

ВЛИЯНИЕ ИЗОПАРА-М НА РАДИАЦИОННУЮ И ТЕРМИЧЕСКУЮ ДЕГРАДАЦИЮ ТБФ В РАСТВОРАХ

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

^а *Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9*

^б *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 14.04.2022, после доработки 05.07.2022, принята к публикации 12.07.2022

Исследована пострадиационная (доза 1 МГр) термическая и гидролитическая стойкость 30 об% растворов трибутилфосфата в Изопаре-М при 90–170°C в контакте с водным раствором 8–12 моль/л HNO₃. Изопарафины участвуют в радиолитической деградации ТБФ преимущественно за счет радикальных процессов алкилирования и гидрирования. Пострадиационный кислотный гидролиз вызывает деградацию азотсодержащих продуктов радиолитического распада, приводя к частичной регенерации дибутилфосфата и монобутилфосфата. Нагрев дополнительно стимулирует деалкилирование продуктов с образованием легколетучих углеводородов, что повышает пожаро- и взрывоопасность высокотемпературных операций с облученными растворами.

Ключевые слова: три-*n*-бутилфосфат, Изопар-М, азотная кислота, радиолитический распад, термолиз, гидролиз.

DOI: 10.31857/S0033831122060065, **EDN:** MFUMCE

ВВЕДЕНИЕ

При переработке отработавшего ядерного топлива экстракционная смесь [1] подвергается высоким радиационным и химическим нагрузкам, которые приводят к образованию и накоплению в ней продуктов, ухудшающих ее гидродинамические и селективные свойства. В связи с этим экстракционную смесь постоянно регенерируют внутри экстракционного цикла путем промывки содой, однако часть продуктов деградации не удаляется при такой обработке и постепенно накапливается в ней. Радиолитический распад вызывает деградацию не только экстрагента, но и углеводородных разбавителей. Наиболее негативное влияние на экстракционные свойства оказывают продукты окисления (в частности, нитрования) и алкилирования ТБФ [1]. Экстрагент и разбавитель обладают разной устойчивостью к действию ионизирующего излучения, температуры и окислительно-восстановительных агентов [2–4], а продукты их разложения влияют друг на друга в зависимости от состава раствора и условий экспе-

римента [5]. Поэтому необходим детальный анализ корреляций между условиями эксплуатации, экстракционной эффективностью и устойчивостью к разложению экстракционной смеси [6–8].

Ранее мы провели комплексное исследование пострадиационной стойкости экстрагента ТБФ [9]. В настоящей работе изучены растворы 30 об% ТБФ в Изопаре-М с целью определения условий образования воспламеняющихся продуктов, определяющих пожаро- и взрывобезопасность технологических процессов. Анализировали продукты деградации ТБФ и Изопара-М в отсутствие и в присутствии HNO₃ в условиях γ -радиолитического распада и последующего кислотного гидролиза (в контакте с 8–12 моль/л HNO₃) при температурах 90–170°C.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Три-*n*-бутилфосфат (99%, Acros) очищали от остаточных спиртов и других окисляющихся побочных продуктов синтеза по методике, описанной в работе [9]. Раствор 30 об% ТБФ в изопарафиновом

разбавителе Изопар-М (Exxon Mobil, далее – изо-парафины) насыщали водным раствором 4 моль/л HNO_3 в стеклянной делительной воронке со стеклянной винтовой мешалкой. Насыщение проводили три раза при равных объемах органической и водной фаз и времени каждого контакта 20 мин.

Образцы облучали на установке РХМ-гамма-20 (НПО «Радон») при температуре $25 \pm 2^\circ\text{C}$ в стеклянном цилиндрическом сосуде с гидрозатвором, заполненным водным раствором 4 моль/л HNO_3 . Мощность поглощенной дозы составляла 9.4 ± 0.4 кГр/ч, а интегральная поглощенная доза – 1 МГр.

Термолиз облученных образцов проводили в автоклаве емкостью 300 см^3 , нагреваемом в воздушном термостате при температурах 90, 110, 150 и 170°C в контакте с 8 или 12 моль/л HNO_3 . Образцы (30 мл) выдерживали в автоклаве 6 ч. Использовали равные объемы органической (экстрагент в разбавителе) и водной фаз (водный раствор кислоты). Для оценки влияния избытка окислителя использовали соотношение водной и органической фаз 2 : 1.

Продукты разложения экстракционной смеси анализировали на ИК спектрометре IR Prestige-21 (Shimadzu) в однолучевом режиме. Спектры регистрировали, используя стекла CaF_2 и кювету со свинцовой прокладкой толщиной 0.129 мм. Концентрацию различных соединений определяли по интенсивности поглощения с использованием калибровочных кривых: $-\text{NO}_2$ 1552 см^{-1} (2-нитропропан), $-\text{ONO}_2$ 1629 см^{-1} (изопропилнитрат), $-\text{COOH}$ 1730 см^{-1} (нонановая (пеларгоновая) кислота), $-\text{CO}$ 1720 см^{-1} (4-метил-2-пентанон), $-\text{COOR}$ 1740 см^{-1} (гексилбутират). Присутствие кетонов в пробах доказано качественной реакцией 4-метил-2-пентанона с 2,4-динитрофенилгидразином по исчезновению полосы поглощения карбонильной группы и появлению полос поглощения группы $-\text{NH}$ (3324 и 3108 см^{-1}). Аналогичные полосы поглощения наблюдаются и в облученных пробах при взаимодействии с 2,4-динитрофенилгидразином. Количественный анализ основывался на стандартной процедуре построения калибровочных зависимостей светопоглощения.

Для разделения и идентификации продуктов использовали газожидкостной хроматограф Thermo Scientific Trace 1310 с моноквадропольным анализатором ISQ 8000 и ионизацией электронным уда-

ром (70 эВ). Применяли колонку Thermo (TG-5MS, $15\text{ м} \times 0.25\text{ мм}$) с соотношением полидифенилсилоксан/полидиметилсилоксан = 5 : 95. Температура испарителя составляла 275°C , нагрев термостата – от 50 до 320°C , объем пробы 0.5 мкл. При подготовке образцов и идентификации продуктов использовали методику, изложенную в работе [9].

Состав экстракционных смесей и условия их обработки представлены в тексте в виде кратких обозначений. E30 обозначает 30 об% ТБФ в Изопаре-М. S4 указывает на предварительное (до радиолитического насыщения экстракционной смеси 4 моль/л HNO_3 . D1 обозначает поглощенную дозу 1 МГр. T90, T110, T150 и T170 обозначают термолиз экстракционной смеси при соответствующей температуре ($^\circ\text{C}$). A8 и A12 обозначают концентрацию азотной кислоты в контактирующем водном растворе (8 или 12 моль/л соответственно) при пострadiaционном термолизе. Литера W указывает, что объемное соотношение водной и органической фаз при термолизе было 2 : 1; во всех остальных случаях соотношение было 1 : 1. Например, E30/S4/D1/T110/A12 означает 30 об% раствор ТБФ в Изопаре-М, предварительно насыщенный 4 моль/л HNO_3 , облученный при 1 МГр, а затем подвергнутый термолизу при 110°C в присутствии 12 моль/л HNO_3 при соотношении водной и органической фаз 1 : 1. Все последующие рисунки относятся к образцам серии E30/ (30 об% ТБФ в Изопаре-М). Для краткости обозначения E30/ на рисунках опущены.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Радиолиз. Методом хромато-масс-спектрометрии (см. Дополнительные материалы) обнаружены следующие продукты разложения ТБФ в Изопаре-М (табл. 1). Продукты P1–P9 ранее были идентифицированы в облученном ТБФ без разбавителя [9]. Присутствие разбавителя приводит к появлению специфических продуктов радиолитического разложения – алкилпроизводных P10–P12, различающихся длиной, положением и числом алкильных групп. В таблице используются обозначения: Bu – бутильная группа, R₁, R₂ и R₃ – другие алкильные группы.

В исследуемых образцах E30/D1 содержание Изопара-М составляет 70 об% (63.9 мас%). Соответственно, электронная доля разбавителя почти

Таблица 1. Продукты деградации смеси 30% ТБФ в Изопаре-М

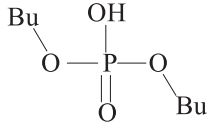
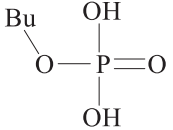
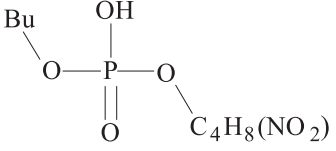
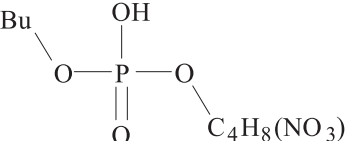
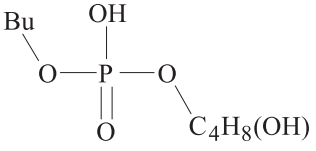
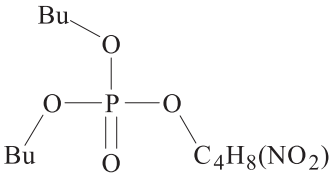
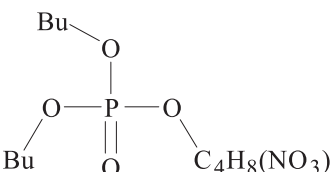
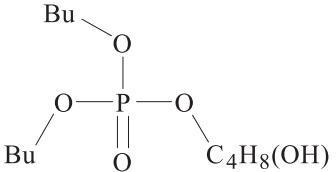
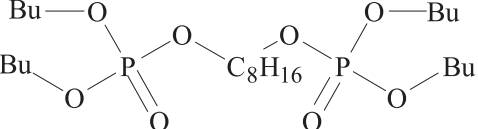
Соединение	Обозначение
	Дибутилфосфорная кислота (ДБФК) – P1
	Монобутилфосфорная кислота (МБФК) – P2
	Нитропроизводные (-NO ₂) и нитриты (-ONO) ДБФК – P3
	Нитраты ДБФК – P4
	Гидроксibuтилбутилфосфат – P5
	Нитропроизводные (-NO ₂) и нитриты (-ONO) ТБФ – P6
	Нитраты ТБФ – P7
	Гидроксibuтилдibuтилфосфат – P8
	Димер ТБФ – P9

Таблица 1. (Продолжение)

Соединение	Обозначение
	Продукт алкилирования ТБФ – P10
	Продукт алкилирования ТБФ – P11
	Продукт алкилирования димера – P12

вдвое выше, чем ТБФ. Однако вопреки электронным долям деградация ТБФ в облученном образце E30/D1 интенсивнее, чем изопарафинов – радиолит при 1 МГр вызывает снижение концентрации ТБФ и изопарафинов примерно на 14 и 8% соответственно. Следовательно, разбавитель в данном образце не препятствует разложению ТБФ. Напротив, ТБФ служит более эффективным акцептором энергии и заряда и тем самым предоставляет физическую и химическую защиту для изопарафинов. При этом разбавитель участвует в образовании продуктов радиолитической деградации ТБФ. Радиолит изопарафинов служит источником алкильных радикалов, чья перекрестная рекомбинация с радикалами ТБФ обеспечивает образование продуктов P10–P12 (рис. 1). Содержание алкилпроизводных ТБФ в облученном образце E30/D1 близко к 14%, тогда как доля изопарафиновых производных, не содержащих фосфора, не превышает 3%. Наблюдаемый эффект может быть частично обусловлен более низкой молярной массой компонентов Изопара-М и соответственно меньшей массовой долей новых алкильных групп в радиолитических продуктах P10–P12. Вместе с тем, ТБФ обладает более низкими потенциалами ионизации и возбуждения по сравнению с отдельными компонентами разбавителя, что

способствует частичному переносу энергии и заряда от компонентов ИП к молекулам ТБФ.

Радиолит образца E30/S4/D1 приводит к снижению содержания ТБФ и разбавителя почти на 7.5 и 19% соответственно. Таким образом, разбавитель менее устойчив к действию продуктов радиолита

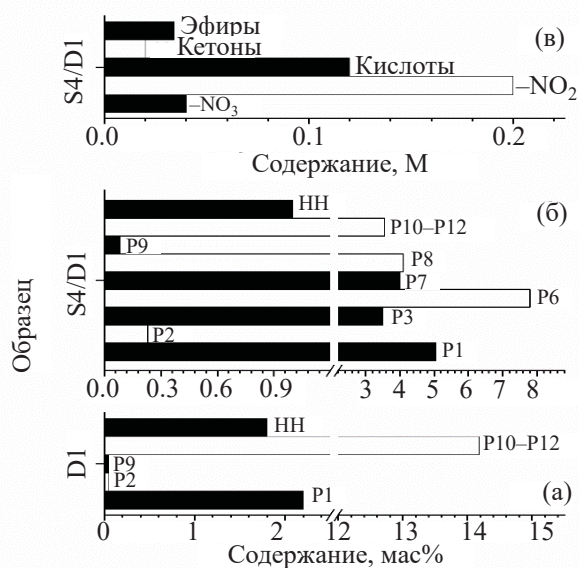


Рис. 1. Содержание продуктов деградации в облученных образцах E30/D1 (а) и E30/S4/D1 (б, в); HH – углеводороды тяжелее компонентов разбавителя. Групповой состав продуктов (в) в образце E30/S4/D1 представлен по данным ИК спектроскопии.

азотной кислоты. Вследствие этого радиолитическая деградация ТБФ при одновременном присутствии кислоты и разбавителя снижается. Основной вклад в наблюдаемый защитный эффект обусловлен присутствием кислоты – предварительное насыщение обеспечивает меньшее радиолитическое разложение ТБФ даже в отсутствие изопарафинов [9, 10]. Благодаря кислотнo-стимулируемому подавлению реакций между радикалами ТБФ и изопарафинами в образце E30/S4/D1 наблюдается примерно равное содержание алкилпроизводных ТБФ (рис. 1) и продуктов рекомбинации алкильных радикалов друг с другом (3.5 и 2–3%).

Наряду с P10–P12 среди продуктов конверсии ТБФ в образце E30/D1 наблюдаются дибутилфосфат P1, монобутилфосфат P2 и димер P9 (рис. 1, а). Относительное содержание P1, P2 и P9 в присутствии 70% разбавителя намного ниже, чем в неразбавленном ТБФ [9]. Наибольший эффект разбавления изопарафинами наблюдается для P9. Очевидная причина снижения выхода димера P9 состоит в том, что димеризация радикалов ТБФ в растворе частично подавляется вследствие их участия в реакциях рекомбинации с алкильными радикалами.

Присутствие азотной кислоты в облучаемом растворе (образец E30/S4/D1) приводит к более сложному составу радиолитических продуктов, прежде всего за счет появления азотсодержащих и кислородсодержащих соединений, нетипичных для радиолитического неразбавленного ТБФ (рис. 1, б, в). Прямое и косвенное действия излучения на азотную кислоту генерирует радикалы $\bullet\text{NO}$, $\bullet\text{NO}_2$ и $\bullet\text{NO}_3$ [11], которые вовлекаются в реакции с алкильными радикалами. Как следствие, наблюдается снижение выхода алкилпроизводных ТБФ – содержание P10–P12 понижается с 14.2 (рис. 1, а) до 3.5% (рис. 1, б). Вместе с тем, кислота способствует повышению выходов бутилфосфатов P1 и P2, а также небольшому снижению содержания димеров P9. Более эффективное отщепление бутильных групп от ТБФ связано как с увеличением роли реакций радикалов $\bullet\text{H}$ (за счет конверсии электронов в $\bullet\text{H}$ в присутствии кислоты [6, 11]), так и с кислотным гидролизом, происходящим во время длительного γ -облучения (около 106 ч).

Пострадиационный термолиз. Данные рис. 2 показывают существенное влияние условий пострадиационного термолиза на соотношение продуктов

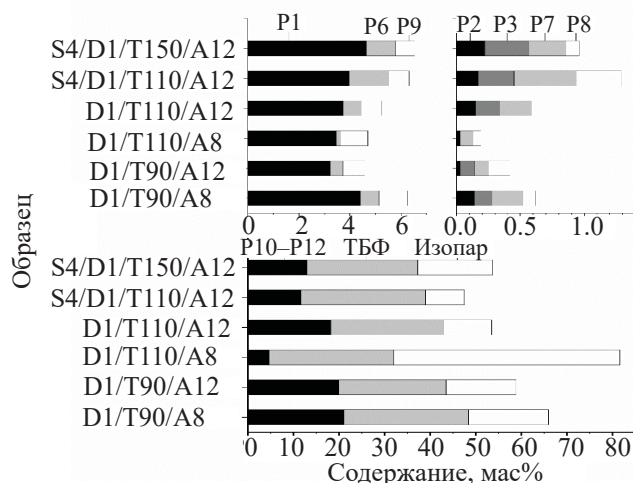


Рис. 2. Содержание ТБФ, Изопара-М и основных производных ТБФ в облученных до дозы 1 МГр образцах, подвергнутых пострадиационному термолизу.

деградации растворов. Кислотный гидролиз при 90–150°C как после облучения, так и без облучения дает такие же фосфорсодержащие продукты, что и радиолитический, за исключением соединений P9–P12. При этом независимо от условий термолиза дибутилфосфат (P1) является доминирующим продуктом (рис. 2).

Предварительное насыщение растворов азотной кислотой способствует более эффективному образованию P6 в радиолитических процессах (образцы E30/S4/D1/T110/A12 и E30/S4/D1/T150/A12). Однако P6 обладает невысокой термической и гидролитической стойкостью и, как следствие, высокая температура пострадиационного кислотного гидролиза стимулирует его частичное разложение. Выход димера P9 почти в полтора раза выше в облученных растворах, изначально не содержащих HNO_3 . Этот эффект свидетельствует о расходовании первичных радикалов ТБФ в реакциях с азотсодержащими радикалами, в результате чего появляются P2, P3, P6 и P7. В свою очередь, отсутствие азотсодержащих радикалов обеспечивает более эффективное образование димеров P9. Образование гидролитического продукта P8 [9, 10] стимулируется как предварительным насыщением образцов азотной кислотой, так и их пострадиационным контактом с 12 моль/л HNO_3 . Однако содержание P8 убывает на стадии пострадиационного термолиза. Сложные корреляции между составом продуктов и условиями обработки определяются конкуренцией многих химических процессов с участием воды, кислоты,

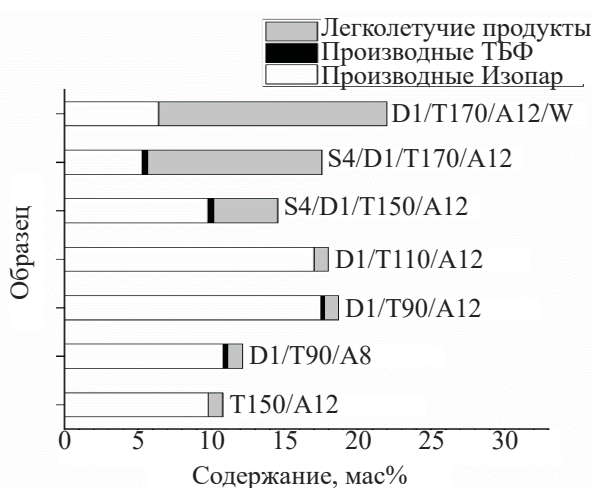


Рис. 3. Содержание летучих соединений и жидких продуктов окисления изопарафинов (жирные спирты, простые эфиры, карбонильные соединения) и ТБФ (кроме продуктов, представленных на рис. 2) в исследованных образцах.

изоалканов, ТБФ и продуктов их превращений. В частности, уменьшение содержания продуктов Р6–Р8 с ростом температуры (от 110 до 150°C) указывает на их термическую нестабильность.

В облученных растворах соотношение экстрагента и разбавителя мало отличается от исходного (30 : 70). Однако пострадиационный нагрев всего до 90°C существенно изменяет это соотношение, в первую очередь за счет уменьшения фракции изопарафинов. В образцах, подвергнутых термолизу при 150°C, содержание разбавителя составляет чуть меньше половины объема раствора, а после нагрева до 170°C доля исходных изопарафинов снижается до 15–20% (рис. 3).

Превращения разбавителя. При температуре до 110°C кислотный гидролиз облученных образцов, предварительно насыщенных азотной кислотой, так же как и кислотный гидролиз необлученных образцов, не приводит к существенному образованию легких продуктов разложения изопарафинов. В облученных образцах без стадии термолиза обнаруживается около 1–1.5 мас% легколетучих продуктов фрагментации разбавителя и ТБФ. Основными низкомолекулярными продуктами в неразбавленном ТБФ являются *n*-бутан и *n*-бутанол, возникающие в результате радиолитического дебутилирования ТБФ. В свою очередь, в углеводородных растворах ТБФ в составе радиолитических продуктов наблюдаются также алканы C₁–C₈.

При температурах выше 110°C пострадиационный термолиз усиливает образование низкомолекулярных продуктов. Их выход быстро увеличивается с ростом температуры и достигает 16–17 мас% при 170°C (рис. 3). Кроме того, образованию легколетучих соединений способствует повышение соотношения водной и органической фаз в процессе пострадиационного гидролиза с 1 : 1 до 2 : 1 (образец E30/S4/D1/T110/A12/W на рис. 3).

Помимо легколетучих продуктов, облученные смеси содержат также высокомолекулярные соединения (обозначены НН на рис. 1), молекулы которых тяжелее, чем продукты рекомбинации первичных алкильных радикалов с радикалами ТБФ. Образование таких тяжелых продуктов обусловлено реакциями с участием крупных алкильных радикалов, появляющихся в результате присоединения первичных радикалов к двойным связям. Накопление непредельных соединений характерно для радиолиза алканов и обусловлено как прямым действием радиолиза (отщеплением H₂), так и диспропорционированием радикалов [12]. Непредельные продукты также могут участвовать в пострадиационном термостимулируемом образовании высокомолекулярных соединений по ионному механизму, в частности, посредством поликонденсации [10, 13]. Радиолитические превращения разбавителя в отсутствие HNO₃ приводят к образованию продуктов с большей молекулярной массой по сравнению с образцами, предварительно насыщенными азотной кислотой. Вместе с тем, в образцах, не содержащих HNO₃, высокомолекулярных продуктов почти в 2–2.5 раза меньше, чем легколетучих продуктов в образцах, содержащих HNO₃. Среди продуктов фрагментации разбавителя в образцах, предварительно насыщенных HNO₃, присутствуют жирные спирты, эфиры, карбонильные соединения (рис. 1). Их содержание зависит от температуры пострадиационного термолиза – с ростом температуры в интервале 90–110°C их содержание увеличивается, а при более сильном нагреве – уменьшается. Вероятной причиной этого эффекта является термическая нестабильность продуктов, а также их участие в гидролитических реакциях [10]. В необлученной пробе после термолиза при 150°C образуется такое же количество продуктов деградации разбавителя, как и в облученной пробе после термолиза при 90°C (рис. 3).

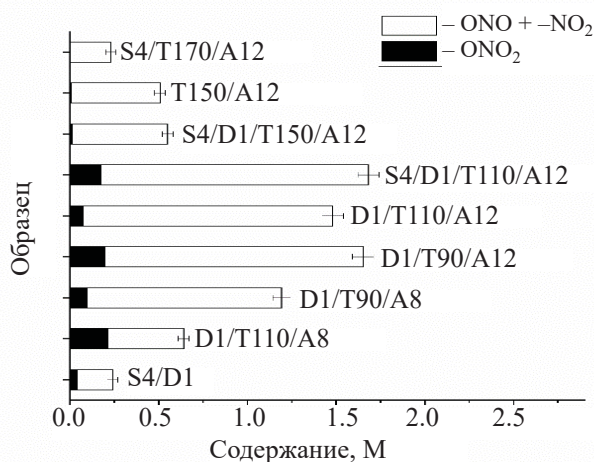


Рис. 4. Содержание продуктов с группами $-\text{NO}_3$ и $-\text{NO}_2$ в исследованных образцах.

По данным хроматографии и ИК спектроскопии, содержание нитросоединений и нитрозоэфиров значительно выше содержания органических нитратов. Нитраты присутствуют преимущественно в облученных растворах (рис. 4) и практически отсутствуют в растворах, подвергнутых термолизу при $150\text{--}170^\circ\text{C}$. В последнем случае наблюдается пониженное содержание нитропроизводных. Таким образом, образующиеся в растворе нитраты и нитропроизводные обладают низкой термической стабильностью. Преобладание нитропроизводных в облученных растворах связано с радиолитическим превращением азотной кислоты в радикал $\bullet\text{NO}_2$ [10] и последующими реакциями $\bullet\text{NO}_2$, как с алкильными радикалами, так и с радикалами ТБФ. Радикал $\bullet\text{NO}_3$ может участвовать в прямом радиолитическом образовании нитратов. Он возникает на начальной стадии радиолиза за счет переноса электрона от нитрата к катион-радикалам [14–16]. Образование нитратов возможно и при взаимодействии $\bullet\text{NO}_2$ с кислородсодержащими продуктами окисления раствора [10].

Сложные эфиры образуются в следовых количествах независимо от условий эксперимента. Рисунок 5 показывает, что образование карбоновых кислот в основном определяется стадией термолиза. Радиолиз вносит незначительный вклад в образование карбоновых кислот, либо карбоновые кислоты разлагаются в радиолитических процессах. Например, в образце E30/S4/D1/T150/A12 наблюдаемый выход карбоновых кислот такой же, как и в необлученных

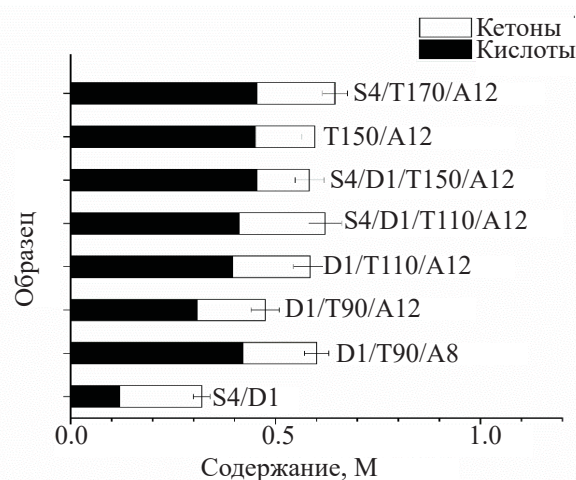


Рис. 5. Влияние условий обработки образцов на содержание кетонов и карбоновых кислот.

образцах E30/T150/A12 и E30/S4/T170/A12 (рис. 5). При термолизе образуется $0.30\text{--}0.46$ моль/л карбоновых кислот независимо от температуры и концентрации HNO_3 . Содержание кетонов мало зависит от условий обработки и последовательности контакта с азотной кислотой и составляет $0.13\text{--}0.21$ моль/л.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования продуктов разложения раствора 30% ТБФ в Изопаре-М под действием γ -радиолиза и последующего термолиза в присутствии $8\text{--}12$ моль/л HNO_3 показали, что корреляции между составом продуктов и условиями обработки определяются конкуренцией многих химических процессов с участием воды, кислоты, изоалканов, ТБФ и продуктов их превращений. Поглощение энергии γ -излучения при комнатной температуре до дозы 1 МГр, а также термолиз до температуры 110°C не приводят к сильному газообразованию. Они почти аддитивно влияют на разложение ТБФ и приводят к образованию практически одних и тех же продуктов. В среднем продукты радиолитической конверсии разбавителя в неподкисленных растворах обладают большей молекулярной массой, чем в пробах, насыщенных азотной кислотой. Кроме того, радиолиз порождает ряд нестабильных продуктов, в первую очередь NO_2 - и NO_3 -производных, менее устойчивых к термолизу по сравнению с ТБФ. При температурах выше 110°C , а также при избытке HNO_3 пострадиационный термолиз уси-

ливаает образование легколетучих продуктов – до 16–17 мас% при 170°C.

Разбавитель участвует в образовании продуктов радиолитической деградации ТБФ и тем самым не проявляет функций радиационной защиты в отсутствие HNO_3 . По сравнению с ТБФ изопарафины являются менее стойкими к действию радикальных продуктов радиолитической азотной кислоты. Как следствие, совместное присутствие кислоты и изопарафинов значительно уменьшает радиолитическую деградацию ТБФ, причем основной вклад в защитный эффект обусловлен присутствием кислоты. Изопар-М, а также продукты его радиолитической деградации довольно восприимчивы к нагреву. В образцах, подвергнутых термолизу при 150°C, содержание разбавителя составляет чуть меньше половины объема раствора, а после нагрева до 170°C доля исходных изопарафинов снижается до 15–20%. Температура вносит основной вклад в гидролитическое образование бутилфосфатов Р1 и Р2, в то время как образование N- и O-содержащих продуктов в основном определяется концентрацией кислоты. Более того, продукты радиолитической конверсии ТБФ более чувствительны к азотной кислоте и температуре, чем исходный ТБФ. Специфическими индикаторами вклада радиолитической конверсии ТБФ в исследованных растворах ТБФ могут служить *n*-бутан (и его гомологи до октана включительно), *n*-бутанол и фосфорсодержащие продукты Р9–Р12, чья концентрация мало зависит от условий термолиза.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Дополнительные материалы для этой статьи доступны по <https://doi.org/10.31857/S0033831122060065> для авторизованных пользователей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Егоров Г.Ф.* Радиационная химия экстракционных систем. М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 206.
2. *Rodin A.V., Skvortsov I.V., Belova E.V., Dvoeglazov K.N., Myasoedov B.F.* // Radiochemistry. 2020. Vol. 62, N 6. P. 723.
3. *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.
4. *Vladimirova M.V., Kulikov I.A., Kuprij A.A.* // At. Energy. 1991. Vol. 70, N 2. P. 111.
5. *Wright A., Paviot-Hartmann P.* // Sep. Sci. Technol. 2010. Vol. 45, N 12–13. P. 1753.
6. *Nash K.L., Madic C., Mathur J.N., Lacquement J.* // The Chemistry of the Actinide and Transactinide Elements. Dordrecht: Springer, 2010. P. 2622.
7. *Mincher B.J., Modolo G., Mezyk S.P.* // Solvent Extr. Ion Exch. 2009. Vol. 27, N 1. P. 1.
8. *Dzhivanova Z., Kadyko M., Smirnov A., Belova E.* // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2019. Vol. 321, N 2. P. 439.
9. *Большакова И.А., Пономарев А.В., Смирнов А.В., Белова Е.В.* // Радиохимия. 2022. Vol. 64, № 6. С. 1.
10. *Serenko Y., Yudin N.V., Gritcenko R.T., Rodin A.V., Belova E.V., Ponomarev A.V.* // Radiat. Phys. Chem. 2021. Vol. 185. 109495.
11. *Shin H.-S., Kim Y.-R., Ponomarev A.V.* // Mendeleev Commun. 2001. Vol. 11, N 1. P. 21.
12. *Metreveli A.K., Ponomarev A.V.* // Radiat. Phys. Chem. 2016. Vol. 124. P. 212.
13. *Vlasov S.I., Kholodkova E.M., Ponomarev A.V.* // High Energy Chem. 2021. Vol. 55, N 5. P. 393.
14. *Balcerzyk A., El Omar A.K., Schmidhammer U., Pernot P., Mostafavi M.* // J. Phys. Chem. A. 2012. Vol. 116, N 27. P. 7302.
15. *Musat R., Denisov S.A., Marignier J.-L., Mostafavi M.* // J. Phys. Chem. B. 2018. Vol. 122, N 7. P. 2121.
16. *Tian M.-K., Tang S.-L., Tang H.-B., Ju X.-H.* // J. Chem. 2020. Vol. 2020. 2012417.