pu применяют экстракционный метод – Пурекс-процесс с использованием три-*n*-бутилфосфата (ТБФ), обладающего высокой экстракционной способностью по отношению к актинидам. При радиолитическом и гидролизе ТБФ образуются дибутилфосфат, монобутилфосфат, фосфорная кислота и бутанол [1, 2]. Скорость гидролиза ТБФ определяется преимущественно температурой и составом растворов, тогда как при радиолитическом разложении скорость конверсии сильнее зависит от типа излучения и мощности поглощенной дозы [3]. В литературе имеются многочисленные данные о продуктах радиационно-химического разложения экстракционных систем на основе ТБФ, но они получены в различных экспериментальных условиях и трудно сравнимы [1, 4, 5].

Для практической регламентации взрывобезопасных условий проведения экстракционного цикла необходимы сведения о механизме взаимодействия компонентов облучаемых экстракционных смесей с наиболее сильным окислителем – азотной

кислотой [6, 7]. Образование продуктов разложения (фрагментации) ТБФ наблюдается как вследствие радиолитического, термолизического, нитрования и кислотного гидролиза [8–11], так и при их совместном действии. Поэтому корреляционный анализ влияния условий облучения и пострadiaционной выдержки ТБФ является предметом многих исследований [12–14]. Особое внимание заслуживают процессы, потенциально приводящие к саморазогреву экстракционной системы в автокаталитическом режиме [15–18].

Ранее мы изучали образование продуктов нитрования, нитроксилирования, гидроксигидроксилирования, деалкилирования, карбонилирования, карбоксилирования и радикальной димеризации в зависимости от поглощенной дозы электронного излучения в растворе 30% ТБФ в Изопаре-М, контактировавшем с 3.4 моль/л HNO₃ [19]. Показано, что радиационно-химический выход разложения ТБФ уменьшается с ростом поглощенной дозы излучения. Состав облученных растворов меняется и после прекращения облучения, что делает необходимым изучение разложения ТБФ в пострadiaционных превращениях экстракционных смесей. Настоящая работа посвящена изучению продуктов разложения ТБФ под

действием γ -излучения и последующего термоллиза в интервале температур 90–170°C.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Три-*n*-бутилфосфат (99%, Acros) очищали от остаточных спиртов и других окисляемых побочных продуктов синтеза путем промывки водным раствором, содержащим 10 г/дм³ KMnO₄ и 15 г/дм³ NaOH. Исследовали различные условия предварительной и пострадиационной обработки образцов. Для этого ТБФ насыщали 4 моль/л HNO₃ в стеклянной делительной воронке с помощью стеклянной винтовой мешалки. Проведены три повторных насыщения с равными объемами органической и водной фаз и временем каждого контакта 20 мин. Чистый ТБФ и ТБФ, насыщенный 4 моль/л HNO₃, облучали до поглощенной дозы 1 МГр. Последующий термоллиз облученных образцов проводили при температурах 90, 110, 150 и 170°C в контакте с 8 или 12 моль/л HNO₃. Объемное соотношение водной и органической фаз во время термоллиза составляло 1 : 1. Для оценки влияния избытка окислителя проведен эксперимент с соотношением водной и органической фаз 2 : 1.

Облучение образцов проводили на установке РХМ-гамма-20 (НПО «Радон») до поглощенной дозы 1 МГр при мощности дозы 9.4 ± 0.4 кГр/ч. Растворы облучали при температуре окружающего воздуха $25 \pm 2^\circ\text{C}$ в стеклянном цилиндрическом сосуде, снабженном гидрозатвором, заполненным водным раствором 4 моль/л HNO₃.

Высокотемпературный кислотный гидролиз (далее – термоллиз) проводили в автоклаве емкостью 300 см³, нагреваемом в воздушном термостате при варьировании температуры от 90 до 170°C в условиях контроля температуры и давления. Объем образцов составлял 30 мл, время выдержки в автоклаве составляло 6 ч, а объемное соотношение органической и водной (кислотной) фаз – 1 : 1 или 1 : 2.

Для определения продуктов деградации ТБФ использовали газовый хроматограф Tracer 1310 с пламенно-ионизационным детектором и квадрупольным масс-спектрометром ICQLT. Применяли капиллярные колонки Thermo TG-5MS (15 м, внутренний диаметр 0.25 мм, 0.25 мкм) и TG-SQCGC (30 м, внутренний диаметр 0.25 мм, 0.25 мкм, в случае пламенно-ионизационного детектора). Газом-носителем

служил гелий при постоянном потоке (1.5 мл/мин или 1.2 мл/мин в случае пламенно-ионизационного детектора). Анализ проводили в режиме разделения потоков (коэффициент разделения 10) и без разделения потоков. Время без разделения потоков составляло 1 мин, затем устанавливали коэффициент разделения 5. Температура инжектора была постоянной и составляла 275°C. Применяли следующую температурную программу печи ГХ: 50°C в течение 2 мин, далее нагрев (15°C/мин) до 320°C и выдержка при 320°C в течение 5 мин. Масс-спектрометрическое детектирование проводили при ионизации электронным ударом (70 эВ) в диапазоне масс 35–650 а.е.м. Температуру источника ионов и переходника поддерживали на уровне 200°C. Сбор данных проводили в режиме полного ионного тока (TIC). Целевые соединения идентифицировали на основании индексов удерживания (RI) и масс-спектров (RT и RI в случае пламенно-ионизационного детектора). Использовали справочную базу данных NIST 11.0 и веб-книгу NIST.

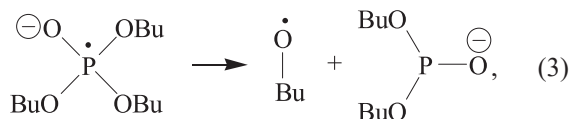
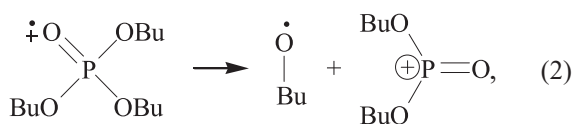
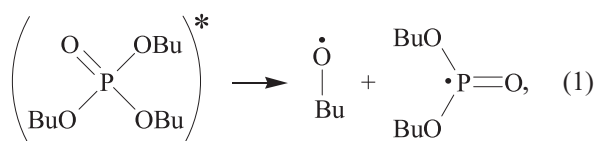
Образцы, содержавшие HNO₃, перед анализом легколетучих продуктов нейтрализовывали сухим бикарбонатом натрия в течение 12 ч и затем фильтровали. Анализ легколетучих продуктов проводили без разбавления пробы и без разделения потока. Образцы, не содержавшие HNO₃, растворяли в хлороформе (соотношение 1 : 100) и нейтрализовывали перемешиванием водным раствором бикарбоната натрия. Разделение потока 1 : 10 использовали для анализа растворов в хлороформе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

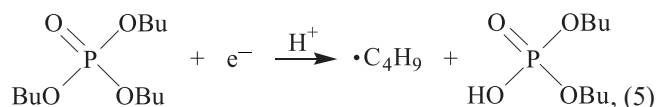
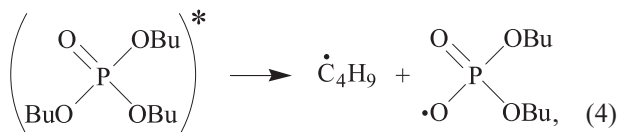
Продукты разложения ТБФ под действием γ -облучения. Методом хромато-масс-спектрометрии обнаружены следующие продукты разложения ТБФ: дибутилфосфорная кислота (ДБФК) (P1), монобутилфосфорная кислота (МБФК) (P2), нитропроизводные ($-\text{NO}_2$) и нитриты ($-\text{ONO}$) ДБФК (P3), нитраты ДБФК (P4), гидроксидибутилфосфат (гидроксипроизводные ДБФК) (P5), нитропроизводные ($-\text{NO}_2$) и нитриты ($-\text{ONO}$) ТБФ (P6), нитраты ТБФ (P7), гидроксидибутилдибутилфосфат (гидроксипроизводные ТБФ) (P8), димер ТБФ (P9).

Радиолиз ТБФ приводит к образованию трех основных продуктов – дибутилфосфата (P1), монобутилфосфата (P2) и димера (P9) (рис. 1). Выход

образования P9 составляет около 0.3 мкмоль/Дж. В свою очередь, образование P1 и P2 наблюдается с выходами 0.37 и 0.07 мкмоль/Дж соответственно. Таким образом, наблюдаемый общий выход радиолитической деградации ТБФ достигает почти 1 мкмоль/Дж, что согласуется с известными выходами деградации других органических соединений [24]. Преимущественное образование P1 и P9 свидетельствует о том, что главным радиационно-индуцируемым процессом в ТБФ является отщепление бутильных групп. Причем существуют два конкурентных процесса – отщепление бутокси-радикала и бутил-радикала. Квантово-химические расчеты [19] указывают на преимущественное отщепление бутокси-радикала. Такое отщепление вероятно в результате распада возбужденных молекул, катион-радикалов или анион-радикалов ТБФ:



Основными процессами отщепления бутил-радикала являются фрагментация возбужденных молекул ТБФ и диссоциативное присоединение электрона [19]:



Бутокси-радикалы исчезают преимущественно в реакциях отщепления водорода от алкильных групп, что подтверждается образованием *n*-бутанола (наблюдаемый выход 0.015 мкмоль/Дж). Более долгоживущие бутил-радикалы могут участвовать

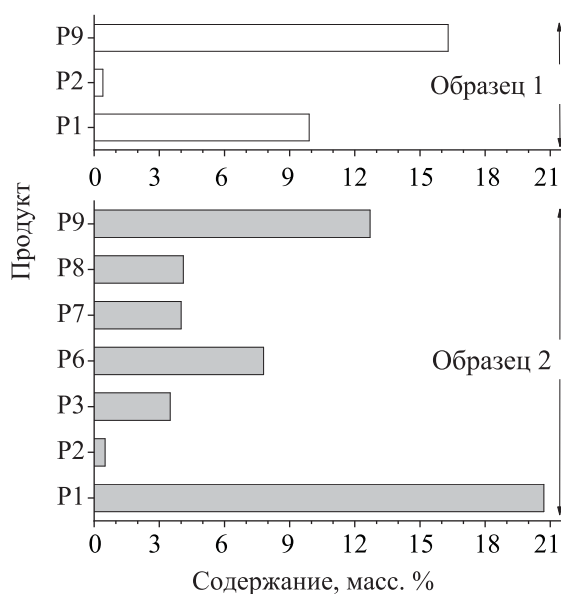


Рис. 1. Содержание основных продуктов разложения в облученных (1 МГр) образцах: 1 – ТБФ; 2 – ТБФ, предварительно насыщенный 4 моль/л HNO_3 .

в нескольких конкурентных процессах рекомбинации с образованием бутана (продукт диспропорционирования, наблюдаемый выход <0.003 мкмоль/Дж), октана (продукт димеризации, наблюдаемый выход <0.001 мкмоль/Дж) или бутил-производных ТБФ (продукты комбинации с участием фосфорсодержащих радикалов).

В образцах ТБФ, предварительно насыщенных азотной кислотой, содержание продуктов P1 и P2 существенно возрастает, а образование P9 уменьшается. В то же время в этих образцах образуются азотсодержащие (P3, P4, P6 и P7) и гидроксилсодержащие (P8) производные. Преобладают продукты, сохранившие все три бутильных заместителя. Однако в одном из этих бутильных групп атом Н замещен на группу $-\text{NO}_2$ ($-\text{ONO}$), $-\text{NO}_3$ или OH (P3, P6–P8).

Таким образом, Н-отщепление от бутильной группы становится одним из ключевых радиолитических процессов в образцах, насыщенных HNO_3 , за которым следует рекомбинация образовавшегося •ТБФ-радикала с азотсодержащим радикалом [1, 19, 20]. Основную роль играют радикалы •NO и •NO₂, однако продукты P3 и P6 также могут иметь структуру нитрозоэфиров (RO–NO) [12]. Участие радикалов •OH (возникающих по механизму прямого или косвенного действия излучения на воду и HNO_3) в образовании P8 в образцах, насыщенных HNO_3 ,

маловероятно. Эти радикалы преимущественно расходуются в быстрых реакциях с нитрит-ионами, в процессах отщепления воды от бутильных групп или в присоединении к двойным связям [21]. Соответственно, основным источником Р8 может являться гидролиз радиационно-индуцированных нитроэфиров. Длительность γ -облучения составляла около 110 ч, что достаточно для заметного вклада кислотного гидролиза во вторичные превращения радиолитических продуктов [11]. Окисление ТБФ азотной кислотой приводит к появлению спиртов и карбонильных соединений, которые также могут участвовать в образовании сложных нитрозозэфиров. Реакция радикала $\cdot\text{H}$ со спиртом или карбонильным соединением приводит к образованию алкокси-радикала [22, 23], последующая рекомбинация которого с $\cdot\text{NO}$ или $\cdot\text{NO}_2$ дает соответственно нитрозо- и нитроэфир.

Реакции радикалов $\cdot\text{ТБФ}$ с $\cdot\text{NO}$ и $\cdot\text{NO}_2$ конкурируют с процессами образования димеров Р9. Поэтому выход Р9 в образце ТБФ, насыщенном HNO_3 , существенно меньше, чем в образце без насыщения. Одновременно с этим становится шире и ассортимент продуктов (рис. 1), однако разложение ТБФ при его радиоллизе оказалось более высоким по сравнению с ТБФ, насыщенным HNO_3 (рис. 2), что обусловлено известным процессом радиационно-индуцированной олигомеризации ТБФ [19, 24].

Разложение ТБФ наблюдается не только в процессе радиолиза, но и в ходе последующего термолиза. Рисунок 2 показывает, что любое изменение условий обработки образцов влияет на разложение ТБФ. Контакт исходного ТБФ с 4 моль/л HNO_3 в отсутствие радиолиза и нагревания мало сказывается на ТБФ. Его деградация не превышает 2 мас%. Следовательно, образование продуктов в образцах ТБФ, насыщенных 4 моль/л HNO_3 , вызывается, в первую очередь, радиолизом, а также последующими реакциями промежуточных радиолитических продуктов друг с другом и с компонентами облучаемой смеси. Радиолитическая деградация ТБФ, предварительно насыщенного азотной кислотой, оказывается меньше, чем в отсутствие кислоты. Очевидной причиной этого является быстрый захват сольватированных электронов нитратом и протоном. В результате быстрые реакции нейтрализации электронов катион-радикалом ТБФ и диссоциативного присоединения электрона к ТБФ заменяются на более медлен-

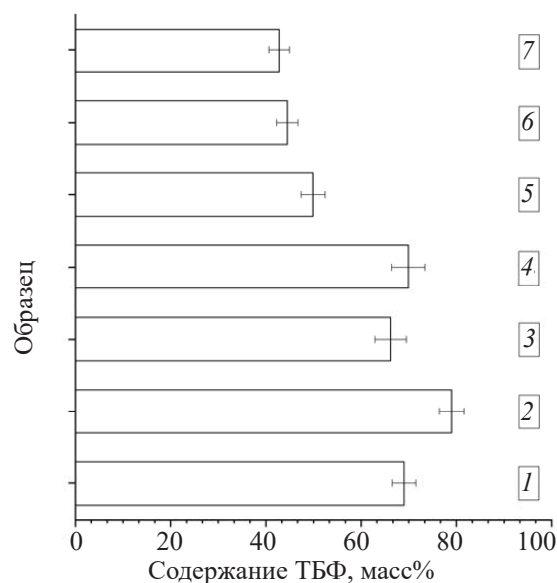


Рис. 2. Остаточное содержание ТБФ в облученных до 1 МГр (1, 2, 5–7) и необлученных (3, 4) образцах: 1 – ТБФ; 2 – ТБФ, предварительно насыщенный 4 моль/л HNO_3 ; 3 – ТБФ, нагретый при 110°C в присутствии 12 моль/л HNO_3 ; 4 – ТБФ, насыщенный 4 моль/л HNO_3 и нагретый при 150°C в присутствии 12 моль/л HNO_3 ; 5 – ТБФ, нагретый после облучения при 110°C в присутствии 8 моль/л HNO_3 ; 6 – ТБФ, нагретый после облучения при 110°C в присутствии 12 моль/л HNO_3 ; 7 – ТБФ, предварительно насыщенный 4 моль/л HNO_3 и нагретый после облучения при 150°C в присутствии 12 моль/л HNO_3 . Время нагрева 6 ч.

ные реакции ТБФ с радикалами $\cdot\text{H}$ [19, 25]. К тому же, как было отмечено выше, продукты радиолиза кислоты частично подавляют димеризацию радикалов ТБФ [25–28]. Аналогичное влияние кислоты на ТБФ наблюдалось в случае радиолиза под действием ускоренных электронов [19].

В настоящей работе гидролиз был ускорен нагревом. Рисунок 2 показывает, что выходы разложения ТБФ в процессе радиолиза и кислотно-стимулируемого термолиза сопоставимы. Более того, высокотемпературное воздействие 12 моль/л HNO_3 оказывает на ТБФ большее воздействие, чем радиолиз после предварительного контакта ТБФ с 4 моль/л HNO_3 . ТБФ, насыщенный 4 моль/л HNO_3 и затем нагретый при 150°C в присутствии 12 моль/л HNO_3 , более устойчив к деградации, чем ТБФ, нагретый при 110°C. С одной стороны, это связано с уменьшением средней концентрации HNO_3 , а с другой – с частичной регенерацией ТБФ за счет термостимулируемого распада производных ТБФ (см. ниже).

Сочетание радиолитического и последующего термического разложения интенсифицирует деградацию ТБФ. Так, в образцах 5, 6 и 7 (рис. 2) степень деструкции ТБФ составила более 50%. Как и следовало ожидать, пострадиационный термический разложение в присутствии 8 моль/л HNO_3 действует на ТБФ несколько слабее, чем в присутствии 12 моль/л HNO_3 . Сравнение содержания ТБФ в образцах, подвергнутых радиолитическому и термическому разложению, показывает, что совместное действие излучения и температуры соответствует простой сумме действий каждого из этих факторов. Например, остаточное содержание ТБФ в образце 6 (рис. 2) составляет около 45%. Судя по индивидуальным эффектам, радиолитический разложение (образец 1) способен понизить концентрацию ТБФ на 31%, а последующий высокотемпературный гидролиз (образец 3) мог бы дополнительно уменьшить остаточную концентрацию ТБФ еще на 24%. Таким образом, ожидаемая на основании суммы эффектов остаточная концентрация ТБФ в образце 6 должна составлять около 55%. Эта оценка совпадает с экспериментальным значением. Следовательно, в образце ТБФ, облученном до дозы 1 МГр и затем нагретом при 110°C в присутствии 12 моль/л HNO_3 , наблюдается аддитивное влияние радиолитического и термического разложения.

Продукты разложения ТБФ под действием термического разложения. Как и в случае радиолитического разложения, преобладающим продуктом термического разложения ТБФ является дибутилфосфат Р1 (рис. 3). В отсутствие нагрева Р1 также является главным продуктом кислотного гидролиза [1, 11, 19]. Среди продуктов термического разложения не обнаружен димер Р9. Очевидно, образование Р9 при радиолитическом разложении обусловлено преимущественно радикальным механизмом, тогда как термический разложение не приводит к появлению радикалов. Радиолитическое формирование Р9 обусловлено отмеченной выше димеризацией радикалов ТБФ, имеющих радикальный центр на одном из углеродных атомов бутильных заместителей. Пострадиационный термический разложение не может влиять на этот процесс, однако он может вызывать частичное гидролитическое разложение димера Р9. Таким образом, димер Р9 является специфическим продуктом радиолитического разложения и может служить индикатором сравнительной роли радиолитического разложения в сумме превращений ТБФ.

Выходы гидролитического формирования Р1 и Р2 монотонно увеличиваются с ростом температуры. В свою очередь, образование продуктов Р6–Р8 слабо

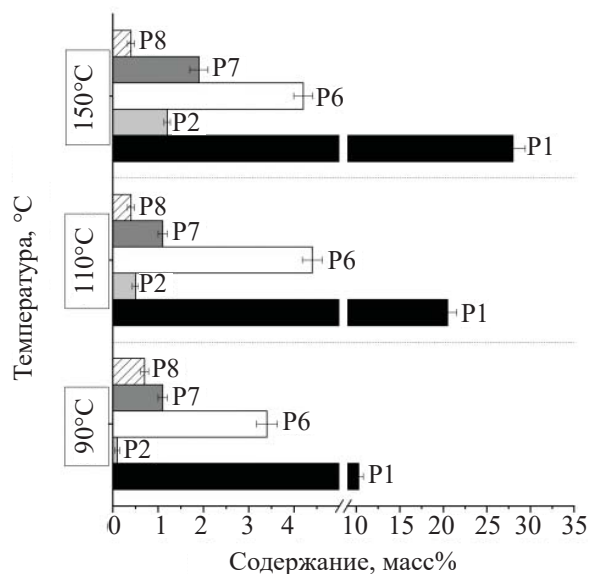


Рис. 3. Содержание основных продуктов термического разложения ТБФ в присутствии 12 моль/л HNO_3 при температуре термического разложения 90, 110, 150°C.

зависит от температуры, а зависит преимущественно от наличия HNO_3 . Вероятно, температура может влиять на накопление Р6–Р8 преимущественно за счет их термического разложения и термостимулируемого ускорения гидролиза. В частности, чем выше температура пострадиационного термического разложения, тем более заметно снижение концентрации кислоты. После термического разложения необлученного ТБФ в контакте с 12 моль/л HNO_3 остаточная концентрация кислоты в водной фазе составила около 2.7 моль/л при 90 и 110°C, а при 150°C – 1.6 моль/л.

Данные рис. 4, а демонстрируют сходный состав продуктов радиолитического и термического разложения. Основные различия состоят в том, что термический разложение при 110°C дает меньший выход Р3, а продукт Р9 не образуется. По сравнению с продуктом Р6 продукт Р3 имеет на одну бутильную группу меньше. Очевидно, радиолитический разложение при комнатной температуре ведет к более глубокому разложению ТБФ, чем кислотный гидролиз при 110°C. Основными путями дебутилирования при радиолитическом разложении являются реакции (1)–(5) [19, 24]. Отщепление бутильного и бутокси-радикалов проявляется в образовании *n*-бутана и *n*-бутанола. Эти продукты являются преобладающими легкими продуктами радиолитического разложения ТБФ как в присутствии, так и в отсутствие кислоты. Дебутилирование также проявляется в образовании *n*-октана, представляющего собой димер *n*-бутильных радикалов.

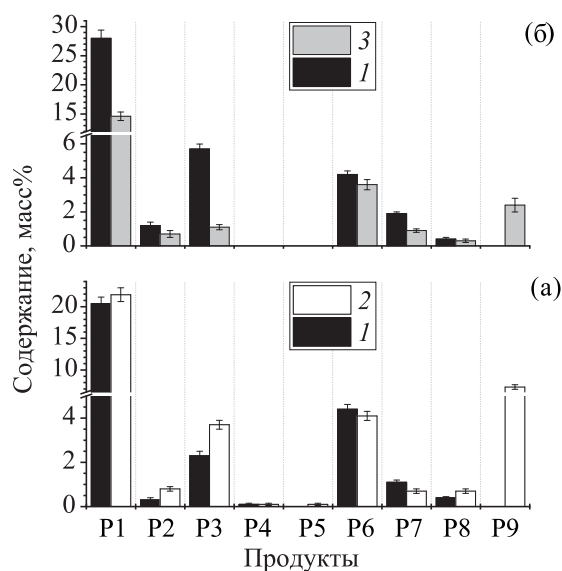


Рис. 4. Сравнение влияния пострадиационного термолиза при 110 (а) и 150°C (б) в присутствии 12 моль/л HNO_3 на состав продуктов: 1 – в исходном ТБФ; 2 – в облученном ТБФ; 3 – в ТБФ, насыщенном 4 моль/л HNO_3 и облученном.

Рис. 4, б показывает, что термолиз ТБФ в контакте с 12 моль/л HNO_3 дает более высокие выходы всех продуктов разложения ТБФ (кроме Р9) по сравнению с радиолитическим ТБФ, насыщенном азотной кислотой, и с последующим термолизом. В частности, пострадиационный высокотемпературный гидролиз может приводить к частичной регенерации ТБФ в процессах термического разложения продуктов радиолитического разложения, таких как Р6, Р7 и Р8. Например, в образце 3б (рис. 4) в стадии пострадиационного термолиза участвует меньшее количество ТБФ и большее количество производных ТБФ по сравнению с образцом 1б (рис. 4). Соответственно, радиолитические продукты неизбежно подвергаются воздействию температуры, кислоты и воды, что повышает вероятность их разложения с частичной регенерацией ТБФ.

Радиолитический и пострадиационный термолиз при $<150^\circ\text{C}$ приводят к относительно небольшому выходу легколетучих продуктов разложения ТБФ – до 2% от исходного содержания ТБФ. Главными летучими продуктами радиолитического разложения являются бутан и *n*-бутанол, тогда как термолиз добавляет к ним дибутиловый эфир и этилбензол (до 1%). Дибутиловый эфир является продуктом высокотемпературного взаимодействия бутильной и бутоксилильной групп ТБФ. Выход легколетучих продуктов резко

возрастает при температуре термолиза выше 150°C и достигает почти 30%. Таким образом, дибутиловый эфир и этилбензол могут выступать в качестве специфических индикаторов вклада высокотемпературного кислотного гидролиза в сумму превращений ТБФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В разложение ТБФ в азотнокислых растворах вносят существенные вклады как γ -радиолитический, так и термолиз. При этом ряд радиолитических и термических процессов дают одинаковые продукты. Насыщение ТБФ азотной кислотой приводит к уменьшению наблюдаемого выхода радиолитического образования димера Р9, что указывает на радикальный механизм его образования. Параллельно появляются продукты нитрования и нитроксилирования ТБФ. Более того, содержание Р9 в облученных образцах слабо зависит от пострадиационного термолиза. Предварительное насыщение ТБФ азотной кислотой стимулирует радиолитическое образование дибутилфосфата (Р1). Этот эффект связан как с иницированием параллельного кислотного гидролиза, так и с повышением роли радикалов $\bullet\text{H}$. Гидролитическое образование бутилфосфатов Р1 и Р2 зависит прежде всего от температуры, тогда как образование азотсодержащих продуктов более чувствительно к концентрации кислоты и малочувствительно к температуре термолиза. По сравнению с ТБФ продукты его радиолитической деградации менее устойчивы к действию азотной кислоты и температуры.

При температурах выше 110°C пострадиационный кислотный гидролиз стимулирует разложение радиолитических продуктов. Наименее термостойкими являются продукты радиационно-индуцированного нитрования и нитроксилирования. Кислотный гидролиз при температурах выше 110°C является основной причиной образования легколетучих продуктов, увеличивающих пожаро- и взрывоопасность операций с ТБФ-содержащими системами.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование проводили на оборудовании Уникальной научной установки «Комплекс радиационно-химических исследований» ИФХЭ РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Дополнительные материалы для этой статьи доступны по <https://doi.org/10.31857/S0033831122060053> для авторизированных пользователей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wright A., Paviet-Hartmann P.* // Sep. Sci. Technol. 2010. Vol. 45, N 12–13. P. 1753.
2. *Владимирова М.В., Куликов И.А.* Гидролиз и радиолиз три-*n*-бутилфосфата. М.: ЦНИИАтоминформ, 1984.
3. *Vladimirova M.V., Kulikov I.A., Kuprij A.A.* // At. Energy. 1992. Vol. 73, N 4. P. 788.
4. *Neace J.C.* // Sep. Sci. Technol. 1983. Vol. 18, N 14–15. P. 1581.
5. *Sharma S., Ghosh S.K., Naik D.B., Dhami P.S., Sharma J.N.* // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2014. Vol. 302, N 1. P. 583.
6. *Egorov G.F., Afanas'ev O.P., Nazin E.R., Kazarinov V.E.* // Radiochemistry. 1996. Vol. 38, N 6. P. 531.
7. *Rodin A.V., Skvortsov I.V., Belova E.V., Dvoeglazov K.N., Myasoedov B.F.* // Radiochemistry. 2020. Vol. 62, N 6. P. 723.
8. *Aneheim E., Ekberg C., Fermvik A., Foreman M.R.S.J., Grüner B., Hájková Z., Kvičalová M.* // Solvent Extr. Ion Exch. 2011. Vol. 29, N 2. P. 157.
9. *Peterman D.R., Mincher B.J., Riddle C.L., Tillotson R.D.* Summary Report on Gamma Radiolysis of TBP/*n*-Dodecane in the Presence of Nitric Acid Using the Radiolysis/Hydrolysis Test Loop. Idaho National Laboratory (INL). № INL/EXT-10-19866.
10. *Schulz W.W., Navratil J.D.* Science and Technology of Tributyl Phosphate: Selected Technical and Industrial Uses. New York: CRC, 1987.
11. *Vladimirova M.V., Kulikov I.A., Kuprij A.A.* // At. Energy. 1991. Vol. 70, N 2. P. 111.
12. *Mincher B.J., Modolo G., Mezyk S.P.* // Solvent Extr. Ion Exch. 2009. Vol. 27, N 1. P. 1.
13. *Nash K.L., Madic C., Mathur J.N., Lacquement J.* // The Chemistry of the Actinide and Transactinide Elements. Dordrecht: Springer, 2010. P. 2622.
14. *Pearson J., Nilsson M.* // Solvent Extr. Ion Exch. 2014. Vol. 32, N 6. P. 584.
15. *Belova E.V., Dzhivanova Z.V., Myasoedov B.F., Stefanovsky S.V.* // MRS Adv. 2018. Vol. 3, N 21. P. 1181.
16. *Belova E.V., Dzhivanova Z.V., Smirnov A.V., Kadyko M.I., Stefanovsky S.V.* // MRS Adv. 2017. Vol. 2, N 11. P. 627.
17. *Dzhivanova Z., Kadyko M., Smirnov A., Belova E.* // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2019. Vol. 321, N 2. P. 439.
18. *Dzhivanova Z.V., Smirnov A.V., Pavlov Y.S., Belova E.V.* // Prog. Nucl. Energy. 2020. Vol. 119. 103174.
19. *Serenko Y., Yudin N.V., Gritcenko R.T., Rodin A.V., Belova E.V., Ponomarev A.V.* // Radiat. Phys. Chem. 2021. Vol. 185. 109495.
20. *Tripathi S.C., Ramanujam A., Gupta K.K., Bindu P.* // Sep. Sci. Technol. 2001. Vol. 36, N 13. P. 2863.
21. *Makarov I.E., Ponomarev A.V.* // Ionizing Radiation Effects and Applications. London: InTech, 2018. Ch. 5.
22. *Vlasov S.I., Kholodkova E.M., Ponomarev A.V.* // High Energy Chem. 2021. Vol. 55, N 5. P. 393.
23. *Vlasov S.I., Ponomarev A.V.* // Radiat. Phys. Chem. 2021. Vol. 184. 109460.
24. *Woods R., Pikaev A.* Applied Radiation Chemistry: Radiation Processing. New York: Wiley, 1994. 552 p.
25. *Kim J.C., Kim D.H., Kim D.K., Kim Y., Makarov I.E., Pikaev A.K., Ponomarev A.V., Seo Y.T., Han B.* // High Energy Chem. 1999. Vol. 33, N 6. P. 359.
26. *Balcerzyk A., El Omar A.K., Schmidhammer U., Pernot P., Mostafavi M.* // J. Phys. Chem. A. 2012. Vol. 116, N 27. P. 7302.
27. *Musat R., Denisov S.A., Marignier J.-L., Mostafavi M.* // J. Phys. Chem. B. 2018. Vol. 122, N 7. P. 2121.
28. *Tian M.-K., Tang S.-L., Tang H.-B., Ju X.-H.* // J. Chem. 2020. Vol. 2020. 2012417.