

ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ABS-ПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ПОЛИМЕРА АКРИЛОНИТРИЛ–БУТАДИЕНА–СТИРОЛА

© 2022 г. Э. М. Нуруллаев^{а, *}, В. Д. Онискив^а, С. А. Астафьева^б, Е. А. Лебедева^б

^аПермский национальный исследовательский политехнический университет,
ул. Комсомольский проспект, д. 29, Пермь, 614990 Россия

^бИнститут технической химии Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Академика Королева, д. 3, Пермь, 614013 Россия

*E-mail: ergnur@mail.ru

Поступила в редакцию 08.04.2022 г.

После доработки 10.07.2022 г.

Принята к публикации 12.07.2022 г.

Исследованы механические и структурные характеристики облученных гамма-излучением ABS-пластика на основе высокомолекулярного технического полимера акрилонитрил–бутадиена–стирола. Проведена оценка структуры и механических характеристик ABS-пластика исходного и облученного гамма-излучением на воздухе дозами 50, 100, 150, 200 кГр. Показано, что постобработка гамма-излучением приводит к изменению структуры и механических характеристик исследуемого материала. При облучении дозой в 50 кГр наблюдается резкое увеличение прочности до 26.5 МПа по отношению к исходному образцу, прочность которого составляет 16.5 МПа, при этом увеличивается почти в два раза и деформация. При дозе 100 кГр прочность и деформация несколько снижаются, эта тенденция сохраняется и при дозах облучения 150 и 200 кГр. На основе результатов ИК-спектроскопии предположено, что облучение гамма-излучением приводит к изменению структуры пластика, наблюдается абсорбционный пик в области 3400 см^{-1} , которого не наблюдается для не облученного образца, интенсивность которого увеличивается с ростом дозы облучения. Авторы предлагают результаты исследования использовать для радиационно-стимулированного повышения прочности и пластичности ABS-пластиков.

Ключевые слова: облучение, пластичность, ABS-пластик, прочность, разрыв, разрушение

DOI: 10.31857/S0023119322060146

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время полимеры в различных технических устройствах могут подвергаться воздействию ионизирующего излучения. В результате облучения структура полимеров существенно меняется, что, в свою очередь, приводит к изменениям их физико-механических свойств. В этой связи является актуальным исследование влияния такого воздействия на механические свойства полимерных материалов. Основное влияние ионизирующего излучения на химическую структуру и физические свойства полимеров заключается в том, что при его воздействии главная цепь полимера может претерпевать разрывы или разрушаться, т.е. полимерные молекулы разрываются на более мелкие фрагменты. Кроме того, возможен и процесс сшивания – соединение соседних молекул друг с другом поперечными связями, в

результате чего образуются молекулы более крупных размеров.

Имеющиеся данные позволяют все полимеры, по их отношению к действию излучения, разделить на две большие подгруппы: полимеры, в которых преобладают процессы разрыва молекул (деструкция), и полимеры, в которых наблюдается образование поперечных связей (сшивание). Полимеры, в молекулах которых атомы водорода, находящиеся около атома углерода, заменены на какие-либо другие группы, как правило, деструктурируются. Если же каждый атом углерода цепи имеет хотя бы по одному атому водорода, то преобладает сшивание. Эта закономерность характерна для большинства изученных к настоящему времени полимеров.

Поверхностное радиационное окисление полимера на воздухе благоприятствует последующей деградации [1, 2]. Одним из наиболее удач-

ных объектов радиационной деградации является ПТФЭ (тефлон) [3, 4]. Радиационная переработка резины основывается на деструкции бутилкаучука, при дозе порядка 100 кГр. Установлено, что радиационная деградация улучшает пластичность резиновой крошки [5]. Радиолитическая деградация облегчает переработку целлюлозосодержащих материалов в биэтанол [6]. С ростом поглощенной дозы облегчается перенос продуктов радиолитического распада внутри материала, что упрощает последующий ферментативный гидролиз за счет увеличения доступности внутренних волокон для ферментов [7].

При добавлении стирола в полиолефин можно радиационным способом преобразовать в гидрофобный изоляционный строительный материал [8].

Облучение гамма-излучением при дозах 150 кГр позволяет получить композит на основе изотактического ПП (полиолефин) и ПЭНП (полиэтилен низкой плотности), который может применяться в дорожном строительстве [9]. Метод радиационной прививочной полимеризации перспективен с точки зрения получения функциональных адсорбентов и катионитов из натуральных и синтетических полимеров [10].

Радиационно-термический режим может обеспечивать ряд важных преимуществ благодаря низкой температуре переработки (на 100–200 К) при разложении полимеров и образовании макрорадикалов [11–14]. Авторы [15, 16] показали, что радиолитическая деградация представляет весьма перспективным способом превращения восковых отходов в бензин и дизельное топливо.

В отличие от других методов, высокотемпературный радиолитический способ обеспечивает высокий выход (около 50 мас. %) фуранов из целлюлозы [17, 18]. В частности, диацид годится для получения полиэтилен-фураноата (ПЭФ) путем поликонденсации с этилгликолем [19, 20]. В работе [21] изучены бактерицидные действия гамма-излучения.

Авторы [22] рассмотрели вопросы радиационной поврежденности и разрушения некоторых композитных материалов на примере полиамидных пленок и композиций с монтмориллонитом, а также полиуретановых композитов. Пришли к выводу, что все рассмотренные композиты по 25%-у ухудшению механических свойств более радиационно-стойкие, чем большинство полимеров. Так, даже для наиболее радиационно-стойкого из полимеров – полистирола – 25%-е ухудшение механических свойств соответствует поглощенной дозе 400 кГр. Исследования химического состава поверхности γ -облученных пластинок политетрафторэтилена и политрифторхлорэтилена показали, что в химическом составе облученного политетрафторэтилена уменьшается концентрация фтора, и повышаются концентра-

ции углерода и кислорода в результате деструкции основной цепи полимера с образованием низкомолекулярных соединений, а также из-за реакции окисления свободных радикалов, стабилизирующихся на поверхности облученного полимера. Химический состав поверхности политрифторхлорэтилена, установленный при анализе РФЭ-спектра, заметно изменяется после γ -облучения, что свидетельствует об уменьшении концентрации углерода и повышении концентрации фтора, кислорода и хлора [23]. Соавторы [24] исследовали влияние рентгеновского и гамма-излучения на ряд полимеров, например, ABS-пластик, полипропилен, полиэтилен. При воздействии излучений дозой 125 кГр различными источниками были получены одинаковые результаты, не зависящие от вида излучения. Механические свойства, такие как модуль упругости и прочность не изменились, но ударная вязкость материалов снижалась. Также изменение цвета материалов (из измерений цвета) увеличивалось с увеличением дозы облучения, что указывает на усиление окисления. В работе [25] исследовано влияние различных видов излучения, в том числе гамма, электронное и рентгеновское дозами до 100 кГр. Показано, что большинство свойств облученных пластиков таких как ABS-пластик, полипропилен, полиэтилен не изменяются, кроме полипропилена, где происходит частичная деградация.

Исследование ИК-спектров поглощения полимерных композитных материалов позволяет получить полную и достоверную информацию о структурных изменениях, происходящих в материалах под воздействием различного вида радиационных излучений, что широко используется при исследованиях. Так, например, для определения дефектов в пленках полипропилена авторами [26] была использована характеристическая частота около 1700 см^{-1} (карбонильная группа). Этот метод позволяет получить информацию о структуре пленок и их дефектах. В ИК-спектрах композитов, облученных электронами дозами 40 и 70 кГр, наблюдаются полосы поглощения в области $1700\text{--}1750\text{ см}^{-1}$ с максимумом 1712 см^{-1} , свидетельствующие о наличии дефектов в виде карбонильных групп [27]. В работе [28] описано влияние ионизирующего излучения на структуру и свойства нанокompозитов на основе сверхвысокомолекулярных полиэтиленовых материалов. В результате облучения все композитные материалы получили дозу 50 кГр. Показано, что основными возможными результатами взаимодействия полимерной матрицы с ионизирующим излучением являются процессы сшивки и деструкции, т.е. образование в структуре поперечных связей (поперечно сшитых структур). На всех спектрах появляются линии, характерные для эстеров $1241, 1208, 1207, 1156, 1152\text{ см}^{-1}$. Образование сложных эфиров свидетельствует о том, что в результате ионизирующего

воздействия происходит деструкция и последующее окисление композитных материалов. Также на спектрах композитов появляется линия 1367 см^{-1} , характерная для алкенов. Образование двойной связи свидетельствует о том, что в результате ионизирующего излучения в структуре композита образуются поперечно сшитые структуры.

Анализ литературных источников показывает, что работы, посвященные исследованиям воздействия гамма-излучения на механические характеристики и структуру ABS-пластика на основе высокомолекулярного технического полимера акрилонитрил–бутадиена–стирола практически отсутствуют, хотя этот материал довольно широко применяется в деталях и узлах различных конструкций автомобиле-, авиа-, судостроения, которые могут находиться под воздействием гамма-излучения.

Цель настоящей работы – исследование влияние гамма-излучения на механические характеристики и структуру ABS-пластика на основе высокомолекулярного технического полимера акрилонитрил–бутадиена–стирола.

МАТЕРИАЛ, ОБРАЗЦЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

В качестве объекта исследования выбран доступный коммерческий акрилонитрил бутадиен стирол, ABS-пластик (диаметр прутка $1.75 \pm 5\text{ мм}$), произведенный ООО “Профлекс Плюс”. Для оценки влияния гамма-излучения на исследуемый материал были изготовлены пленки. Пруток измельчали и растворяли в ацетоне. Концентрация пластика в ацетоне составляла 10%. Полученную суспензию затем оставляли при комнатной температуре в открытом фторопластовом лотке (контейнере) и периодически перемешивали для удаления пузырьков; вязкость увеличивалась по мере испарения ацетона. После 24 ч при комнатной температуре образцы выдерживали в сушильном шкафу при температуре 333 К 24 ч, чтобы обеспечить эффективное удаление любого оставшегося ацетона. Затем пленку разрезали на пластинки длиной 0.07 м и шириной 0.01 м. Толщина всех пленок составляла $0.25 \pm 0.01\text{ мм}$. Данные пленки подвергали воздействию гамма-излучения. Далее были исследованы их механические характеристики и структура.

Облучение образцов производилось на предприятии ООО “Кобальт” (г. Соликамск, Пермский край), на промышленных установках – ГУД-300, ГУД-300 М. Дозы облучения гамма-излучением радиоактивных источников кобальт 60, следующие: 50, 100, 150, 200 кГр. Время экспозиции зависит от мощности выбранной камеры облучения и составляет от 4 до 30 сут.

Общая активность радиационных источников в используемой камере облучения составляла порядка 30 ККюри. Источники достаточно равно-

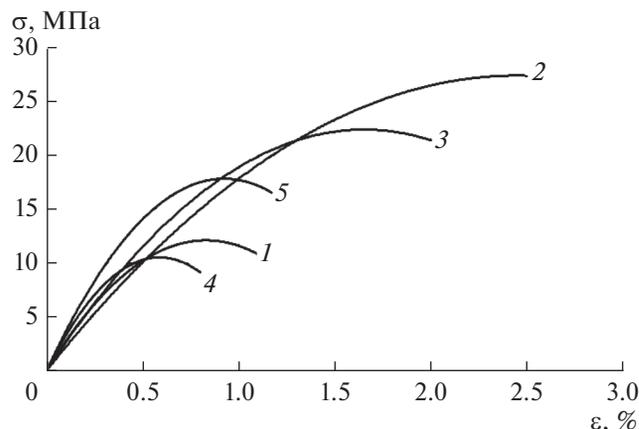


Рис. 1. Зависимость условного напряжения от деформации гамма облученного образца дозами: 1 – 0, 2 – 50, 3 – 100, 4 – 150, 5 – 200 кГр. Эксперименты проводились при температуре 298 К.

мерно (по мощности) размещены вдоль прямой линии (2.5 м). Геометрические размеры образцов сравнительно невелики, что позволяет полагать радиационное поле однородным. Процесс облучения проходил при комнатной температуре 298 К. Облучение производится в открытой атмосфере, поэтому влияние кислорода воздуха на полученные экспериментальные данные, безусловно, не следует исключать. Необходимо также отметить, что промежуток времени между моментом окончания процедуры облучения и временем проведения механических экспериментов был по нашему мнению достаточным для достижения стабилизации внутреннего состояния материала (2–3 недели).

Механические характеристики образцов определяли на универсальной испытательной машине INSTRON-336550 с относительной скоростью растяжения – 10 мм/мин. Количество параллельных испытаний – 3. Температуры экспериментов – 298 К. Статистическая достоверность экспериментальных данных – 3%. Расчеты производились по средним значениям из трех измерений для всех доз облучения.

Для изучения изменений, происходящих на поверхности пластика, использовали инфракрасную спектроскопию (ИК, FTIR) с преобразованием Фурье. ИК-спектры снимали методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) от 4000 до 400 см^{-1} при частоте съемке 4 см^{-1} с помощью спектрометра IFS66/S (Bruker, Германия).

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДВЕРГНУТЫХ ВОЗДЕЙСТВИЮ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

Экспериментальные результаты приведены на рис. 1. Анализ данных показывает, что, у необлученного образца условная прочность равна 16.55 МПа

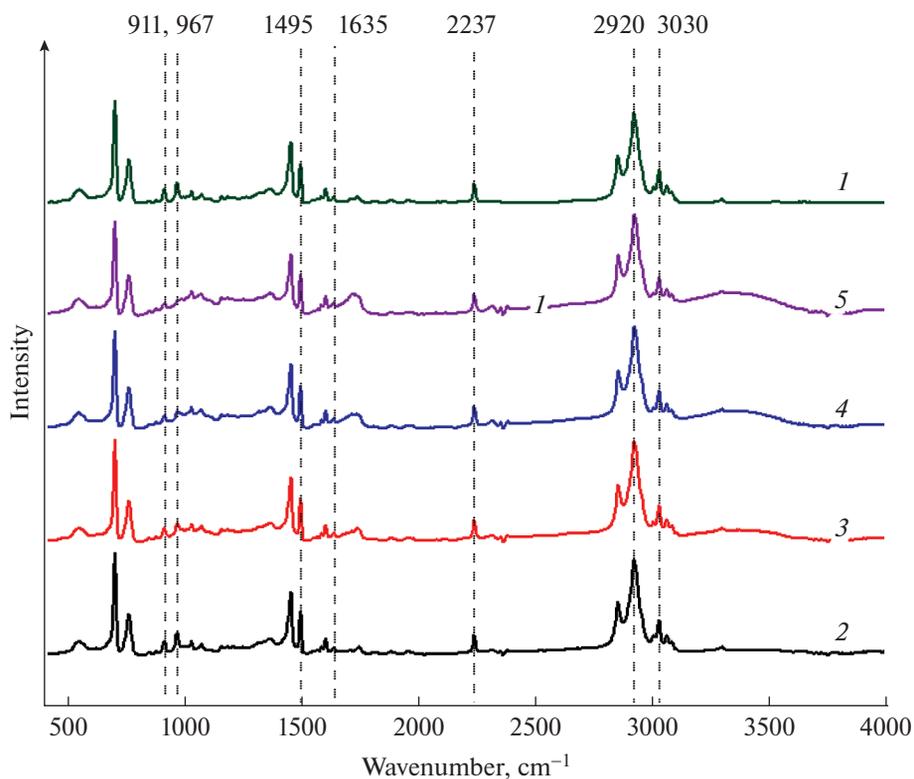


Рис. 2. ИК-спектры материала акрилонитрил – бутадиен – стирола при различных дозах облучения: 1 – 0 кГр, 2 – 50 кГр, 3 – 100 кГр, 4 – 150 кГр, 5 – 200 кГр. Эксперименты проводились при температуре 298 К.

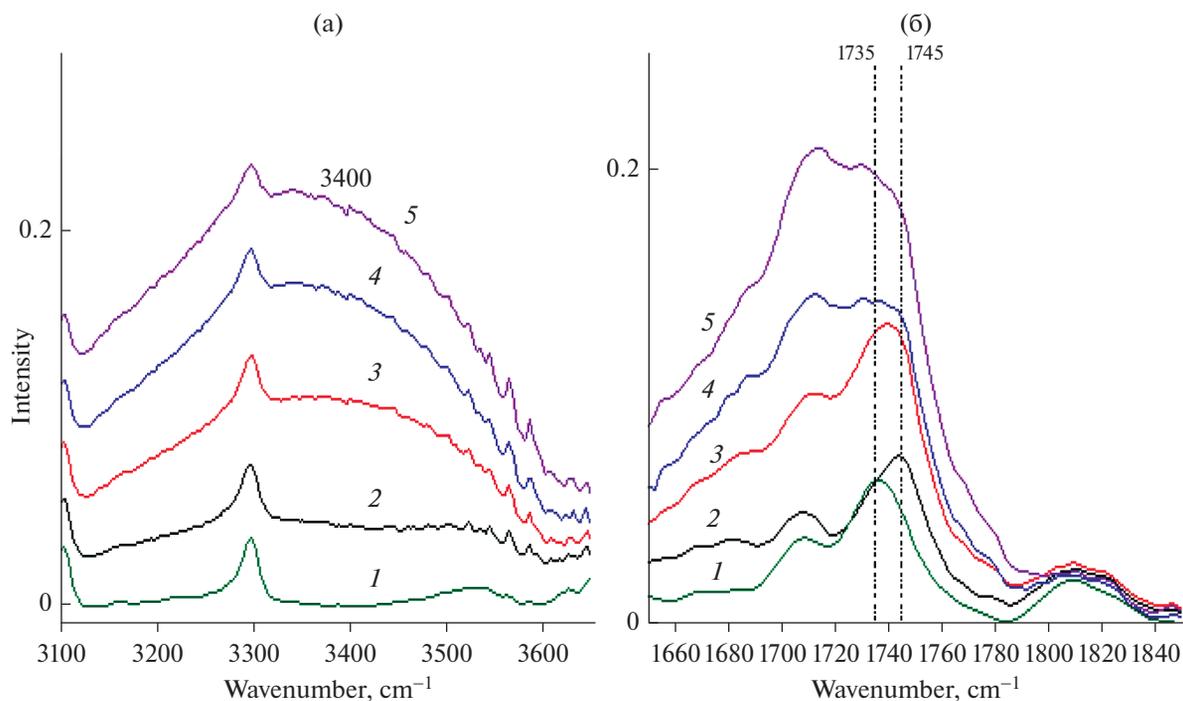


Рис. 3. ИК-спектры материала акрилонитрил – бутадиен – стирола в области $3600\text{--}3120\text{ см}^{-1}$ (а) и $1850\text{--}1650\text{ см}^{-1}$ (б) при различных дозах облучения: 1 – 0 кГр, 2 – 50 кГр, 3 – 100 кГр, 4 – 150 кГр, 5 – 200 кГр. Эксперименты проводились при температуре 298 К.

при условной деформации 1.17% (рис. 1, кривая 1). При облучении дозой 50 кГр происходит резкое увеличение условной прочности до 27.4 МПа при увеличении условной деформации более чем в 2 раза до 2.5% по сравнению с исходным образцом (рис. 1, кривая 2). Дальнейшее увеличение дозы облучения до 100 кГр приводит к снижению условной прочности до 21.4 МПа и условной деформации до 2% (рис. 1, кривая 3). При 150 КГр происходит некоторая аномалия в поведении условной прочности, она снижается до 9.1 МПа и условной деформации, снижение до 0.8% (рис. 1, кривая 4). При увеличении дозы облучения до 200 кГр наблюдается некоторый рост условной прочности до 10.8 МПа и условной деформации до 1.08% (рис. 1, кривая 5).

Авторы предположили, что такие изменения условной прочности и деформации, происходящие под воздействием различных доз гамма-излучения, могут быть связаны со структурными изменениями в материале. Для подтверждения наших предположений провели исследования зависимости структурных изменений от дозы облучения ABS-пластика с использованием метода инфракрасной спектроскопии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИК-СПЕКТРОВ

На рис. 2 представлены спектры ИК-НПВО ABS-пластика, подвергнутых воздействию гамма-излучения при разной дозе облучения. Для всех образцов наблюдается ряд пиков, типичных для данного термопласта. В областях $3030\text{--}3000\text{ см}^{-1}$ и $2920\text{--}2850\text{ см}^{-1}$ наблюдаются колебания, характеризующие валентные колебания ароматических и алифатических С–Н связей соответственно. Деформационные колебания С–Н наблюдаются в областях 967 и 911 см^{-1} (вследствие разной изомеризации бутадиенового сополимера 1.2, 1.4). Пик 1067 см^{-1} также указывает на наличие кумулированных связей, а, следовательно, и на наличие изомера бутадиена 1.2. В области 2235 см^{-1} находится узкий пик, соответствующий связи $\text{C}\equiv\text{N}$ акрилонитрила. Связи $\text{C}=\text{C}$ в ароматическом кольце и алифатическом сегменте характеризуют, соответственно, валентные колебания 1601 и 1635 см^{-1} . С пиком 1601 см^{-1} согласуется деформационный пик 1450 см^{-1} . Полученные результаты согласуются со следующими работами [29–31].

В областях валентных колебаний гидроксильных ($3600\text{--}3120$) и карбонильных ($1850\text{--}1650$) групп наблюдается появление широкой полосы и на ее фоне пик 3300 см^{-1} , интенсивность которого уменьшается с ростом дозы облучения. Интенсивность широкой полосы растет с увеличением дозы (рис. 3а), что характеризует увеличение кислотосодержащих групп.

Видно (рис. 3а), что для необлученного образца не наблюдаются абсорбционных пиков в области 3400 см^{-1} , в то время, как с увеличением дозы облучения интенсивность широкой полосы в данной области значительно возрастает, начиная с 100 кГр. Данный факт можно интерпретировать увеличением содержания кислотных и спиртовых групп [29]. Также отмечается рост интенсивности пика в области 3300 см^{-1} , что, вероятно, связано с фотоокислительными процессами [29], которые наблюдаются уже при дозе 50 кГр.

Из рис. 3б видно, что при дозе 50 кГр наблюдается исчезновения пика 1735 см^{-1} и появления пика 1740 см^{-1} интенсивность которого уменьшается с ростом дозы облучения. Это связано со сдвигом полосы карбонила. Вероятно, данный факт связан с остатками растворителя [32] в образце необлученного пластика, который влияет на сдвиг полосы в длинноволновую область. Также одним из факторов сдвига в область больших значений может быть уменьшение доли водородных связей в сопряженных системах структуры полимера в процессе окисления. Анализируя график, стоит отметить, что увеличение интенсивности в данной области не равномерно; наиболее значительные увеличения наблюдаются при дозах облучения 50 кГр при дозах 100 и 200 кГр наблюдается уменьшение интенсивности.

Можно предположить, что резкое увеличение условной прочности и деформации образца при дозе облучения гамма-излучением 50 кГр связано, именно с уменьшением доли водородных связей в сопряженных системах структуры полимера в процессе окисления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что воздействие гамма-излучения приводит к резкому изменению условной прочности и условной деформации ABS-пластика. При дозе облучения 50 кГр происходит осязаемое возрастание условной прочности от 16.55 МПа и условной деформации 1.17% для исходного образца до 27.4 МПа и условная деформация возрастает до 2.5%. Дальнейшее увеличение дозы до 100 кГр приводит к снижению условной прочности до и условной деформации. При 150 КГр происходит некоторая аномалия в поведении условной прочности и условной деформации. При увеличении дозы облучения до 200 кГр наблюдается некоторый рост условной прочности и условной деформации.

На основании исследований ИК-спектров можно предположить, что резкое увеличение условной прочности и деформации образца при дозе облучения гамма-излучением 50 кГр связано с уменьшением доли водородных связей в сопряженных системах структуры полимера в процессе

окисления. Авторы предлагают результаты исследования использовать для радиационно-стимулированного повышения прочности и пластичности материала акрилонитрил–бутадиен–стирола (ABS-пластика).

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования проведены при финансовой поддержке Пермского края в виде гранта по проекту: “Модели, методы и цифровые технологии для создания функциональных композиционных и полимерных материалов с помощью их обработки концентрированными потоками гамма-квантов в различных газовых средах” (Соглашение № С-26/581).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ponomarev A.V., Chulkov V.N., Bludenko A.V. // Recycling of Polymer Wastes by Radiation. Report of IAEA Technical Meeting. EVT1804861. 30.09.04.10.2019. Vienna, Austria. 2019. P. 99.
2. Guven O. // Recycling of Polymer Wastes by Radiation. Report of IAEA Technical Meeting. EVT1804861. 30.09.–04.10.2019. Vienna, Austria. 2019. P. 99.
3. Silva L.G.A. // Recycling of Polymer Wastes by Radiation. Report of IAEA Technical Meeting. EVT1804861. 30.09.–04.10.2019. Vienna, Austria. 2019. P. 21.
4. Ratnam C.T., Dubey K.A., Appadu S., Bhardwaj Y.K. // Recycling of Polymer Wastes by Radiation. Report of IAEA Technical Meeting. EVT1804861. 30.09.–04.10.2019. Vienna, Austria. 2019. P. 47.04.10.2019. Vienna, Austria. P. 89. 2019.
5. Gohs U. // Recycling of Polymer Wastes by Radiation. Report of IAEA Technical Meeting. EVT1804861. 30.09.–04.10.2019. Vienna, Austria. 2019. P. 26.
6. Saini A., Aggarwal N.K., Sharma A., Yadav A. // Biotechnol. Res. Int. 2015. V. 2015. Article ID 157139. 13 p. <https://doi.org/10.1155/2015/157139>
7. Gryczka U., Migdal W., Chmielewska D., Antoniak M., Kaszuwara W., Jastrzebska A., Olszyna A. // Radiat. Phys. Chem. 2014. V. 94. P. 226.
8. Jeong J.-O., Park J.-S., Lim Y.-M. // Materials (Basel). 2016. V. 9. P. 441. <https://doi.org/10.3390/ma9060441>
9. Fel E., Khrouz L., Massardier V., Cassagnau P., Bonnevot L. // Polymer. 2016. V. 82. P. 217. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2015.10.070>
10. Chaudhari C.V., Guin J.P., Dubey K.A., Bhardawaj Y.K., Varshney L. // Environ. Prog. Sust. Energy, 2016. V. 35. P. 1367. <https://doi.org/10.1002/ep.12360>
11. Elordi G., Olazar M., Lopez G., Artetxe M., Bilbao J. // Ind. Eng. Chem. Res. 2011. V. 50. P. 6061. <https://doi.org/10.1021/ie2002999>
12. Efika E.C., Onwudili J.A., Williams P.T. // J. Anal. Appl. Pyrolysis. 2015. V. 112. P. 14. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.01.004>
13. Kluska J., Klein M., Kazimierski P., Kardaś D. // Arch. Thermodyn. 2014. V. 35. P. 141. <https://doi.org/10.2478/aoter-2014-0009>
14. Gorbarev I.N., Vlasov S.I., Chulkov V.N., Bludenko A.V., Ponomarev A.V. // Radiat. Phys. Chem. 2019. V. 158. P. 64.
15. Metreveli A.K., Ponomarev A.V. // High Energy Chemistry. 2016. V. 50. № 4. P. 254. <https://doi.org/10.7868/S0023119316040136>
16. Metreveli A.K., Ponomarev A. // Radiat. Phys. Chem. 2016. V. P. 124 212. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.02.00217>
17. Ponomarev A.V., Ershov B.G. // Molecules. 2014. V. 19. P. 16877. <https://doi.org/10.3390/molecules191016877>
18. Ponomarev A.V., Ershov B.G. // Radiat. Phys. Chem. 2018. V. 152. P. 63. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.07.004>
19. Gandini A., Belgacem M.N. // in Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources. Eds.: Belgacem M.N. and Gandini A. Amsterdam: Elsevier. 2008. P. 115. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045316-3.00006-5>
20. Gandini A., Lacerda T.M. // Prog. Polym. Sci. 2015. V. 48. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.11.002>
21. Yu J., Wu W., Xue L., Sun Y. // Applied Clay Science. 2015. № 114. P. 112.
22. Kozhamkulov B.A., Kupchishin A.I., Bitibaeva Z.M., Tamuzs V.P. // Mechanics of composite materials. 2017. V. 53. № 1. P. 59.
23. Allayarov S.R., Dixon D.A., Allayarova Yu.U., Klimanova E.N., Shaimukhametova I.F., Bogdanova S.A. // High Energy Chemistry 2020. T. 54. № 4. P. 276.
24. Croonenborghs B., Smith M.A., Strain P. // Radiat. Phys. Chem. 2007. 76(11–12). 1676.
25. Burgstaller C., Hofberger T., Gallnbock-Wagner B., Stadlbauer W. // Polym. Eng. Sci. 2021. 61. 39–54. <https://doi.org/10.1002/polb.25553>
26. Тарутина Л.И., Познякова О.Ф. Спектральный анализ полимеров. Л.: Химия, 1986. 248 с.
27. Ахмедов Ф.И., Кулиев А.Д., Ахвердиев Р.Б., Самедова А.С., Гусейнова М.Б. // Электрон. обработка материалов. 2013. Т. 49. № 6. С. 94.
28. Бойков А.А. Дис. ... канд. техн. наук. М., 2017.
29. Li Jiarong, Chen Fu, Yang Long, Jiang Long, Dan Yi // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2017. V. 184. 5. P. 361.
30. Jia Yankun, Chen Jiaxin, Asachara Haruyasu, Hsu Yu-I, Asoh Taka-Aki, Uyama Hiroshi // Polymer, 2020, V. 200. 122592.
31. Asif Muhammad, Latif Anwar, Ali Ahsan, Fuwad Ahmed, Rafique Shahid, Hag Nawaz Muhammad, Shahid Kashif // Radiation Physics and Chemistry. 2022. V. 192. 109931.
32. Vdovenko S., Gerus V., Kukhar V.P. // Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc 2008. Dec 1; 71(3): P. 779.