

УДК 541.15:541.515:543.422.27

ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЯ ПОЛИПРОПИЛЕНА, ПОДВЕРГНУТОГО ГАММА-ОБЛУЧЕНИЮ И ПОСТРАДИАЦИОННОМУ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ СДВИГОВОМУ ИЗМЕЛЬЧЕНИЮ, И ЕГО ТОКСИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА© 2024 г. У. Ю. Аллаярова¹, С. Р. Аллаяров^{1, *}, С. В. Демидов¹, Р. К. Баймуратова¹, С. Д. Чекалина^{1, 2}, Д. В. Мищенко^{1, 2}, Е. Н. Климанова¹, А. Б. Абдусаламов³, Д. А. Диксон⁴¹Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Россия²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия³Государственный комитет промышленной безопасности Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан⁴Алабамский университет Химический факультет, Таскалууса, Алабама, США

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

Поступила в редакцию 22.11.2023 г.

После доработки 01.04.2024 г.

Принята к публикации 03.04.2024 г.

Представлены результаты ИК-Фурье спектрального исследования полипропилена (ПП), подвергнутого гамма-облучению и пострadiационному высокотемпературному сдвиговому измельчению. В ИК-спектрах облученных на воздухе гранул ПП появляются пики поглощения гидроксильных и кислородсодержащих групп, интенсивность которых заметно снижается в порошке, полученном после измельчения облученных гранул полимера. Были исследованы токсические свойства ПП, полученного при помоле методом высокотемпературного сдвигового измельчения облученных гранул полимера. Показано, что гамма-облучение гранул полимера на воздухе не оказывает влияния на токсические свойства его порошка, полученного при измельчении облученных дозой 700–4500 кГр гранул. Установлено, что при внутрижелудочном введении мышам линии BDF₁ порошок ПП из необлученных и облученных гранул, является умеренно токсичным веществом.

Ключевые слова: полипропилен, порошок, γ -облучение, высокотемпературное сдвиговое измельчение, ИК-Фурье спектры, токсичность

DOI: 10.31857/S0023119324040068 EDN: TQBWBY

ВВЕДЕНИЕ

Полипропилен (ПП) является искусственным мало токсичным термопластиком, обладающим хорошими эксплуатационными свойствами [1–4]. Все это позволяет широко использовать ПП в качестве пищевых контейнеров и изделий медицинского назначения [5–7], где требуется стерилизация перед использованием. Радиационная обработка является одним из эффективных методов стерилизации таких изделий. Высокая проникающая способность и возможность проведения стерилизации без нагрева делает γ -облучение очень привлекательным для стерилизации. Стерилизация более 40% всех произведенных в мире одноразовых медицинских изделий из ПП, таких как шприцы, хирургические перчатки и халаты, осуществляется с использованием γ -облучения. Она также применяется для стерилизации лабораторного оборудования, косметики и т.д. [5, 6]. Рекомендуемая доза облучения при стерилизации обычно составляет 25 кГр в соответствии

с Кодексом практики МАГАТЭ (1974 г.) и фармакопеей [8]. На практике в большинстве случаев используются стерилизующие дозы от 25 до 40 кГр [5].

В настоящее время большое количество полимеров, в том числе ПП, используется в качестве конструкционного материала, подвергающегося воздействию различных видов излучений: в космической технике, атомной промышленности, ускорителях частиц, радиационной и ядерной медицине, где полимеры могут получать достаточно большие дозы ионизирующего излучения. В таких условиях эксплуатации не только долговечность полимера [9, 10], но и его токсичность являются важной эксплуатационной характеристикой, что делает весьма актуальным исследование облученных относительно большими дозами полимеров. Этот вопрос, к сожалению, в доступной литературе практически не освещен. В недавних исследованиях нами было изучено влияние относительно больших доз γ -облучения на токсичность продуктов радиолита

макромолекул поливинилового спирта [11], поливинилиденфторида [12], поливинилхлорида [13], семян овса [14] и клубней картофеля [15]. Эксперименты по изучению токсичности облученных в широком диапазоне дозы γ -излучения клубней картофеля (100–1500 кГр) [15], поливинилиденфторида (500–5000 кГр) [12], ПВС (1000–2000 кГр) [11] показали на отсутствие негативного влияния на организм употреблявших их животных. Токсичность радиолитизированных зерен овса зависит от дозы γ -облучения зерен и режима дополнительной подкормки подопытных мышей [14]. В настоящей работе исследованы токсические свойства порошка ПП, полученного при измельчении гранул полимера, облученных дозой от 700 до 4500 кГр.

Вследствие широкого спектра использования пластмасс в мире образуется гигантское количество разнообразного технического и бытового мусора [16, 17], из которого небольшой процент перерабатывается, а остальное отправляется на свалки или сжигается [18]. Большая часть отходов из ПП образуется в ходе использования одноразовых товаров и остатков его производства. По Федеральному классификационному каталогу отходов Российской Федерации [19] такие отходы отнесены к четвертому классу опасности, так как они не опасны для человека, но имеют вредные свойства. Поэтому создание экологически чистых и экономически рентабельных способов повторного использования/переработки изделий из ПП остается важной научно-технической задачей.

Метод высокотемпературного деформационного сдвигового измельчения (ВСИ) успешно применяется в полупромышленных масштабах для переработки резинотехнических изделий, в частности автомобильных покрышек [20, 21]. Имеется информация о возможном использовании этого метода для переработки отходов политетрафторэтилена (ПТФЭ) [22, 23] и полиэтилена (ПЭ) [24]. Причем предварительное γ -облучение термопластов, проводя молекулярно-топологические изменения в структуре ПТФЭ [25, 26] и частично разрушая его макромолекулу [26], увеличивает число дефектов, позволяющих достичь критического значения для реологического взрыва в ходе ВСИ, тем самым может быть использовано в качестве эффективного способа воздействия на процесс ВСИ.

Преимущественно информация о токсичности облученных на воздухе относительно большими дозами γ -излучения полимеров [11–13] касается напрямую токсичности облученного полимера, не

подвергнутого другому пострадиационному внешнему воздействию.

Целью настоящей работы было исследование влияния дозы γ -облучения на химический состав и токсические свойства порошка, облученного ПП.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Радиолиз γ -лучами ^{60}Co образцов ПП проводили на воздухе с использованием установки УНУ “Гамма-100” Федерального исследовательского центра проблем химической химии и медицинской химии Российской академии наук при мощности дозы облучения 3 Гр/с.

Для облученных образцов ПП, как подвергнутых измельчению, так и не подвергнутых, был проведен спектроскопический анализ методом нарушенного полного внутреннего отражения (ATR/НПВО) в диапазоне волновых чисел от 4000 до 360 см^{-1} . Анализ проводился на ALPHA Фурье-ИК-спектрометре компании Bruker, оснащенном алмазной призмой однократного отражения. Глубина проникновения для среды с достаточно глубоким показателем преломления (2.43) при 1000 см^{-1} составляет 1.66 мк.

Спектры рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) снимали на сканирующем электронном микроскопе марки JEOL 7000 FE.

Определение токсических свойств проводили при однократном внутрижелудочном введении суспензии промышленного ПП самцам мышей-гибридов линии BDF1 весом от 23 до 26 г. Животные были получены из УНУ “Питомник и виварий ФИЦ ПХФ и МХ РАН”. В опыте использовались клинически здоровые животные, находившиеся в одинаковых условиях содержания и кормления. Для внутрижелудочного введения животным ПП (до и после γ -облучения) суспензировали в 1% растворе крахмала. Индивидуальный объем вводимой дозы для каждого животного рассчитывали, исходя из значения массы тела и дозы исследуемого вещества. За один прием мышам вводили не более 0,5 мл суспензии согласно рекомендациям, данным в “Руководстве по проведению доклинических исследований лекарственных средств” [27–30]. Для проведения манипуляции внутрижелудочного введения использовали атравматичный зонд соответствующих размеров в зависимости от вида животного и размера его желудка. Перед введением животных лишали пищи, но не воды, на ночь. По прошествии периода голодания животных взвешивали и на основании данных массы тела высчитывали дозу, затем вводили им исследуемый образец. После введения исследуемых образцов велось постоянное наблюдение за

животными с регистрацией времени наступления первых клинических признаков интоксикации. Исследуемые образцы ПП (до и после γ -облучения) вводили мышам внутрижелудочно в дозах от 500 до 2000 мг/кг. После однократного введения образцов проводили наблюдение за состоянием животных и фиксировали клиническую картину интоксикации в течение 4 ч. Масса тела животных определялась в течение 14 дней после однократного введения исследуемых веществ ПП в сравнении с контрольными животными, получавшими однократно эквивалентные объемы 1% крахмала. После окончания эксперимента мыши были подвергнуты эвтаназии путем дислокации шейных позвонков и направлены на вскрытие и патоморфологическое исследование внутренних органов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Общий вид ИК-спектров облученных на воздухе различной дозой гранул ПП (а–г) и порошков (д–з), полученных при измельчении соответствующих гранул, представлены на рис. 1 со смещением вдоль оси ординат для удобства сравнения.

В спектре необлученных гранул ПП, а также их порошка регистрируются интенсивные пики, связанные с асимметричными (2951 см^{-1}) и симметричными (2866 см^{-1}) валентными колебаниями связей С–Н в CH_3 группах, а также валентными симметричными (2839 см^{-1}) и несимметричными (2915 см^{-1}) колебаниями в CH_2 группах. В данных спектрах также регистрируются умеренные пики поглощения, отвечающие за асимметричные (1454 см^{-1}) и симметричные (1375) деформационные колебания С– CH_3 группы.

Большинство полос поглощения, регистрируемые в спектре исходных гранул (спектр а) и их порошка (спектр д), регистрируются также в спектрах облученных гранул (спектры б, в, г) и порошка полимера (спектры е, ж, з). Кроме того, в ИК-спектрах НПВО облученных образцов ПП, как подвергнутых измельчению, так и не подвергнутых, дополнительно появляются пики поглощения в диапазоне от 1800 до 1600 см^{-1} волновых чисел, соответствующие валентным колебаниям карбоксильных связей с центром интенсивности при 1717 и 1737 см^{-1} . Данные полосы поглощения обусловлены радиационным окислением облученного полимера в результате присоединения кислорода воздуха к свободным радикалам, образующимся в радиолитованном полимере. Увеличение интенсивности этих полос с ростом дозы облучения гранул свидетельствует о повышении степени окисления макромолекул по-

лимера с ростом дозы облучения. В ИК-спектре исходного образца гранул ПП, где интенсивность валентных колебаний ОН групп практически равна нулю, в спектрах облученных гранул регистрируется полоса поглощения при 3466 см^{-1} от гидроксильных групп, участвующих в образовании водородных связей в радиолитованном полимере.

При сравнительном анализе ИК-спектров видно, что в спектре предварительно радиолитованного, а затем диспергированного ПП наблюдается заметное ослабление интенсивности максимумов пиков поглощения кислородсодержащих функциональных групп при 1717 и 1742 см^{-1} . Очевидно, что в ходе измельчения облученных гранул кислородсодержащие функциональные группы, находящиеся на их поверхности, перераспределяются в объеме полученного после измельчения порошка. Кроме того, по условиям эксперимента в процессе измельчения методом высокотемпературного деформационного сдвига гранулы полимера подвергаются нагреву до температуры расплава $200 \pm 10^\circ\text{C}$. Разумеется, это может привести к термическому распаду окисленных фрагментов. Следовательно, причиной снижения интенсивности полос поглощения окисленных фрагментов макромолекул в порошке облученных гранул может служить как перераспределение макромолекул полимера, содержащих функциональные группы из поверхности облученных гранул в объем порошка, так и их термический распад в ходе измельчения.

Как видно, сравнительный анализ ИК-спектров гранул ПП и порошка, полученного при измельчении гранул, указывает на их практическую идентичность, за исключением уменьшения относительной интенсивности полос поглощения окисленных фрагментов в спектрах порошка. Из чего следует, что в результате измельчения снижается содержание радиационно-окисленных групп в составе порошка.

О радиационном окислении поверхности облученных гранул свидетельствуют данные исследования поверхности γ -облученных гранул методом РФЭ-спектроскопии. На рис. 2 представлен обзорный РФЭ-спектр необлученного ПП. На нем помимо углеродного (CI_s) пика появляются также пик кислорода (OIs). Регистрируемый пик CI_s соответствует связям С–С (284.7 эВ). Регистрируемая OIs линия с $E_{\text{св}} = 532.3\text{ эВ}$ в спектре (рис. 2) обладает значением $E_{\text{св}}$ молекулярно-хемосорбированного кислорода (532.2 эВ).

Положение и количество пиков в РФЭ-спектре практически не изменяются после γ -облучения образца ПП (табл. 2). В спектре OIs облученного полимера появляется слабо интенсивный пик в об-

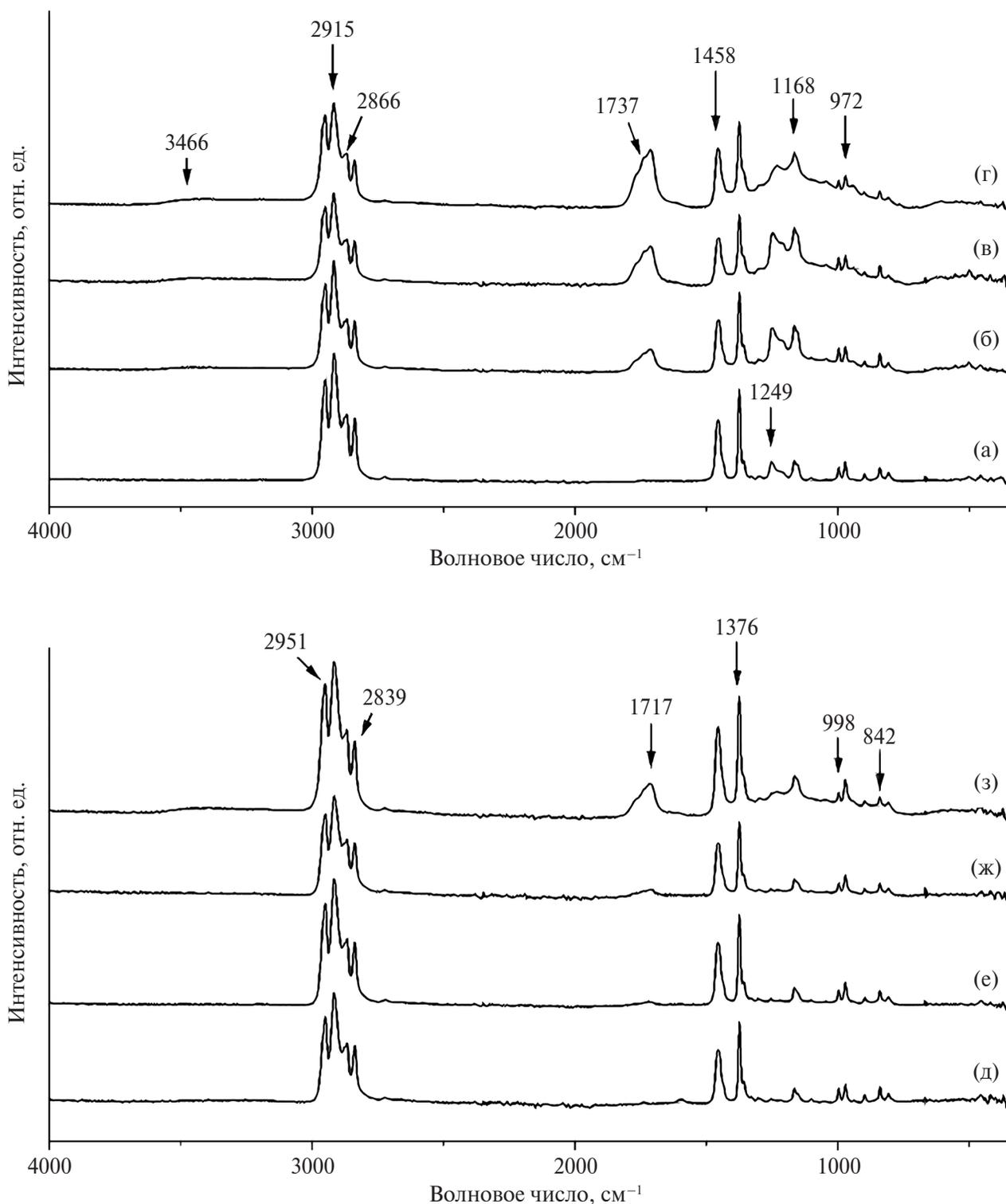


Рис. 1. Общий вид и расширенные ИК-Фурье спектры не облученных (а) и γ -облученных гранул ПП (б,в,г), а также порошка, полученного при помоле предварительно γ -облученных гранул полимера (д,е,ж,з). Доза γ -облучения (кГр): 0 (а,д), 700 (б,е), 2100 (в,ж), 4500 (г,з).

ласти 287.8–288.0 эВ присущий карбонильным группам [31, 32]. Сравнительный анализ спектров линии *C1s* и *O1s* для исходной и γ -облученной пластинки ПП на рис. 2 свидетельствует об изменении их относительной интенсивности в результате γ -облу-

чения. После γ -облучения увеличивается интенсивность пика *O1s* и уменьшается интенсивность пика *C1s*. Декарбонизация приповерхностного слоя образца γ -облученного ПП связана с превращениями в цепи полимера, в первую очередь с деструкцией

Таблица 1. Соотнесение полос ИК спектра НПВО полипропилена согласно литературным данным [4]

Волновое число, см ⁻¹	^a Отнесение полос
3466	$\nu(\text{O-H})$
2951	$\nu_{\text{as}}(-\text{CH}_3)$
2915	$\nu_{\text{as}}(-\text{CH}_2-)$
2866	$\nu_{\text{s}}(-\text{CH}_3)$
2839	$\nu_{\text{s}}(-\text{CH}_2)$
1737	$\nu(\text{C=O})$
1717	$\nu(\text{C=O})$
1458	$\delta_{\text{as}}(-\text{CH}_3)$
1376	$\delta_{\text{s}}(-\text{CH}_3)$
1249	$t(\text{CH}_2)$
1168	$r(\text{CH}_3)$
998	$r(\text{CH}_3)$
972	$r(\text{CH}_3)$
842	$r(\text{CH}_3)$
458	$r(\text{CH}_3)$

ν – валентное колебание (ν_{s} – симметричное, ν_{as} – антисимметричное), δ – деформационное колебание, r – плоскостное (маятниковое) деформационное колебание, t – крутильные деформационное колебание.

основной цепи и ее разветвлением. Как следует из выше сказанного, увеличение интенсивности пика *O1s* в γ -облученном ПП, по всей вероятности, является результатом реакции окисления свободных радикалов, стабилизирующихся на поверхности γ -облученного полимера.

Таким образом, в результате γ -облучения в элементном составе поверхности γ -облученного ПП происходит уменьшение доли углерода (на 4.55 ат.%) и, соответственно, на такое же количество повышается содержание кислорода (табл. 2).

Как следует из вышесказанного, радиационная обработка гранул ПП для их дальнейшего измельчения до порошка приводит к изменению состава полимера, возникают кислородсодержащие и другие фрагменты в составе полученного порошка. Для решения возможности использования радиации для оптимизации процесса ВСИ данного полимера, крайне необходимо обеспечение сохранности его малой токсичности. С целью определения степени влияния дозы облучения на токсикологические свойства продукта пострадиационного высокотемпературного измельчения было проведено исследование токсических свойств суспензии ПП, полученного в результате измельчения гранул полимера, облученных γ -лучами ⁶⁰Со дозой 700, 2100 и 4500 кГр.

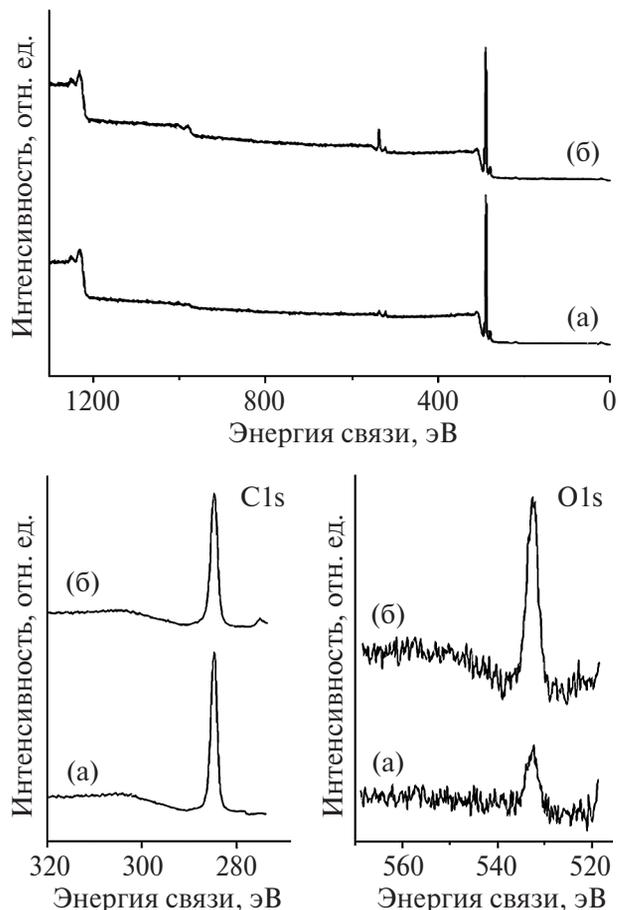


Рис. 2. Общий вид и расширенные РФЭ-спектры необлученного (а) и облученного дозой 120 кГр гранул ПП (б).

Таблица 2. Элементный анализ образцов до и после γ -облучения дозой 120 кГр гранул ПП, установленный методом РФЭС

Д, кГр		<i>C1s</i>	<i>O1s</i>
0	$E_{\text{св}}$, эВ	284.7(CC)	532.3
	Содерж., ат. %	97.57	2.43
120	$E_{\text{св}}$, эВ	284.7(CC)	532.0 532.5
	Содерж., ат. %	93.02	6.98
	Изменение, ат. %	-4.55	+4.55

При внутрижелудочном введении образцов ПП во всех группах исследуемых животных ни одна мышь не умерла. В то же время нельзя было превысить дозу вводимого полимера выше 2000 мг/кг из-за достижения предела солюбилизации ПП в 1% растворе крахмала. Визуальное наблюдение за подопытными животными показало, что у животных, получавших изучаемые образцы полимера, в течение первых суток отмечается заторможенность, вялость. На протяжении последующего периода наблюдения

Таблица 3. Влияние облученного ПП на изменение массы тела самцов мышей-гибридов BDF1 при однократном внутрижелудочном введении суспензии полимера в дозе 2000 мг/кг

Доза γ -облучения, кГр	Масса тела животных после введения суспензии ПП, г					
	0 сутки	1 сутки	2 сутки	3 сутки	7 сутки	14 сутки
0	26.15 \pm 0.57	26.08 \pm 0.64	26.17 \pm 0.71	26.37 \pm 0.57	26.14 \pm 0.90	26.35 \pm 0.83
700	22.72 \pm 0.46	23.39 \pm 0.97	23.47 \pm 1.03	24.10 \pm 0.92	24.19 \pm 1.00	24.18 \pm 0.89
2100	25.11 \pm 0.22	25.38 \pm 0.60	25.85 \pm 0.84	25.10 \pm 1.54	25.76 \pm 0.25	25.57 \pm 0.28
4500	26.81 \pm 0.35	25.48 \pm 0.49	26.00 \pm 0.60	26.15 \pm 0.67	26.53 \pm 0.20	25.46 \pm 0.61
контроль	25.43 \pm 0.23	25.32 \pm 0.40	25.29 \pm 0.58	25.26 \pm 0.79	25.29 \pm 0.74	26.05 \pm 0.99

общее состояние и поведение животных всех экспериментальных групп нормализовалось.

Данные о влиянии образца ПП на массу тела экспериментальных животных приведены в табл. 3. Как видно, в ходе наблюдения за животными, получавшими суспензию облученного полимера, не наблюдается достоверных отличий изменения массы тела мышей как в контрольной, так и в опытных группах.

В ходе эксперимента, на 14 сутки после введения, животные были подвергнуты эвтаназии с последующим макроскопическим описанием внутренних органов. В результате вскрытия и последующего макроскопического исследования внутренних органов (желудок, печень, почки, легкие) различий между животными, получившими внутрижелудочно ПП, и контрольными животными не установлено.

Подытожив вышесказанное, можно утверждать, что при однократном внутрижелудочном способе введения ПП, полученный при измельчении облученных дозой 700–4500 кГр гранул полимера, не оказывает токсического воздействия на исследуемых мышей.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- в ИК-спектрах порошка ПП, полученного при измельчении облученных на воздухе гранул полимера, регистрируются пики поглощения гидроксильных и карбонильных групп, свидетельствующие о функционализации макромолекул облученного полимера в результате радиационного окисления макромолекул полимера. Интенсивность полос поглощения таких групп заметно снижается в порошке относительно их содержания в соответствующих облученных гранулах;
- увеличение интенсивности пика OIs и уменьшение интенсивности пика $CIIs$ в РФЭ-спектре γ -облученного ПП показывает радиационное окисление кислородом воздуха и декарбонизацию приповерхностного слоя образца γ -облученного полимера;

- показано, что полипропилен, подвергнутый γ -облучению в дозах 700–4500 кГр, не оказывает влияния на токсические свойства полученного порошка при однократном внутрижелудочном введении в дозе до 2000 мг/кг мышам линии BDF1.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа была выполнена в рамках госзадания № 124013000722-8 и № 124020500019-2 с использованием УНУ “Гамматок-100 ФИЦ ПХФ РАН” и УНУ “Питомник и виварий ФИЦ ПХФ РАН”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Moore E.P., Jr. Polypropylene Handbook: Polymerization, Characterization, Properties, Processing, Applications. Munich, Viena, New York: Hanser Publishers, 1996. XIX. 419 P.
2. Tripathi D. Practical Guide to Polypropylene. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire: Rapra Technology Ltd, 2002.
3. Karger-Kocsis J. (ed). Polypropylene: an A–Z reference. Dordrecht: Kluwer, 1999. P. 853.
4. Andreassen E. Infrared and Raman spectroscopy of polypropylene Polymer Science and Technology Series. / J. Karger-Kocsis (ed.). Dordrecht: Springer Netherlands, 1999. P. 320.
5. Fintzou A.T., Badeka A.V., Kontominas M.G., Rigankos K.A. // Radiat. Phys. Chem. 2006. V. 75. P. 87.
6. Goulas A. E., Riganakos K. A., Kontominas M. // ACS Symposium Series. 2004. V. 875. P. 290.
7. Yagoubi N., Peron R., Legendre B., Grossiord J.L., Ferrer D. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 1999. V. 151. P. 247.
8. Darboir J. C., Pavis F., Laizier J. // Ann. Pharm. Er. 1985. V. 43. P. 241.
9. Новиков Л.С., Воронина Е.Н. Перспективы применения наноматериалов в космической технике: Учебное пособие. М.: Университетская книга, 2008. 188 с.
10. Жданович О.А. // Федеральная целевая программа “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического

- комплекса России на 2014–2020 годы”. Отчет для научных исследований. Проект № 14.625.21.0035, 2014 г.
11. *Аллаяров С.Р., Корчагин Д.В., Аллаярова У.Ю., Диксон Д.А., Мищенко Д.В., Климанова Е.Н., Фролов И.А.* // Химия высоких энергий. 2021. Т. 55. № 1. С. 42.
 12. *Allayarov S.R., Confer M.P., Demidov S.V., Allaayarova U.Yu., Mishenko D.V., Klimanova E.N., Dixon D.A.* // Journal of Fluorine Chemistry. 2021. V. 250. № 109885.
 13. *Allayarov S.R., Confer M.P., Bogdanova S.A., Rudneva T.N., Allaayarova U.Yu., Shaimukhametova I.F. et al.* // Radiation Physics and Chemistry. 2022. V. 201. № 110436.
 14. *Аллаяров С.Р., Аллаярова У.Ю., Климанова Е.Н., Демидов С.В., Сашенкова Т.Е., Блохина С.В., Мищенко Д.В.* // Химия высоких энергий. 2023. Т. 57. № 2. С.125.
 15. *Аллаярова А.С., Шитикова А.В., Файнгольд И.И., Аллаярова У.Ю., Климанова Е.Н., Сашенкова Т.Е., Демидов С.В., Чекалина С.Д., Аллаяров С.Р.* // Химия высоких энергий. 2023. Т. 57. № 4. С.304.
 16. *Holmes W.A.* Polymer Conversion. Materials science series. London: Elsevier Science Ltd, 1975.
 17. *La Mantia F.* Handbook of Plastics Recycling. Smithers Rapra Publishing, 2002. P. 441.
 18. *Ragaert K., Delva L., Van Geem K.* // Waste Management. 2017. V. 69. P. 24.
 19. Федеральный классификационный каталог отходов Электронный ресурс.
<https://grn.gov.ru/fkko/?search=полипропилен> (дата обращения: 26.06.23).
 20. *Никольский В.Г., Дударева Т.В., Красоткина И.А., Зверева Ю.Г., Бекешев В.Г., Рочев В.Я., Каплан А.М., Чекунаев Н.И., Внукова Л.В., Стырикович Н.М., Гордеева И.В.* // Химическая физика. 2014. Т. 33. № 7. С. 87.
 21. *Berlin A.A., Dudareva T.V., Krasotkina I.A., Nikol'skii V.G.* // Polym. Sci. Ser. D. 2018. V. 11. P. 323.
 22. *Аллаяров С.Р., Никольский В.Г., Шарпный В.А., Кисперт Л.Д., Диксон Д.А., Белов Г.П.* // Материалы научно-практической конференции по проблеме: “Полимеризационные пластмассы, производство и переработка, 2006”. СПб., 2006. С. 117.
 23. *Аллаяров С.Р., Никольский В.Г., Дударева Т.В., Шарпный В.А., Кисперт Л.Д., Диксон Д.А.* // Материалы IV Международной Конференции “Сотрудничество для решения проблем отходов”, Харьков, Украина, 2007. С. 123.
 24. *Малков Г.В., Демидов С.В., Аллаяров С.Р., Никольский В.Г., Семавин К.Д., Капашаров А.Т., Подвальная Ю.В.* // Химия высоких энергий. 2020. Т. 54. С. 142.
 25. *Ольхов Ю.А., Аллаяров С.Р., Чернышева Т.Е., Баркалов И.М., Кисперт Л.Д., Трешер Ж.С., Фернандес Р.Е., Никелс Д.Е.* // Химия высоких энергий. 2006. Т. 40. С. 355.
 26. *Allayarov S.R., Konovalikhin S.V., Olkhov Yu.A., Jackson V.E., Kispert L.D., Dixon D.A. et al.* // J. Fluor. Chem. 2007. V. 128. P. 575.
 27. ГОСТ 32644-2014 Методы испытания по воздействию химической продукции на организм человека. Острая пероральная токсичность – метод определения класса острой токсичности.
 28. ГОСТ ISO 10993-11-2011 Оценка биологического действия медицинских изделий. Часть 11. Исследования общетоксического действия.
 29. ГОСТ 12.1.007-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. Руководство Р 1.2.3156-13.
 30. Оценка токсичности и опасности химических веществ и их смесей для здоровья человека: Руководство. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2014. 639 с.
 31. *Ross G.J., Watts J.F., Hill M.P., Morrissey P.* // Polymer. 2001. V. 42. P. 403.
 32. *Lyons B.J.* // Radiation Physics and Chemistry. 1994. V. 45. P. 158.

FUNCTIONALIZATION OF POLYPROPYLENE SUBJECTED TO GAMMA-IRRADIATION AND POSTRADIATION HIGH-TEMPERATURE SHEAR GRINDING AND ITS TOXIC PROPERTIES

U. Y. Allayarova^a, S. R. Allayarov^{a,*}, S. V. Demidov^a, R. K. Baimuratova^a, S. D. Chekalina^{a,b},
D. V. Mishchenko^{a,b}, E. N. Klimanova^a, A. B. Abdusalamov^c, D. A. Dixon^d

^a Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Chernogolovka, Russia

^b Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

^c The State Committee of Industrial Safety of the Republic of Uzbekistan, 100011 Tashkent, Uzbekistan

^d University of Alabama, Department of Chemistry, Tuscaloosa, Alabama, USA

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

The results of FT-IR spectral study of polypropylene (PP) subjected to gamma irradiation and postradiation high-temperature shear milling are presented. Absorption peaks of hydroxyl and oxygen-containing groups appear in the IR spectra of air-irradiated PP pellets, the intensity of which decreases markedly in the powder obtained after grinding of irradiated polymer pellets. Toxic properties of PP obtained by grinding by high-temperature shear milling of irradiated polymer pellets were investigated. It was shown that gamma-irradiation of polymer pellets in air has no effect on toxic properties of its powder obtained by grinding of irradiated pellets with 700–4500 kGy dose. It was found that when administered intragastrically to BDF mice₁ PP powder from non-irradiated and irradiated granules is moderately toxic.

Keywords: polypropylene, powder, γ -irradiation, high-temperature shear milling, FT-IR spectra, toxicity

REFERENCES

1. Moore. E.P., Jr. Polypropylene Handbook: Polymerization, Characterization, Properties, Processing, Applications. Munich, Viena, New York: Hanser Publishers, 1996. XIX. 419 P.
2. Tripathi D. Practical Guide to Polypropylene. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire: Rapra Technology Ltd, 2002.
3. Karger-Kocsis J. (ed). Polypropylene: an A-Z reference. Dordrecht: Kluwer, 1999. P. 853.
4. Andreassen E. Infrared and Raman spectroscopy of polypropylene Polymer Science and Technology Series. / J. Karger-Kocsis (ed.). Dordrecht: Springer Netherlands, 1999. P. 320.
5. Fintzou A.T., Badeka A.V., Kontominas M.G., Riganakos K.A. // Radiat. Phys. Chem. 2006. V. 75. P. 87.
6. Goulas A.E., Riganakos K.A., Kontominas M. // ACS Symposium Series. 2004. V.875. P. 290.
7. Yagoubi N., Peron R., Legendre B., Grossiord J.L., Ferrier D. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms., Ferrier D. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 1999. V. 151. P. 247.
8. Darboir J. C., Pavis F., Laizier J. // Ann. Pharm. Er. 1985. V. 43. P. 241.
9. Novikov L.S., Voronina E.N. Prospects of nanomaterials application in space technology: Textbook. Moscow: Universitetskaya kniga, 2008. 188 p.
10. Zhdanovich O.A. // Federal target program "Research and development on priority directions of development of scientific and technological complex of Russia for 2014–2020 years". Report for scientific research. Project № 14.625.21.0035, 2014
11. Allayarov S.R., Korchagin D.V., Allayarova U.Y., Dixon D.A., Mishchenko D.V., Klimanova E.N., Frolov I.A. // High Energy Chemistry. 2021. V. 55. № 1. C. 42.
12. Allayarov S.R., Confer M.P., Demidov S.V., Allayarova U.V., Allayarova U.Yu., Mishchenko D.V., Klimanova E.N., Dixon D.A. // Journal of Fluorine Chemistry. 2021. V. 250. № 109885.
13. Allayarov S.R., Confer M.P., Bogdanova S.A., Rudneva T.N., Allayarova U.Yu., Shaimukhametova I.F. et al. // Radiation Physics and Chemistry. 2022. V. 201. No. 110436.
14. Allayarov S.R., Allayarova U.Y., Klimanova E.N., Demidov S.V., Sashenkova T.E., Blokhina S.V., Mishchenko D.V. // High Energy Chemistry. 2023. V. 57. № 2. P. 125.
15. Allayarova A.S., Shitikova A.V., Feingold I.I., Allayarova U.Yu., Klimanova E.N., Sashenkova T.E. et al. // High Energy Chemistry. 2023. V. 57. № 4. P.304.
16. Holmes. W.A. Polymer Conversion. Materials science series. London: Elsevier Science Ltd, 1975.
17. La Mantia F. Handbook of Plastics Recycling. Smithers Rapra Publishing, 2002. P. 441.
18. Ragaert K., Delva L., Van Geem K. // Waste Management. 2017. V. 69. P. 24.
19. Federal classification catalog of wastes Electronic resource. <https://trn.gov.ru/fkko/?search=полипропилен> (date of reference: 26.06.23).
20. Nikolsky V.G., Dudareva T.V., Krasotkina I.A., Zvereva Y.G., Bekeshev V.G., Rochev V.Y. et al. // Chemical Physics. 2014. V. 33. № 7. P. 87.
21. Berlin A.A., Dudareva T.V., Krasotkina I.A., Nikol'skii V.G. // Polym. Sci. Ser. D. 2018. V. 11. P. 323.

22. *Allayarov S.R., Nikolsky V.G., Sharpatyi V.A., Kispert L.D., Dixon D.A., Belov G.P.* // Proceedings of the scientific and practical conference on the problem: "Polymerization plastics, production and processing, 2006". St. Petersburg, Russia. 2006. P. 117.
23. *Allayarov S.R., Nikolskiy V.G., Dudareva T.V., Sharpatyi V.A., Kispert L.D., Dixon D.A.* // Proceedings of the IV International Conference "Cooperation to Solve Waste Problems", Kharkov, Ukraine, 2007. P. 123.
24. *Malkov G.V., Demidov S.V., Allayarov S.R., Nikolsky V.G., Semavin K.D., Kapasharov A.T., Podvalnaya Yu.V.* // High Energy Chemistry. 2020. V. 54. P. 142.
25. *Olkhov Yu.A., Allayarov S.R., Chernysheva T.E., Barkalov I.M., Kispert L.D., Thresher J.S. et al.* // High Energy Chemistry. 2006. V. 40. P. 355.
26. *Allayarov S.R., Konovalikhin S.V., Olkhov Yu.A., Jackson V.E., Kispert L.D., Dixon D.A. et al.* // J. Fluor. Chem. 2007. V. 128. P. 575.
27. GOST 32644-2014 OECD guidelines for the testing of chemicals. Acute oral toxicity – acute toxic class method.
28. GOST ISO 10993-11-2011 Medical devices. Biological evaluation of medical devices. Part 11. Tests for systemic toxicity.
29. GOST 12.1.007-76 Occupational safety standards system. Noxious substances. Classification and general safety requirements. Guideline R 1.2.3156-13.
30. Assessment of toxicity and hazard of chemical substances and their mixtures for human health: Guidelines. Moscow: Federal Center of Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2014. 639 P.
31. *Ross G.J., Watts J.F., Hill M.P., Morrissey P.* // Polymer. 2001. V. 42. P. 403.
32. *Lyons B.J.* // Radiation Physics and Chemistry. 1994. V. 45. P. 158.