

УДК 541(64+15)

РАДИАЦИОННО-ХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ТЕЛОМЕРОВ ТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА ВО ФТОРИРОВАННЫХ БЕНЗОЛАХ И ВЛИЯНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ИХ МОЛЕКУЛЯРНУЮ СТРУКТУРУ

© 2024 г. Г. А. Кичигина¹*, П. П. Куш¹, Ю. М. Шульга¹,
Е. Н. Кабачков¹, Д. П. Кирюхин¹

¹ФГБУН Федеральный исследовательский центр проблем химической физики
и медицинской химии РАН, Черноголовка, Россия

*E-mail: kga@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 02.02.2024 г.

После доработки 03.06.2024 г.

Принята к публикации 03.06.2024 г.

Исследована радиационно-инициированная теломеризация тетрафторэтилена в пентафторхлорбензоле, пентафторбромбензоле и гексафторбензоле. Показано, что эффективность процесса и длина цепи образующихся теломеров зависят от энергии связи заместителя во фторированном бензольном кольце. Анализ ИК-спектров показал, что под действием гамма-излучения происходят изменения молекулярной структуры теломеров, выражающиеся в отрыве концевых бензольных колец и образовании концевых карбоксильных групп. Помимо этого, наблюдается разрушение полимерной цепи, приводящее к образованию теломеров с меньшей длиной цепи. Гидрофобные свойства образцов всех облученных теломеров сохраняются.

Ключевые слова: теломеры тетрафторэтилена, гамма-излучение, ИК-спектроскопия

DOI: 10.31857/S0023119324050062 EDN TXQWCB

ВВЕДЕНИЕ

При воздействии излучения (электронное, гамма-излучение, лазерное) на политетрафторэтилен (ПТФЭ) в различных условиях наблюдаются существенные изменения его физических свойств, образование модифицированных форм [1–4]. Как правило, внешние воздействия не приводят к полному разрушению полимерной цепи, но при этом наблюдаются изменения на молекулярном уровне, образуются радикалы, появляются разветвления и новые концевые группы. Эти изменения находят свое отражение в ИК-спектрах облученного полимера, регистрируется появление новых полос поглощения, которые могут быть отнесены к образующимся группам ($-\text{CF}=\text{CF}_2$, $-\text{COOH}$, $>\text{C}=\text{CF}_2$ и др.) [5–9].

Теломеры тетрафторэтилена (ТФЭ) $\text{R}_1(\text{C}_2\text{F}_4)_n\text{R}_2$ (R_1 и R_2 – фрагменты молекул растворителя, n – длина цепи) по своему строению, свойствам и перспективам их использования схожи с ПТФЭ,

но имеют существенно меньшую длину цепи и концевые группы, отличные от таковых в ПТФЭ [10]. Возникает вопрос, каким образом гамма-излучение влияет на их молекулярную структуру? В работе [11] методом ИК-спектроскопии исследовано влияние гамма-излучения на гидрофобные покрытия алюмоборосиликатной стеклоткани, полученные из растворов радиационно-синтезированных теломеров ТФЭ, имеющих различные длину цепи и концевые группы. Показано, что под действием облучения в воздушной среде наблюдается ухудшение гидрофобных свойств теломерных покрытий, обусловленное, по нашему мнению, образованием карбоксильных ($-\text{COOH}$) концевых групп.

В данной работе получены радиационно-синтезированные теломеры ТФЭ в ряде фторированных (гексафторбензол, пентафторхлорбензол, пентафторбромбензол) бензолов, проведен сравнительный анализ их реакционной способности и средней длины цепи в зависимости от заместителя

в бензольном кольце. Методом ИК-спектроскопии исследовано влияние гамма-излучения на молекулярную структуру полученных теломеров ТФЭ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для радиационного синтеза теломеров ТФЭ использованы тетрафторэтилен (C_2F_4 , ТФЭ) производства ООО “Завод полимеров Кирово-Чепецкого химического комбината” и растворители: гексафторбензол (C_6F_6 , ГФБ), пентафторхлорбензол (C_6F_5Cl , ПФХБ), пентафторбромбензол (C_6F_5Br , ПФББ) фирмы Sigma-Aldrich. Синтез теломеров ТФЭ проводился в запаянных стеклянных ампулах (~5 мл). Образцы для исследований готовились по стандартной методике: в стеклянную ампулу помещали определенное количество растворителя, освобождали от растворенного воздуха и при 77К намораживали необходимое количество ТФЭ, ампулу запаивали. Далее систему перемешивали и подвергали γ -облучению при комнатной температуре. Исходная концентрация ТФЭ в растворах телогенов составляла 0.8 моль/л. Радиолит образцов проводили γ -лучами ^{60}Co на УНУ “Гамма-100”, мощность дозы облучения 3.2 Гр/с.

Выход теломеров определяли гравиметрически после удаления растворителя из реакционной смеси. Облучение полученных образцов сухих теломеров γ -лучами ^{60}Co проводили в воздушной среде, суммарные дозы облучения 300 и 600 кГр.

ИК-спектры нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) регистрировали при комнатной температуре в диапазоне 450–4000 cm^{-1} на ИК-Фурье-спектрометре Perkin Elmer Spectrum Two с приставкой НПВО. Для регистрации ИК-спектров использовали порошки сухих теломеров, полученные после удаления растворителя.

Для измерения угла смачивания θ поверхности водой проводился анализ контура сидящей капли на приборе OCA 20 (Data Physics Instruments GmbH, Филдшерштадт, Германия) при комнатной температуре. Результаты обрабатывались по методу Юнга–Лапласа с учетом физических свойств сидящей капли и криволинейной поверхности границы раздела жидкости в программном обеспечении модуля SCA 20 Data Physics Instruments.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования радиационно-инициированной теломеризации ТФЭ, проведенные ранее [10], показали, что эффективность реакции и свойства теломеров (скорость, выход теломера, длина цепи и др.) существенно зависят не только от исходных параметров проведения процесса (концентрация

мономера, доза облучения), но и химической природы растворителя и растворимости в нем мономера. Наиболее эффективно процесс протекает во фторсодержащих растворителях, что обусловлено растворимостью в них тетрафторэтилена. В работе [12] была исследована теломеризация ТФЭ в ряде замещенных бензолов и показано, что эффективно процесс протекает только в пентафторхлорбензоле и перфторксилале, где выход теломера близок к 100%.

В данной работе впервые синтезированы теломеры ТФЭ в гексафторбензоле и пентафторбромбензоле. Проведен сравнительный анализ процесса теломеризации ТФЭ в ряду ГФБ, ПФХБ и ПФББ, отличающимся одним заместителем в бензольном кольце, в зависимости от дозы облучения (табл. 1). Под действием излучения во всех использованных растворителях образуются, с большой долей вероятности, теломеры с общей формулой $R_1(C_2F_4)_nR_2$, где R_1 и R_2 C_6F_5 и Cl , Br или F соответственно.

Таблица 1. Зависимость выхода теломеров ТФЭ от дозы γ -облучения

№ п/п	Телоген	Доза, кГр	Выход, %	Доза повторного облучения, кГр
1	ПФХБ	10	29.1	600
2	ПФХБ	50	81.6	300
3	ПФББ	10	47.6	600
4	ПФББ	50	95.8	300
5	ГФБ	50	19.8	300
6	ГФБ	100	34.6	600

Анализ полученных результатов показывает, что наиболее эффективно процесс протекает в ПФББ (№ 4), где при дозе 50 кГр выход теломера близок к 100%. Это связано с энергиями разрыва связи соответствующего галогена с бензольным кольцом, которые составляют 328, 392 и 510 кДж/моль для связей $C-Br$, $C-Cl$ и $C-F$ [13]. С увеличением прочности связи углерод–галоген, при одинаковой дозе облучения выходы теломеров различаются кардинально (95.8% для № 4 и 19.8% для № 5). Различны не только выходы теломеров, но и их свойства, в частности средняя длина цепи.

Об относительной средней длине цепи полученных теломеров определенную информацию можно получить из ИК-спектров теломеров (рис. 1). Спектры всех теломеров в целом идентичны. Наиболее интенсивные полосы поглощения (ПП) наблюдаются при 1147 ± 1 и 1204 ± 1 cm^{-1} , имеется также ряд ПП в области 500–800 cm^{-1} . Все они относятся к колебаниям тетрафторэтиленовой цепи теломеров [14]. Помимо этих полос регистрируются ПП концевых групп. Сравнение спектров

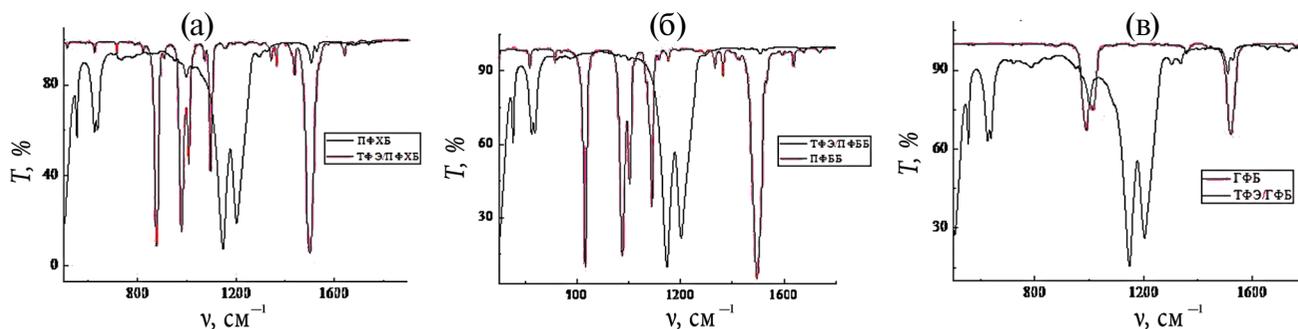


Рис. 1. ИК-спектры необлученных теломеров ТФЭ и фторированных бензолов.

теломеров и соответствующих растворителей показывает, что в их спектрах наблюдаются ПП бензольных колец, подтверждающие их вхождение в состав теломеров в качестве концевых групп. В частности, наблюдаются деформационные колебания C–F кольца при 998 см^{-1} (ТФЭ/ПФХБ) и 1001 см^{-1} (ТФЭ/ПФББ и ТФЭ/ГФБ), а также скелетные колебания кольца при 1506 и 1507 см^{-1} (ТФЭ/ПФХБ и ТФЭ/ПФББ) и двойная ПП $1511, 1528\text{ см}^{-1}$ в спектре ТФЭ/ГФБ. Все частоты колебаний концевых групп отличаются от таковых в растворителях, что обусловлено их вхождением в состав теломеров. Отметим, что в спектрах теломеров отсутствуют ПП растворителей 878 см^{-1} (ТФЭ/ПФХБ, рис. 1а), 833 см^{-1} (ТФЭ/ПФББ, рис. 1б) и 989 см^{-1} (ТФЭ/ГФБ, рис. 1в). По-видимому, это связано с отрывом соответствующих атомов галогенов от кольца и вхождением их в состав теломера в качестве второй концевой группы. В спектрах теломеров наблюдаются слабые полосы 720 см^{-1} (ТФЭ/ПФББ), 736 см^{-1} (ТФЭ/ПФХБ) и 787 см^{-1} (ТФЭ/ГФБ), которые с большой вероятностью можно отнести к валентным колебаниям связей Br, Cl или F с углеродом теломерной цепи.

Оценка отношения интенсивностей ПП концевых групп в области 1500 см^{-1} к интенсивности полосы валентного колебания C–F цепи с частотой $1147 \pm 1\text{ см}^{-1}$ позволяет оценить относительную длину цепи в ряду образовавшихся теломеров. Так для образцов теломеров, синтезированных при одинаковой концентрации ТФЭ (0.8 моль/л) и дозе облучения 50 кГр , получены следующие значения: ТФЭ/ГФБ (№ 5) $I_{1511}/I_{1148} = 0.134$; ТФЭ/ПФХБ (№ 2) $I_{1506}/I_{1148} = 0.11$; ТФЭ/ПФББ (№ 4) $I_{1507}/I_{1147} = 0.048$. Чем больше это отношение, тем, соответственно, больше содержание концевых бензольных групп в теломере, тем меньше длина цепи. Отсюда можно сделать вывод, что по средней длине цепи n теломеры можно расположить в такой последовательности: ТФЭ/ГФБ < ТФЭ/ПФХБ < ТФЭ/ПФББ, т. е. чем медленнее идет процесс, тем меньше длина

цепи. Для теломеров ТФЭ/ПФХБ, изученных ранее в работе [12], был проведен элементный анализ на содержание хлора и по его значению оценена средняя длина цепи в зависимости от концентрации ТФЭ. При увеличении исходной концентрации ТФЭ от 0.55 до 2.29 моль/л средняя длина цепи увеличивается от 50 до 160 звеньев ТФЭ. В нашем случае среднюю длину цепи теломеров ТФЭ/ПФХБ можно оценить приблизительно в $60–70$ звеньев ТФЭ.

Аналогичная картина наблюдается и для теломеров, синтезированных при других предварительных дозах облучения: ТФЭ/ГФБ (№ 6) $I_{1511}/I_{1148} = 0.1598$; ТФЭ/ПФХБ (№ 1) $I_{1506}/I_{1148} = 0.051$, ТФЭ/ПФББ (№ 3) $I_{1507}/I_{1147} = 0.0306$. Сравнение результатов для двух доз облучения для каждого из растворителей (№ 1 и 2, 3 и 4, 5 и 6) показывает, что чем выше доза предварительного облучения, тем меньше средняя длина цепи теломера.

Таким образом анализ ИК-спектров позволил сделать выводы о молекулярной структуре теломеров, а именно, о вхождении бензольных колец и соответствующих галогенов (Br, Cl или F) в состав теломеров, а также оценить относительную длину цепи теломеров, полученных в ряду ГФБ, ПФХБ и ПФББ.

Для изучения влияния гамма-излучения на молекулярную структуру теломеры (сухие порошки), полученные при дозе 50 кГр , были повторно облучены дозой 300 кГр (№ 2, 4, 5), а остальные (№ 1, 3, 6) дозой 600 кГр (табл. 1). На рис. 2 для примера приведен спектр необлученного теломера ТФЭ/ПФХБ (№ 2, табл. 1) и его же спектр после облучения дозой 300 кГр .

Сравнение полученных спектров показывает, что под действием излучения в спектре теломера появляется ПП в области 1759 см^{-1} , наблюдается изменение относительных интенсивностей ПП концевых групп. Такие изменения фиксируются в спектрах всех изученных теломеров, появляются ПП 1757 см^{-1} (№ 4, ТФЭ/ПФББ) и 1760 см^{-1} (ТФЭ/ГФБ, № 5). ИК-спектры всех теломеров, облученных дозой 300 кГр , приведены на рис. 3.

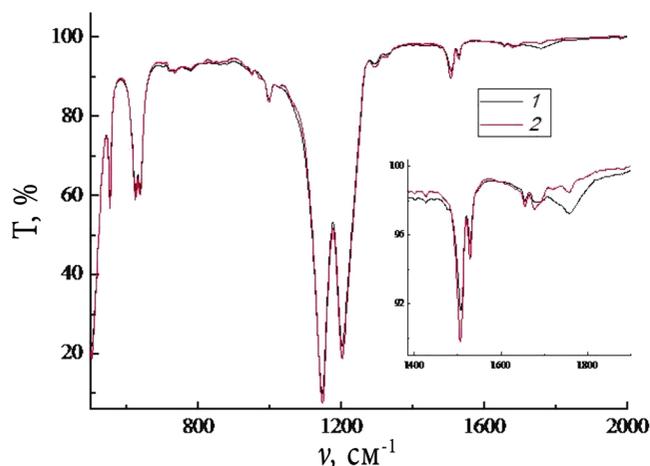


Рис. 2. ИК-спектры необлученного (1) и облученного дозой 300 кГр теломера ТФЭ/ПФХБ. На вставке фрагмент спектра в увеличенном масштабе.

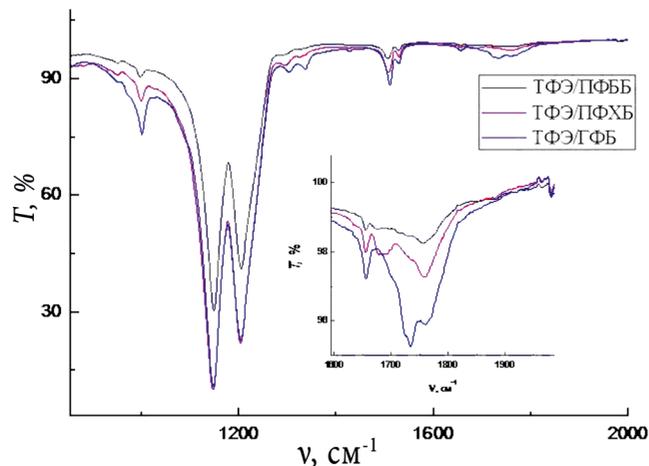


Рис. 3. ИК-спектры теломеров во фторированных бензолах, облученных дозой 300 кГр. На вставке фрагмент спектра в увеличенном масштабе.

Таблица 2. Значения относительных интенсивностей ПП концевых групп теломеров во фторированных бензолах при дозе облучения 300 кГр

Состав теломера	$I_{1508 \pm 3}/I_{1148}$		$I_{998 \pm 3}/I_{1148}$		I_{1760}/I_{1148}	
	0 кГр	300 кГр	0 кГр	300 кГр	0 кГр	300 кГр
ТФЭ/ПФХБ	0.110	0.092	0.176	0.174	-	0.03
ТФЭ/ГФБ	0.134	0.1297	0.276	0.272	-	0.046
ТФЭ/ПФББ	0.048	0.069	0.091	0.136	-	0.025

Таблица 3. Значения относительных интенсивностей ПП концевых групп теломеров во фторированных бензолах при дозе облучения 600 кГр

Состав теломера	$I_{1508 \pm 3}/I_{1148}$		$I_{998 \pm 3}/I_{1148}$		I_{1760}/I_{1148}	
	0 кГр	600 кГр	0 кГр	600 кГр	0 кГр	600 кГр
ТФЭ/ПФХБ	0.064	0.042	0.1343	0.131	-	0.045
ТФЭ/ГФБ	0.1599	0.1162	0.3235	0.2769	-	0.0677
ТФЭ/ПФББ	0.0307	0.0586	0.06097	0.1196	-	0.0197

В работе [11] было показано, что в результате гамма-облучения происходит отрыв концевых групп теломеров, выражающийся в уменьшении относительных интенсивностей их колебаний в ИК-спектрах, и появляется полоса поглощения образующихся концевых карбоксильных групп. Выше уже отмечалось, что оценка отношения интенсивностей ПП концевых групп к интенсивности полосы C–F цепи позволяет косвенно оценить длину цепи образовавшихся теломеров. Результаты расчетов для теломеров, облученных дозой 300 кГр приведены в табл. 2.

Для теломеров ТФЭ/ПФХБ и ТФЭ/ГФБ наблюдается уменьшение относительных интенсивностей ПП $1508 \pm 3 \text{ см}^{-1}$ и $998 \pm 3 \text{ см}^{-1}$ и появляется ПП в области 1760 см^{-1} , относящаяся, как было показано в работе [11], к концевой COOH-группе. Для теломеров ТФЭ/ПФББ, имеющих изначально самую большую длину цепи, наоборот, наблюдается

увеличение относительных интенсивностей ПП концевых групп. Этот факт можно объяснить, предположив, что под действием излучения происходит не только отрыв концевых групп, но и разрыв полимерной цепи, приводящий к образованию более короткоцепочечных теломеров, имеющих более высокую относительную концентрацию концевых групп. Стоит заметить, что уменьшение интенсивностей ПП бензольных колец для теломеров ТФЭ/ПФХБ и ТФЭ/ГФБ не велико. При этом появляется новая концевая группа, это может быть связано так же, как и для теломеров ТФЭ/ПФББ, с разрывом полимерной цепи, учитывая, что энергия разрыва связей в цепи и отрыва концевой группы сравнимы. Но для теломеров ТФЭ/ПФХБ и ТФЭ/ГФБ этот процесс не столь очевиден, возможно, из-за различий в длинах цепи теломеров.

Аналогичная картина наблюдается и при облучении теломеров дозой 600 кГр (табл. 3).

Для теломеров в ПФХБ и ГФБ при дозе облучения 600 кГр наблюдается дальнейшее уменьшение интенсивности ПП бензольных групп и увеличение интенсивности полосы 1760 см^{-1} . Так, если при дозе 300 кГр уменьшение $I_{1508\pm 3}/I_{1148}$ составляет 16% для образца ТФЭ/ПФХБ, то при 600 кГр оно равно 34%. Такая же зависимость наблюдается и для отношения $I_{998\pm 3}/I_{1148}$, а также для теломеров ТФЭ/ГФБ. Интенсивность ПП 1760 см^{-1} при этом растет, причем ее интенсивность увеличивается на 50% при увеличении дозы от 300 до 600 кГр. Вполне вероятно, что в процессе облучения происходит как отрыв бензольных колец, так и разрыв цепи с образованием теломеров с более короткой длиной цепи.

Для теломеров же ТФЭ/ПФББ картина аналогична как при дозе 300 кГр, так и при 600 кГр. Соотношение интенсивностей ПП до и после облучения свидетельствует об образовании теломеров более короткоцепочечных теломеров. Следует заметить, что новая ПП ($\sim 1760\text{ см}^{-1}$) во всех образцах, облученных дозой 600 кГр, слегка смещается в длинноволновую область, что может также свидетельствовать об уменьшении длины цепи теломеров.

Несмотря на то, что под действием излучения наблюдаются изменения молекулярной структуры теломеров, все образцы сохраняют гидрофобные свойства. Краевые углы смачивания водой порошков теломеров, облученных дозой 300 кГр (№ 2, 4, 6) составляют 135° , 138° и 132° (рис. 4).

Суммируя сказанное выше, можно сделать следующие выводы. С использованием радиационно-химического способа инициирования впервые получен ряд теломеров ТФЭ во фторированных бензолах, отличающихся одним заместителем в бензольном кольце. Показано, что эффективность процесса (выход теломера) при одинаковой исходной концентрации ТФЭ зависит не только от дозы облучения, но и от состава растворителя. Наиболее эффективно в ряду использованных фторбензолов процесс протекает в ПФББ, что обусловлено величиной энергии связи заместителя (F, Cl, Br) в бензольном кольце. Анализ ИК-спектров показал, что в состав теломеров входят фрагменты молекул растворителей (C_6F_5 , F, Cl, Br), а также позволил оценить относительную среднюю длину цепи n в ряду фторированных бензолов (ТФЭ/ГФБ < ТФЭ/ПФХБ < ТФЭ/ПФББ) как при одинаковых условиях синтеза, так и в зависимости от дозы облучения для каждого из растворителей. Последующее облучение теломеров показало, что под действием радиации происходят изменения молекулярной структуры: отрыв



Рис. 4. Краевые углы смачивания облученных (300 кГр) порошков теломеров ТФЭ/ГФБ (1), ТФЭ/ПФХБ (2), ТФЭ/ПФББ (3).

концевых бензольных групп, образование концевых COOH -групп и разрыв теломерной цепи, приводящий к образованию теломеров с более короткой длиной цепи.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по госзаданию Российской Федерации (номера гос. регистрации 124013000722–8, 124013000757–0, 124013000692–4) с использованием УНУ “Гамма-100” и оборудования АЦКП ФИЦ ПХФ и МХ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ignatieva L., Kuryaviy V., Tsvetnikov A., Polyshchuk S., Bouznik V. // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 2007. V. 68. P. 1106
2. Хатинов С.А., Конова Е.М., Артамонов Н.А. // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). 2008. Т. LII. № 5. С. 64.
3. Ольхов Ю.А., Аллаяров С.Р., Диксон Д.А. // Химия высоких энергий. 2014. Т. 48. № 3. С. 175.
4. Иванов Л.Ф., Ольхов Ю.А., Аллаяров С.Р., Толстопятов Е.М., Гракович П.Н., Калинин Л.А. // Химия высоких энергий. 2014. Т. 48. № 2. С. 148.
5. Lappan U., Gebler U., Lunkwitz K.J. // Appl. Polym. Sci. 1999. V. 74. P. 1571.
6. Tikhomirov L.A. // High Energy Chem. 1983. V. 17. P. 267.
7. Игнатьева Л.Н., Бузник В.М. // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). 2008. Т. LII. № 3. С. 139
8. Fisher W.K., Corelli J.C. // Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition. 1981. V. 19. P. 2465
9. Oshima A., Ikede S., Seguch T., Tabata Y. // Radiat. Phys. Chem.. 1997. V. 49. P. 279.
10. Кирюхин Д.П., Кичигина Г.А., Куц П.П., Бузник В.М. // Низкомолекулярные фторполимерные материалы. Монография «Фторполимерные материалы» (глава 4). Томск: Изд-во НТЛ, 2017. 600 с
11. Кичигина Г.А., Куц П.П., Кирюхин Д.П., Кабачков Е.Н., Шульга Ю.М. // Химия высоких энергий. 2023. Т. 57. № 5. С. 378.
12. Кичигина Г.А., Куц П.П., Кирюхин Д.П. // Химия высоких энергий. 2013. Т. 47. № 1. С. 34.

13. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. Л.: Химия, 1978.
14. Дехант И., Даниц Р., Киммер В. Инфракрасная спектроскопия полимеров. М.: Химия, 1976, 472 с.

RADIATION-CHEMICAL SYNTHESIS OF TETRAFLUOROETHYLENE TELOMERS IN FLUORINATED BENZENES AND THE EFFECT OF GAMMA RADIATION ON THEIR MOLECULAR STRUCTURE

G. A. Kichigina^a*, P. P. Kushch^a, Yu. M. Shulga^a, E. N. Kabachkov^a, D. P. Kiryukhin^a

^a *Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry,
Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia*

*E-mail: kga@icp.ac.ru

The radiation-induced telomerization of tetrafluoroethylene in pentafluorochlorobenzene, pentafluorobromobenzene, and hexafluorobenzene has been studied. It has been shown that the process efficiency and the chain length of the resulting telomers depends on the binding energy of the substituent in the fluorinated benzene rings. An analysis of the IR spectra showed that changes in the molecular structure of telomers occurred under the influence of gamma radiation; these changes were expressed in the detachment of terminal benzene rings and the formation of terminal carboxyl groups. In addition, polymer chain degradation leading to the formation of telomers with a shorter chain length was observed. The hydrophobic properties of the samples of all irradiated telomers were preserved.

Keywords: tetrafluoroethylene telomers, gamma radiation, IR spectroscopy

REFERENCES

1. Ignatieva L., Kuryaviy V., Tsvetnikov A., Polyshchuk S., and Bouzник V. // *J. Phys. Chem. Solids*, 2007, V. 68, P. 1106.
2. Khatipov S.A., Konova E.M., Artamonov N.A. // *Ross. Khim. Zh. (Zh. Ross. Khim. Ob-va im. D.I. Mendeleeva)*, 2008, vol. 52, no. 5, P. 64.
3. Ol'khov Yu. A., Allayarov S.R., and Dixon D.A. // *High Energy Chem.*, 2014, vol. 48, no. 3, P. 152.
4. Ivanov L.F., Ol'khov Yu. A., Allayarov S.R., Tolstopyatov E.M., Grakovich P.N., and Kalinin L.A. // *High Energy Chem.*, 2014, vol. 48, no. 2, P. 117.
5. Lappan U., Gebler U., and Lunkwitz K.J. // *Appl. Polym. Sci.*, 1999, vol. 74, P. 1571.
6. Tikhomirov L.A. // *High Energy Chem.*, 1983, V. 17, P. 267.
7. Ignat'eva L.N. and Bouzник V.M. // *Ross. Khim. Zh. (Zh. Ross. Khim. Ob-va im. D.I. Mendeleeva)*, 2008, V. 52, № 3, P. 139
8. Fisher W.K. and Corelli J.C. // *J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem.*, 1981, V. 19, P. 2465.
9. Oshima A., Ikede S., Seguch T., and Tabata Y. // *Radiat. Phys. Chem.*, 1977, V. 49, P. 279.
10. Kiryukhin D.P., Kichigina G.A., Kushch P.P. and Bouzник V.M. // *Ftorpolimernye materialy (Fluoropolymer Materials)*, Bouzник, V.M., Ed., Tomsk: Izd. NTL, 2017, Ch. 4.
11. Kichigina G.A., Kushch P.P., Kiryukhin D.P., Kabachkov E.N., and Shulga Yu.M. // *High Energy Chem.*, 2023, V. 57, № 5, P. 418.
12. Kichigina G.A., Kushch P.P., and Kiryukhin D.P. // *High Energy Chem.*, 2013, V. 47, № 1, P. 27.
13. Rabinovich V.A. and Khavin Z.Ya. *Kratkii khimicheskii spravochnik (Abridged Handbook of chemistry)*, Leningrad: Khimiya, 1978.
14. Dechant I., Danz R., Kimmer W., and Schmolke K. // *Ultrarot-spektroskopische Untersuchungen an Polymeren*, Berlin: Akademie, 1972.