

УДК 544.54

ЗАЩИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ РАДИОЛИЗЕ ПОДКИСЛЕННЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ РАСТВОРОВ ТРИБУТИЛФОСФАТА

© 2022 г. Ю. В. Серенко^а, Е. В. Белова^а, А. В. Пономарев^а, *

^аФГБУН Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Ленинский просп., 31, корп. 4, Москва, 119071 Россия

*E-mail: ponomarev@ipc.rssi.ru

Поступила в редакцию 27.12.2021 г.

После доработки 27.12.2021 г.

Принята к публикации 03.01.2022 г.

Исследовано влияние радиолиза и пост-радиационного кислотного гидролиза на состав продуктов деградации трибутилфосфата (ТБФ, 30 мас. %) в подкисленном Изопар-М. Показано, что одновременное присутствие азотной кислоты и изо-парафинов в облучаемом растворе оказывает защитное действие по отношению к ТБФ. Основные радиолитические продукты обусловлены нитрованием, нитроксилированием и алкилированием ТБФ. При пост-радиационном термоллизе, нитропроизводные и нитраты распадаются с частичной регенерацией ТБФ. Нагрев выше 110°C также провоцирует деалкилирование радиолитических продуктов с образованием легколетучих соединений, что увеличивает пожаро- и взрывоопасность использования облученных экстракционных смесей.

Ключевые слова: трибутилфосфат, радиолиз, гидролиз, термоллиз, продукты

DOI: 10.31857/S0023119322030020

ВВЕДЕНИЕ

Радиационно-химические исследования занимают важное место в выборе экстракционных систем для промышленного разделения радиоизотопов, содержащихся в отработавшем ядерном топливе [1, 2]. Важна не только радиационная стойкость экстрагента и разбавителя, но также термическая, химическая и радиолитическая стабильность накапливающихся продуктов [3]. Основным экстрагентом в PUREX, UREX и COEX процессах служит три-н-бутилфосфат (ТБФ). Его деградация обусловлена совокупностью процессов радиолиза, кислотного гидролиза и термоллиза [4]. Поэтому для определения эффективности экстракции, факторов разделения радиоизотопов и долговечности рециркуляции ТБФ в составе экстракционных систем, нужен широкий набор данных о радиационно-химических и пост-радиационных превращениях ТБФ в зависимости от последовательности и условий контакта с азотной кислотой. Особую важность представляют исследования, связанные с повышением пожаровзрывобезопасности процесса экстракции [5], а также улучшением гидродинамических и экстракционных показателей растворов ТБФ [6].

Одним из перспективных углеводородных растворителей может служить Изопар-М – смесь изопарафинов с диапазоном кипения 208–257°C.

Это коммерчески доступный разбавитель, обладающий повышенной растворяющей способностью в отношении сольватов четырехвалентных актинидов с ТБФ [3]. В настоящей работе исследовано влияние поглощенной дозы ионизирующего излучения и термо-окислительных условий пост-радиационного хранения на механизм превращений и состав экстракционного раствора 30 об. % ТБФ в Изопар-М, насыщенном 3.4–4.0 М HNO₃.

МАТЕРИАЛЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

Реактивы и облучение

Три-н-бутилфосфат (99%, от “ACROS”) очищали от окисляющихся продуктов синтеза путем промывки водным раствором 10 г/дм³ перманганата калия и 15 г/дм³ гидроксида натрия (время контакта 30 мин, соотношение объемов органической и водной фаз 2 : 1). Образующийся осадок MnO₂, удаляли промывкой с водным раствором 15 г/дм³ H₂C₂O₄ и 0.3 М HNO₃ (время промывки 1 ч, соотношение объемов органической и водной фаз 2 : 1). Далее продукт дважды (по 30 мин) промывали равным объемом водного раствора 15 г/дм³ NaOH, а затем дистиллированной водой до нейтральной реакции. Очищенный ТБФ растворяли в Изопар-М (от “ExxonMobil”) в объем-

ном соотношении 3 : 7. Далее образцы насыщали азотной кислотой (водный раствор 3.4 или 4.0 М HNO_3). Проводили три повторных насыщения по 20 мин при равных объемах органической и водной фаз. Облучение проводили при $20 \pm 3^\circ\text{C}$ в стеклянном цилиндрическом сосуде с гидрозатвором, заполненным водным раствором 4 М HNO_3 .

Излучателями служили линейный ускоритель УЭЛВ-10-10-С-70 (энергия электронов 8 МэВ, длительность импульса 6 мкс, частота повторения импульсов 300 Гц, средний ток пучка 700 мкА) или γ -установка РХМ-гамма-20 (НПО РАДОН). Электронный пучок сканировался вдоль вертикальной оси сосуда с частотой 1 Гц. Электронно-лучевое воздействие осуществлялось в прерывистом режиме: интервал облучения до дозы 4.7 ± 0.1 кГр (средняя мощность дозы 0.22 кГр/с) чередовался с интервалом остывания образца в течение 10 мин. Мощность дозы на γ -установке составляла 9.4 ± 0.4 кГр/ч. Для дозиметрии использовали сополимер СО ПД(Ф)Р-5/50 (ГСО 7865-2000).

Гидролиз

Облученные образцы либо подвергались высокотемпературному кислотному гидролизу (при 90 – 170°C , в контакте с 8 или 12 М HNO_3), либо хранились 3 года без доступа света при температуре $+6^\circ\text{C}$ в пробирках с притертыми пробками. Термолиз проводился в течение 6 ч в 300 мл автоклаве с термостатированием. Выпадения осадка, помутнения или расслоения образцов в процессе пост-радиационного хранения не наблюдалось. Для контроля pH состаренных растворов использовался анализатор HANNA HI 98127 РНЕР 4.

Анализ

Анализ группового состава продуктов проводили на ИК-спектрометре IR Prestige-21 (Shimadzu) в однолучевом режиме. Спектры регистрировались с использованием стекол CaF_2 и кюветы со свинцовой прокладкой. Измерения проводились с использованием калибровочных кривых: $-\text{NO}_2$ – 1556 cm^{-1} (2-нитрооктан), $-\text{ONO}_2$ – 1639 cm^{-1} (1-октилнитрат), $-\text{COOH}$ – 1730 cm^{-1} (миристиновая кислота), $-\text{CO}$ – 1721 cm^{-1} (4-метил 2 пентанон), $-\text{COOR}$ – 1740 cm^{-1} (гексиловый эфир масляной кислоты).

Компонентный состав образцов анализировали с помощью газожидкостного хроматографа ThermoScientific Trace 1310 с моноквадропольным анализатором ISQ 8000 (ионизация электронным ударом, 70 эВ) и колонкой Thermo (TG-5MS, $15 \text{ м} \cdot 0.25 \text{ мм}$) с соотношением полидифенилсилоксан : полидиметилсилоксан = 5 : 95. Температура испарителя составляла 275°C , нагрев термо-

стата – от 50 до 320°C , объем пробы 0.5 мкл. Пробы предварительно нейтрализовывались гидрокарбонатом натрия. Идентификацию продуктов проводили по масс-спектрам и индексам удерживания с использованием программ NIST MS Search 2.3 (2017) и ThermoXcalibur 2.2. Обозначения и строение зарегистрированных фосфорсодержащих продуктов приведены в табл. 1, где Bu , R_1 , R_2 и R_3 соответствует бутильной и более тяжелым алкильным группам.

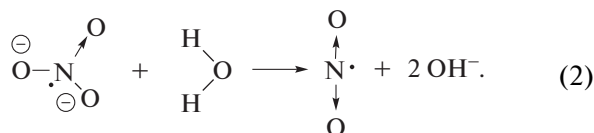
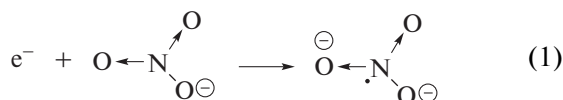
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Радиолиз свежего экстракционного раствора приводит к изменению компонентного состава (рис. 1) и небольшому повышению плотности (от 0.849 до 0.862 кг дм^{-3} при 2 МГр). Как при электронно-лучевой обработке (рис. 1а), так и при γ -радиолизе (рис. 1б), доминирующими продуктами являются органические нитропроизводные. Причем их концентрация мало меняется в пост-радиационных процессах (рис. 1в). При дозах до 0.5 МГр радиационно-химические выходы накопления нитропроизводных ($-\text{NO}_2$) и нитратов ($-\text{NO}_3$) максимальны (до 0.3 мкмоль/Дж). Более высокие дозы снижают эти выходы (до 0.06–0.09 и 0.01 мкмоль/Дж для продуктов нитрования и нитроксилирования соответственно). Также возникает карбоновые кислоты и карбонильные соединения. Прирост их содержания наиболее существенен при дозах выше 0.5 МГр (до 0.03–0.05 мкмоль/Дж). В следовых количествах появляются сложные эфиры. Содержание карбоксильных и карбонильных соединений продолжает увеличиваться и во вторичных, пост-радиационных, процессах.

Длительное хранение также влияет на состав образцов, прежде всего, на содержание нитратов (рис. 1в). Их пост-радиационному накоплению способствует высокая остаточная концентрация азотной кислоты и, соответственно, низкое значение pH (рис. 2). Нитраты возникают преимущественно в облученных растворах и малозаметны в растворах, избежавших облучения. Низкое содержание нитратов наблюдается также в образцах, облученных при 1 МГр и подвергнутых последующему термолизу при $>110^\circ\text{C}$ (табл. 2). В этих же образцах, наблюдается пониженное содержание нитропроизводных. Ключевой причиной служит низкая термическая стабильность органических нитратов и нитропроизводных, формируемых в процессе радиолиза, хотя при комнатной и более низкой температуре эти соединения сравнительно стабильны.

Эффективное расходование HNO_3 обусловлено, в частности, быстрыми, диффузионно-контролируемыми реакциями со свободными электронами, возникающими при ионизации всех

компонентов раствора [7]. Причем электроны захватываются как ионами H^+ , так и нитратом. В реакции электрона с H^+ образуется менее реакционноспособный радикал $\cdot H$. В свою очередь, реакция электрона с нитратом дает $\cdot NO_2$



Расходование H^+ в реакции с электроном и OH^- приводит к росту pH и, соответственно, к ослаблению пост-радиационного кислотного гидролиза. Электроны являются наиболее сильными восстановителями. Эффективный захват электронов в первичных радиолитических процессах с кислотой обуславливает снижение вероятности их дальнейшего участия в деградации ТБФ. Однако нитрат также расходуется в реакциях с катион-радикалами ($\cdot R^+$) ТБФ и Изопар [7]

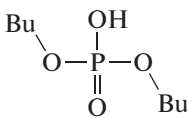
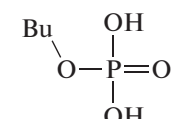
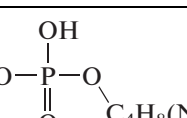
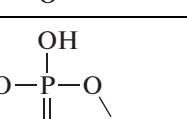
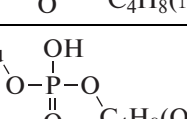
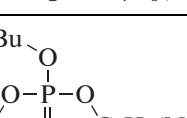
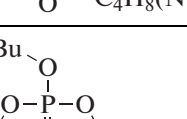
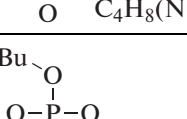
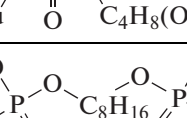
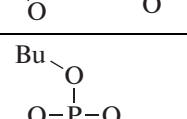
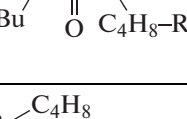
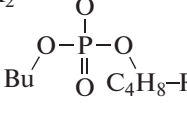


Естественно, реакции (1)–(3) ослабляются с ростом поглощенной дозы, т.е. по мере убыли концентрации нитрата-иона.

По сравнению с электроном, радикал $\cdot H$ восстанавливает нитрат гораздо медленнее [8]. Однако, он также вносит заметный вклад в конверсию нитрата до $\cdot NO_2$ [9], тем самым способствуя последующему доминированию нитрования над нитроксилированием. Но большинство радикалов $\cdot H$ гибнет в реакциях отрыва водорода от алкильных групп ТБФ и компонентов Изопар. Следствием H-отрыва является образование широкого ассортимента более громоздких свободных радикалов алкильного типа. Мобильность $\cdot NO_2$ и $\cdot O-\text{NO}_2$ обеспечивает им активное участие в рекомбинации с радикалами алкильного типа. В случае локализации радикальных центров на бутильных группах ТБФ, продуктами рекомбинации являются P3, P4, P6 и P7. Соответственно, легкие радикалы $\cdot NO_2$ и $\cdot O-\text{NO}_2$ снижают вероятность рекомбинации алкильных радикалов между собой. В частности, табл. 2 демонстрирует, что по сравнению с неподкисленным образцом, радиолитический предварительно подкисленный раствор дает больше P1, P2 и P8, однако выход алкилированных продуктов P10–P12 уменьшается до 4 раз.

Благодаря накоплению радиолитических продуктов, содержание ТБФ и Изопар в неподкисленном растворе при дозе 1 МГр снижается с 36 до 22 и с 64 до 56 мас. % соответственно. В свою очередь, остаточное содержание ТБФ и Изопар

Таблица 1. Продукты деградации ТБФ

P1	
P2	
P3	
P4	
P5	
P6	
P7	
P8	
P9	
P10	
P11	
P12	

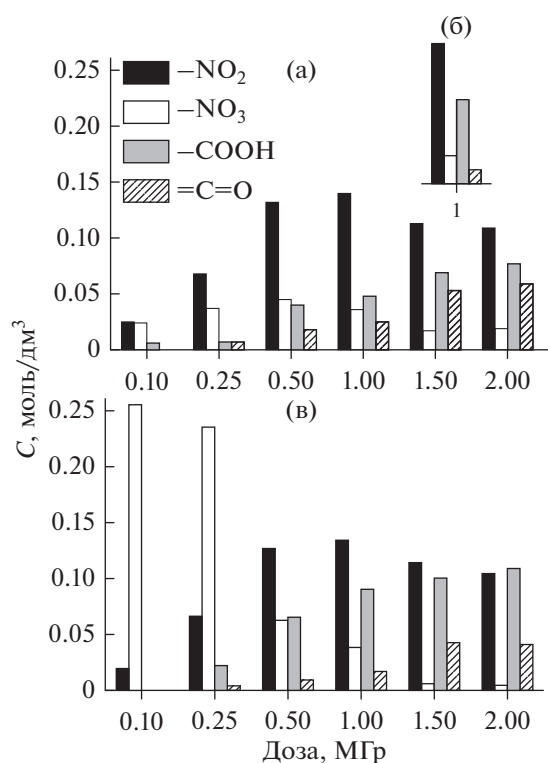


Рис. 1. Зависимость группового состава продуктов радиолитического разложения от дозы для свежих образцов при облучении электронным пучком (а) и γ -излучением (б), 1 МГр), а также состаренных (в) экстракционных растворов после облучения электронным пучком. Для γ -излучения дано относительное содержание фракций.

при радиолитическом разложении подкисленного раствора составляет около 29 и 54 мас. % соответственно. Следовательно, в присутствии HNO_3 радиолитическая деградация ТБФ ослабляется, а разложение Изопар

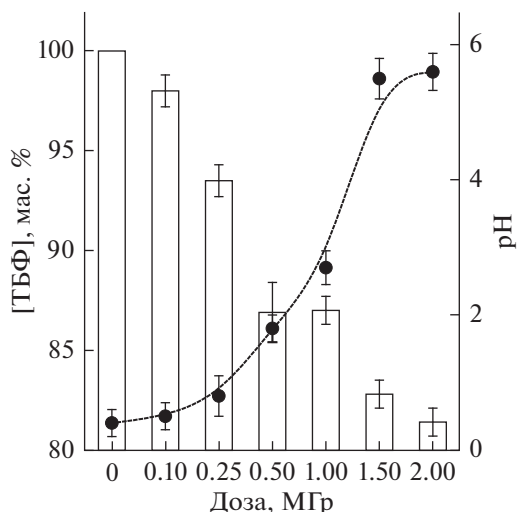


Рис. 2. Влияние поглощенной дозы на pH и содержание ТБФ в состарившихся образцах.

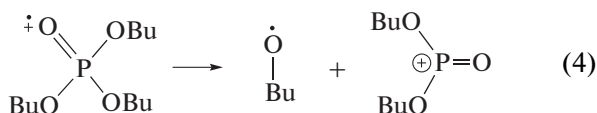
несколько усиливается. Это означает, что реакции $\cdot\text{NO}_2$ и $\cdot\text{O}-\text{NO}_2$ с алкильными радикалами, возникающими из Изопар, более конкурентоспособны, чем с радикалами из ТБФ. Таким образом, в присутствии HNO_3 , компоненты Изопар осуществляют защиту ТБФ от радиолитической деградации.

При старении и термостимулируемом гидролизе, содержание ТБФ изменяется сравнительно мало. Даже после 3 лет хранения, наблюдается почти пропорциональная зависимость концентрации ТБФ от дозы (рис. 2). Это указывает, что главным фактором деградации ТБФ является радиолитическая деградация. Благодаря высокой исходной концентрации ТБФ, образование его возбужденных молекул и катион-радикалов может происходить как по механизму прямого действия излучения,

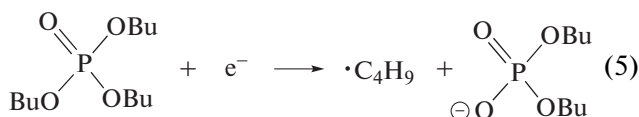
Таблица 2. Содержание продуктов в растворе 30% ТБФ в Изопар-М при дозе γ -облучения 1 МГр в зависимости от условий обработки, где $[\text{HNO}_3]_0$ – концентрация азотной кислоты при предварительном насыщении, t и $[\text{HNO}_3]_T$ – температура и концентрация азотной кислоты при пост-радиационном гидролизе

$[\text{HNO}_3]_0$, М	–		4		–		
t , °С	–	–	110	150	90	90	110
$[\text{HNO}_3]_T$, М	–	–	12	12	8	12	12
Продукт	С, мас. %						
P1	2.2	5.1	4.0	4.6	4.4	3.2	3.7
P2	0.05	0.23	0.17	0.22	0.14	0.03	0.15
P3	0	3.5	0.28	0.35	0.14	0.11	0.19
P6	0	7.8	1.54	1.14	0.75	0.5	0.71
P7	0	4.0	0.49	0.29	0.24	0.11	0.25
P8	0.12	4.1	0.35	0.1	0.1	0.17	0.12
P9	0.05	0.08	0.8	0.76	1.1	0.86	0.8
P10–P12	14.2	3.55	11.7	13.02	21.0	19.9	18.2

так и в результате переноса избыточной энергии и заряда от компонентов углеводородного разбавителя. В катион-радикале ТВФ положительный заряд и неспаренный электрон равномерно распределяются по трем атомам кислорода, соединяющим атомы фосфора и углерода, с небольшим участием связей С–С и атомов углерода в α-положении [7]. Это делает вероятным разрыв связи Р–О с элиминированием бутокси-радикала



Нейтрализация остаточного катиона ионом ОН⁻ приводит к образованию стабильного Р1. Распад возбужденных молекул ТВФ может приводить как к отщеплению бутил-, так и бутокси-радикалов. Образование анион-радикала происходит в результате захвата электрона молекулой ТВФ, однако роль этого процесса мала из-за преимущественного захвата электронов азотной кислотой. В анион-радикале отрицательный заряд локализован на кислороде, а радикальный центр на атоме фосфора. Происходит значительное ослабление связей Р–О и С–О, что облегчает удаление бутокси- или бутил-радикала, однако образование бутокси-радикала более вероятно [7]



Нейтрализация катион-радикалов и анион-радикалов ТВФ может служить важным источником Р1:

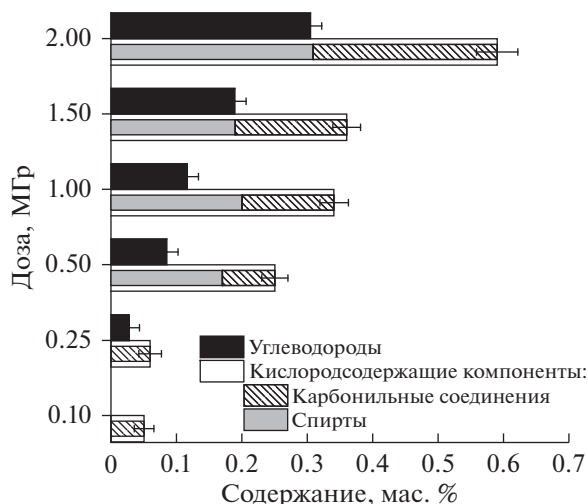
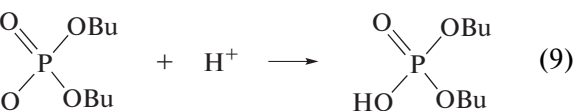
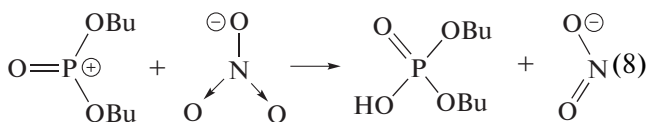
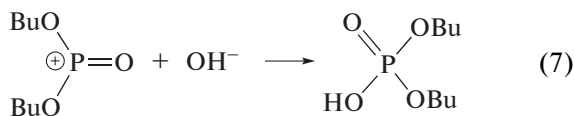
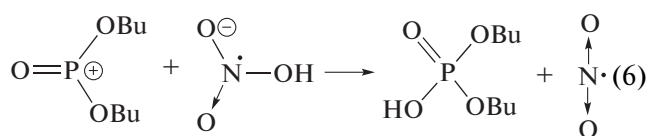
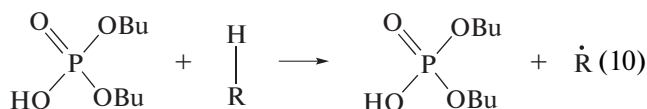


Рис. 3. Влияние дозы на содержание легких органических продуктов (легче октана) в состарившихся образцах.

Другой путь образования Р1 реализуется при взаимодействии алкокси-радикалов, получаемых при радиолитическом дебутилировании ТВФ, с углеводородными молекулами (R–H)



Бутокси радикал, образуемый, например, в реакции (4), подобно другим алкокси радикалам [10, 11], обладает способностью отрывать H атом от алкильных групп. Соответственно, бутокси радикал служит главным предшественником 1-бутанола, доминирующего среди легких продуктов радиолитиза. Доля 1-бутанола среди совокупности легких спиртов составляет не менее 90 мас. %, а средний наблюдаемый выход, измеренный в состарившемся растворе – 0.015 ± 0.005 мкмоль/Дж. Хотя фракции карбонильных соединений, спиртов и углеводородов сопоставимы между собой (рис. 3), доля 1-бутанола от 3 до 16 раз выше, чем любого другого легкого продукта. Среди сравнительно легких алканов в облученных образцах доминирует н-октан. Очевидно, он представляет собой продукт димеризации бутильных радикалов, возникающих, в частности, в реакции (2). Н-октан и бутанол образуются только на стадии радиолитиза, т.е. в радикальных процессах. В свою очередь, пост-радиационный гидролиз образует кислоты и этилбензол, количество которых монотонно увеличивается с повышением температуры в диапазоне 110–170°C. Соответственно, н-бутанол и н-октан могут служить индикаторами вклада радиолитиза

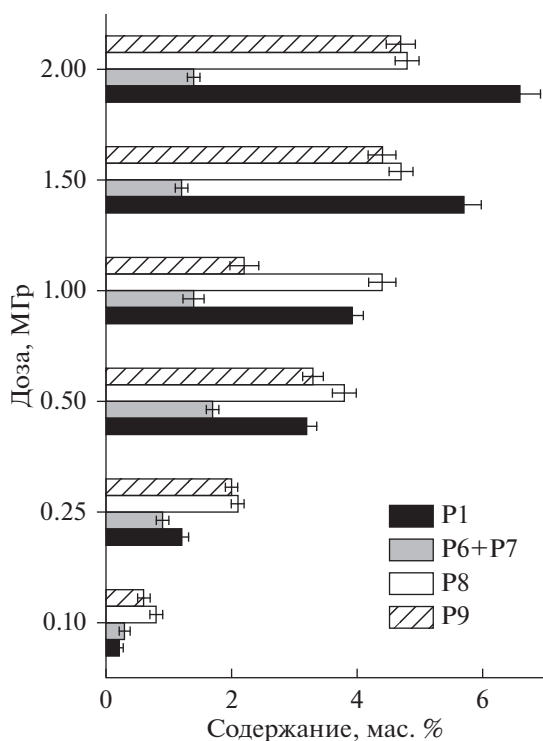


Рис. 4. Влияние поглощенной дозы на содержание фосфор-содержащих продуктов P1, P6–P9 в состарившихся образцах.

за, а ксилолы и этилбензол — вклада термоллиза, в суммарное разложение исследованных растворов.

Наряду с радикалами $\cdot\text{H}$, в образовании алкильных радикалов могут участвовать другие легкие радикалы, в частности, $\cdot\text{CH}_3$ и $\cdot\text{OH}$, а также алкокси радикалы. Образование $\cdot\text{H}$ и $\cdot\text{CH}_3$ неизбежно при радиоллизе алканов, входящих в состав Изопар-М [12]. В свою очередь, радикалы $\cdot\text{OH}$ могут возникать при прямом и косвенном действии излучения на растворенную воду или спирты. Н-отрыв возможен в различных положениях молекулы алкана или бутильной группы ТБФ [12, 13]. Например, при распаде возбужденных молекул ТБФ, отщепление вероятнее всего происходит в γ -положении относительно атома кислорода [14]. Разнообразие строения алкильных радикалов, соответственно, приводит к разнообразию продуктов их рекомбинации (табл. 1, рис. 5). Очевидно, радикальные продукты Н-отрыва от бутильных групп молекул дибутилфосфата, являющиеся предшественниками P3–P5, а радикал ($\cdot\text{TBP}$), сформированный Н-отрывом от ТБФ, — предшественником продуктов P6–P12. Выход радикалов $\cdot\text{NO}_2$ существенно выше, чем $\cdot\text{NO}_3$ и, поэтому, доля нитропроизводных выше, чем доля нитратов (рис. 2а). В свою очередь, из-за преобладания ТБФ над P1, доля P6 и P7 в продуктах нитрования от 4 до 7 раз выше, чем доля P3 и P4. Фракция продуктов P3–P5 в соста-

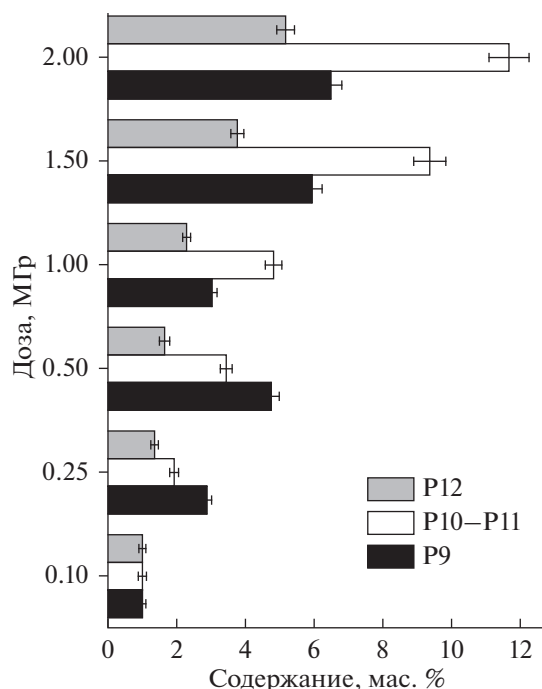
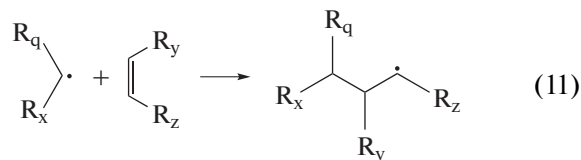


Рис. 5. Влияние дозы на содержание фосфорсодержащих продуктов P9–P12 в состарившихся образцах.

рившихся образцах относительно невелика — 0.2–0.4 мас. % для P3 + P4 и 0.2% для P5.

Продукт P9 (рис. 4 и 5), очевидно, образуется в результате димеризации $\cdot\text{TBP}$. Другие высокомолекулярные продукты формируются несколькими путями. В частности, радиолиз Изопар-М служит источником непредельных углеводородов, которые участвуют в образовании P10–P12 (рис. 5). Присоединение короткого алкильного радикала к алкену дает более длинный алкильный радикал [8, 12], например



где длина радикалов (q, x, y и z) может быть различной, прежде всего, из-за разнообразия углеводородных компонентов в Изопар-М. Удлинение углеводородного скелета может также происходить в результате ион-молекулярного взаимодействия — присоединения первичного карбокатиона к молекуле алкена с последующей нейтрализацией удлиненного карбокатиона. Процесс образования P10–P12 может быть длительным из-за сравнительно низкой скорости укрупнения радикалов и затрудненной комбинации громоздких радикалов

друг с другом. Во фракции алкил-бутилфосфатов P10 и P11 (m/z 379–564) доминируют соединения, где добавленная алкильная группа содержит 14–15 атомов С. Среди димеров P12 (m/z 600–1000) преобладают соединения с молярной массой 740–780. Независимо от поглощенной дозы, общая доля тяжелых фосфорсодержащих продуктов P9–P12 в состаренных образцах составляет $31 \pm 4\%$ от суммы всех фосфорсодержащих продуктов.

Естественно, радиолитическая деградация азотной кислоты оказывает ключевое влияние на эффективность пост-радиационных гидролитических процессов. В частности, гидролиз вносит основной вклад в образование P5 и P8. При дозе 1 МГр и выше, когда рН раствора во много раз выше, чем в необлученном образце, гидролиз мало меняет соотношение между продуктами, достигнутое на стадии радиолитического разложения. Однако при более низких дозах (рис. 1), а также при повышении температуры и добавлении кислоты на пост-радиационной стадии (табл. 2), гидролиз эффективен. Причем, высокотемпературный кислотный гидролиз при $>110^\circ\text{C}$ приводит к эффективному разложению радиолитических нитропроизводных и нитратов, в том числе, к частичной регенерации ТБФ. В облученных образцах без стадии последующего термолиза обнаруживается около 1–1.5 мас. % легколетучих продуктов, включая н-бутан, н-октан и н-бутанол. В свою очередь, при температурах выше 110°C , пост-радиационный термолиз приводит к росту выхода легколетучих продуктов – вплоть до 16–17 мас. % при 170°C . Важную роль в этом эффекте играют процессы деалкилирования компонентов облученного раствора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Радиолитическая деградация ТБФ в его подкисленных смесях с алканами складывается из множества процессов, в которых активное участие принимают все компоненты раствора. Определяющее значение играют реакции азотной кислоты первичными продуктами ионизации – электронами и катион-радикалами. Тем самым, снижается вероятность реакций этих первичных интермедиатов с ТБФ. Кроме того, радикалы $\cdot\text{NO}_2$ и $\cdot\text{O}-\text{NO}_2$ рекомбинируют с алкильными радикалами, образуемыми из Изопар-М, что также ослабляет воздействие на ТБФ. При этом реакции радикалов $\cdot\text{NO}_2$ и $\cdot\text{O}-\text{NO}_2$ с радикалами ТБФ приводят к образованию нестабильных нитро- и нитрокси- производных ТБФ, которые склонны к распаду при нагреве с частичной регенерацией ТБФ. В отсутствие кислоты, разбавитель более эффективно участвует в образовании продуктов радиолитической деградации ТБФ и, тем самым, не проявляет функций радиационной защиты. Однако совмест-

ное присутствие кислоты и разбавителя значительно уменьшает радиолитическую деградацию ТБФ, причем основной вклад в защитный эффект связан с присутствием кислоты.

Дебутилирование ТБФ с образованием кислых фосфатов P1 и P2 происходит как в результате радиолитического, так и в результате гидролитического разложения. Причем по мере роста дозы, пост-радиационные гидролитические процессы приобретают малое значение по сравнению с радиолитическими процессами. Пост-радиационный нагрев образцов способствует гидролитическому образованию бутилфосфатов P1 и P2, в то время как образование N-содержащих продуктов и оксигенатов в основном определяется концентрацией кислоты. Более того, продукты радиолитической конверсии ТБФ более чувствительны к нагреву, чем исходный ТБФ. Образование дибутилового эфира, ксилолов и этилбензола может служить специфическим индикатором вклада термолиза в разложение раствора. Индикаторами относительного вклада радиолитического разложения в подкисленных, так и в нейтральных растворах ТБФ, могут служить н-бутан, н-бутанол, н-октан и фосфорсодержащие продукты P9–P12.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Центру Коллективного Пользования физико-химическими методами исследования ИФХЭ РАН за предоставленное оборудование.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственной темы АААА-А18-118011190130-0.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pearson J., Nilsson M. // Solvent Extraction and Ion Exchange. 2014. Т. 32. С. 584. <https://doi.org/10.1080/07366299.2014.924305>
2. Aneheim E., Ekberg C., Fermvik A., Foreman M., Grüner B., Hájková Z., Kvičalová M. // Solvent Extraction and Ion Exchange. 2011. Т. 29. С. 157. <https://doi.org/10.1080/07366299.2011.539462>
3. Dzhivanova Z., Kadyko M., Smirnov A., Belova E. // J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2019. Т. 321. С. 439. <https://doi.org/10.1007/s10967-019-06593-8>
4. Peterman D., Mincher B., Riddle C., Tillotson R. // Office of Scientific and Technical Information (OSTI) (10.2172). 2010. <https://doi.org/10.2172/993164>
5. Belova E., Egorov G., Nazin E. // Radiochemistry. 2000. V. 42. P. 238.
6. Mincher B., Modolo G., Mezyk S. // Solvent Extraction and Ion Exchange. 2009. V. 27. P. 1. <https://doi.org/10.1080/07366290802544767>
7. Serenko Yu.V., Yudin N.V., Gritchenko R.T., Rodin A.V., Belova E.V., Ponomarev A.V. // Radiat. Phys. Chem.

2021. V. 185. P. 109495.
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109495>
8. Woods R., Pikaev A. // *Applied Radiation Chemistry. Radiation Processing*. Wiley, N.Y. 1994.
9. Ponomarev A.V., Bludenko A.V., Makarov I.E. // *Mendeleev Communications*. 2002. V. 12. P. 92.
<https://doi.org/10.1070/MC2002v012n03ABEH001583>
10. Ponomarev A.V., Vlasov S.I., Kholodkova E.M. // *High Energy Chem*. 2019. V. 53. P. 314.
<https://doi.org/10.1134/S0018143919040106>
11. Ponomarev A.V., Vlasov S.I., Kholodkova E.M., Chulkov V.N., Bludenko A.V. // *Radiat. Phys. Chem*. 2019. V. 165. P. 108405.
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108405>
12. Metreveli A.K., Ponomarev A.V. // *High Energy Chem*. 2016. V. 50. P. 254.
<https://doi.org/10.1134/S0018143916040135>
13. Lesage D., Virelizier H., Jankowski C.K. // *Spectroscopy*. 1997. V. 13. P. 275.
<https://doi.org/10.1155/1997/565194>
14. Wang F., Horne G.P., Pernot P., Archirel P., Mostafavi M. // *J. Phys. Chem. B*. 2018. V. 122. P. 7134.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b03715>