

УДК 678; 66-978  
AGRIS T01

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/49/04>

## ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ТЕРМОДЕСТРУКЦИИ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

©Чалов К. В., ORCID 0000-0002-6611-9667, SPIN-код: 7489-5329, канд. хим. наук, Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия, [tschalov\\_k@mail.ru](mailto:tschalov_k@mail.ru)

©Луговой Ю. В., ORCID: 0000-0002-0400-8064, SPIN-код: 4270-8180, канд. техн. наук, Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия, [pn-just@yandex.ru](mailto:pn-just@yandex.ru)

©Косивцов Ю. Ю., ORCID: 0000-0002-7414-3253, SPIN-код: 4677-5039, д-р хим. наук, Тверской государственный технический университет,

г. Тверь, Россия, [kosivtsov@science.tver.ru](mailto:kosivtsov@science.tver.ru)

©Сулман Э. М., ORCID: 0000-0003-0203-3386, SPIN-код: 9877-6072, д-р хим. наук, Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия, [sulman@online.tver.ru](mailto:sulman@online.tver.ru)

## STUDY OF THE KINETICS OF THERMAL DESTRUCTION OF CROSSED POLYETHYLENE

©Chalov K., ORCID: 0000-0002-6611-9667, SPIN-code: 7489-5329, Ph.D.,  
Tver State Technical University, Tver, Russia, [tschalov\\_k@mail.ru](mailto:tschalov_k@mail.ru)

©Lugovoy Yu., ORCID: 0000-0002-0400-8064, SPIN-code: 4270-8180, Ph.D.,  
Tver State Technical University, Tver, Russia, [pn-just@yandex.ru](mailto:pn-just@yandex.ru)

©Kosivtsov Yu., ORCID: 0000-0002-7414-3253, SPIN-code: 4677-5039, Dr. habil.,  
Tver State Technical University, Tver, Russia, [kosivtsov@science.tver.ru](mailto:kosivtsov@science.tver.ru)

©Sulman E., ORCID: 0000-0003-0203-3386, SPIN-code: 9877-6072, Dr. habil.,  
Tver State Technical University, Tver, Russia, [sulman@online.tver.ru](mailto:sulman@online.tver.ru)

*Аннотация.* В данной работе представлено исследование процесса термической деструкции сшитого полиэтилена. Была исследована кинетика разложения полимера методом термогравиметрии. Сшитый полиэтилен проявил высокую термостойкость до температур 400 °С. Определен температурный интервал 430–500 °С потери основной массы образцом. Согласно данным термогравиметрии процесс разложения протекает одностадийно и включает в себя большое количество реакций разрыва, циклизации, дегидрирования и других. Был исследован процесс пиролиза сшитого полимера в металлическом реакторе со стационарным слоем. Исследовано влияния температуры процесса на выход твердых, жидких и газообразных продуктов пиролиза. Оптимальная температура процесса составила 500 °С. При данной температуре выход жидких и газообразных продуктов составил 85,0 и 12,5% (масс.) соответственно. Образцы сшитого полиэтилена разлагались практически полностью. Количество углеродсодержащего остатка составляло 3,5% от массы исходного сырья. С увеличением температуры незначительно снижался выход жидких продуктов и увеличивался выход газообразных, но их суммарный выход не увеличивался. Для газообразных продуктов был определен качественный и количественный состав. Основными компонентами пиролизного газа являлись углеводороды C<sub>1</sub>–C<sub>4</sub>. Теплота сгорания пиролизного газа, полученного при температуре 500 °С, составляла 17 МДж/м<sup>3</sup>. Таким образом процесс пиролиза может использоваться для переработки отходов сшитого полиэтилена с получением жидких углеводородов и горючих газов.

*Abstract.* This paper presents a study of the process of thermal degradation of crosslinked polyethylene. The kinetics of polymer decomposition was studied by thermogravimetry. Crosslinked polyethylene showed high heat resistance to temperatures of 400 °C. The temperature

range of 430–500 °C was determined for the loss of the bulk of the sample. According to thermogravimetric data, the decomposition process proceeds in a single stage and includes a large number of fracture, cyclization, dehydrogenation, and other reactions. The process of pyrolysis of a crosslinked polymer in a stationary-bed metal reactor was investigated. The influence of the process temperature on the yield of solid, liquid, and gaseous pyrolysis products was investigated. The optimum process temperature was 500 °C. At this temperature, the yield of liquid and gaseous products was 85.0 and 12.5% (mass.), Respectively. Samples of crosslinked polyester decomposed almost completely. The amount of carbon-containing residue was 3.5% by weight of the feedstock. With increasing temperature, the yield of liquid products decreased slightly, and the yield of gaseous products increased, but their total yield did not increase. For gaseous products, a qualitative and quantitative composition was determined. The main components of the pyrolysis gas were hydrocarbons C<sub>1</sub>–C<sub>4</sub>. The calorific value of pyrolysis gas obtained at a temperature of 500 °C was 17 MJ/m<sup>3</sup>. Thus, the pyrolysis process can be used to process crosslinked polyethylene wastes to produce liquid hydrocarbons and combustible gases.

*Ключевые слова:* пиролиз, сшитый полиэтилен, деструкция, углеводороды.

*Keywords:* pyrolysis, crosslinked polyethylene, destruction, hydrocarbons.

### *Введение*

Проблема переработки отходов сшитого полиэтилена с каждым годом становится все более актуальной. Это связано с увеличением доли использования сшитого полиэтилена для производства изоляционных материалов способных в ряде областей заменить традиционные материалы, используемые для данных целей – поливинилхлорид и полиэтилен.

В настоящее время на долю полиэтиленов приходится более 40% всего рынка товарных пластмасс [1]. Полиэтилен наиболее широко распространен за счет относительно низкой стоимости и легкой обработки изделий из полиэтилена.

При высоких температурах более 75 °C полиэтилен, будет размягчаться и течь, теряя свои физические свойства, что приводит к ограничению его применения. Поэтому сшивание полиэтилена осуществляется для сохранения желаемых свойств в более высоком температурном интервале.

Сшитый полиэтилен применяется при производстве деталей способных выдерживать воздействие достаточно высоких температур без существенного изменения его прочностных и эксплуатационных характеристик. Сшитый полиэтилен обладает рядом преимуществ, таких как термическая устойчивость, износостойкость, химическая устойчивость, устойчивость к разрушению под напряжением, низкие диэлектрические потери и множеством других свойств [2–4]. Эти свойства обуславливают использование сшитого полиэтилена в производстве изоляции кабелей, сантехнических труб и фитингов для горячего водоснабжения [2–3]. В настоящее время мировой объем выпуска труб из сшитого полиэтилена постоянно растет и в настоящий момент превышает 260 тыс тонн [5].

С другой стороны, термическая и химическая стабильность сшитого полиэтилена создает сложности при переработке его отходов. Сшитая структура полиэтилена препятствует возможности экструзионной переработки данных отходов в отличие от отходов термопластов. Поэтому большинство отходов сшитого полиэтилена сжигается в качестве топлива или подвергается захоронению [6–8].

В настоящее время существует несколько подходов реализуемых при осуществлении попыток разработки эффективного промышленного метода переработки отходов сшитого

полиэтилена. Основой всех существующих направлений переработки сшитого полиэтилена является воздействие различных факторов на сшивки, способных разрушить трехмерную сетчатую структуру тем самым изменить физико-химические свойства полимера, придав ему некую термопластичность, свойственную исходному полиэтилену.

Термическое воздействие на сшивки в полимере осуществляется в процессах термического или термокаталитического крекинга сшитого полиэтилена, что приводит к образованию жидких продуктов, однако, следует отметить, селективное влияние на сшивки в полиэтилене посредством данных подходов труднодостижимо в силу наличия различных конкурирующих между собой реакций разрыва полимерной цепи [3].

Другим направлением исследований в области переработки отходов сшитого полиэтилена является использования сверхкритического флюида [9]. По данным работ [9–12] использование сверхкритического этилового/метилового спирта или воды позволяет достаточно селективно разрушать силановые сшивки полимерной цепи в сверхсшитом полиэтилене, используемом для изготовления электрической изоляции кабеля, без значимой потери молекулярной массы полимера.

Следует отметить, данный метод имеет относительно низкую производительность, к тому же использование сверхкритических условий требует наличия высокотехнологического оборудования и энергетических затрат, что лимитирует использование данной технологии с экономической точки зрения.

Другим подходом использования вторичного сшитого полиэтилена является получение связующих материалов посредством его термической переработки. По мнению исследователей [1, 13–16] полученные материалы могут найти применение в качестве связующих для асфальтных смесей и асфальтных покрытий, модифицированных резиновой крошкой. Учитывая технологическую сложность, а также множество технологических стадий промышленное внедрение данных технологий, скорее всего, будет ограничено экономическими факторами.

Несколько иным направлением исследований процесса утилизации отходов сшитого полиэтилена является дробление сшитого полиэтилена и его смешивание с различными термопластами для дальнейшего формования с целью изготовления полимерных деталей различного назначения [17–18]. Этот метод не нашел применения на практике из-за существенных различий в характеристиках получаемых изделий, поскольку на это влияет множество факторов, к тому же существуют ограничения по количеству вносимого измельченного вторичного сшитого полиэтилена.

Согласно современным источникам проведено достаточно большое количество исследований в области пиролиза полиэтилена [19–20] и относительно не много работ затрагивающих изучение пиролиза сшитого полиэтилена [21–22].

Таким образом, данная работа направлена на изучение кинетики процесса термической деструкции сшитого полиэтилена, что является неотъемлемой составляющей при разработке эффективного метода переработки отходов сшитых полимеров.

#### *Материал и методы исследования*

Исследование процесса термодеструкции сшитого полиэтилена проводилось на пиролизной установке (Рисунок 1). Она состоит из стального реактора (2) со стационарным слоем, оснащенного штуцером (1) для продувки инертным газом, пробоотборника газа (4), сборника жидких продуктов (6), гидрозатвора (7) и эвдиометра (8) для сбора пиролизного газа. При помощи мерного цилиндра 9, соединенного с эвдиометром, фиксировался объем образующихся газов. Поддержание и контроль рабочей температуры в реакторе

осуществлялись электрической печью (3), оснащенной терморегулятором (5). Процесс деструкции полимера исследовался в диапазоне температур 450–550 °С.

В качестве исходного сырья использовались образцы пластиковой трубы из сшитого полиэтилена марки РЕ-Ха с фракцией 3–5 мм.

Выход твердых и жидких продуктов определялся по разнице масс реактора и сборника жидких продуктов соответственно. Выход пиролизного газа определялся по разнице масс исходного сырья и масс твердых и жидких продуктов.

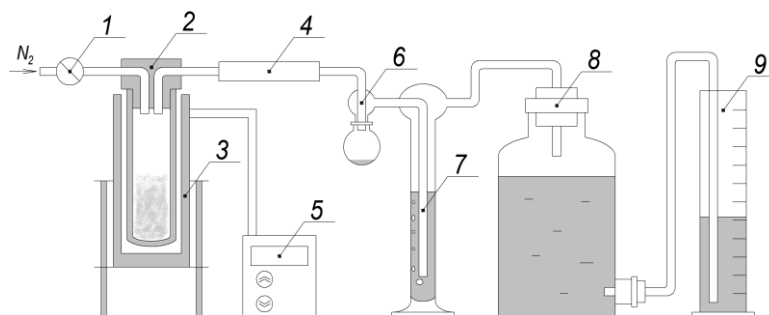


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки пиролиза.

Качественный и количественный состав газообразных продуктов определялся хроматографически при помощи газовых хроматографов «Газохром 2000» и «Кристаллюкс 4000М». Газохром 2000 оснащен детектором по теплопроводности для определения содержания водорода, азота и кислорода, метана, оксида и диоксида углерода. Кристаллюкс 4000М оснащен пламенно-ионизационным детектором для определения углеводородов C<sub>1</sub>–C<sub>4</sub> и пламенно-температурным детектором для определения теплоты сгорания пиролизных газов.

Исследование кинетики процесса деструкции сшитого полиэтилена методом термогравиметрии было проведено на термовесах TG 209 F1 (NETZSCH). Для анализа использовались образцы массой менее 10 мг. Температурная программа состояла из 3-х этапов: термостатирование при 30 °С, далее нагрев образца до 500 °С со скоростью 10 К/мин и выдержка при данной температуре 30 минут. В качестве продувочного газа использовался аргон со скоростью подачи 40 мл/мин.

Обработка экспериментальных данных термогравиметрии процесса пиролиза сшитого полимера осуществлялась с использованием программного обеспечения NETZSCH Proteus.

### *Результаты и обсуждение*

На Рисунке 2 представлены результаты термогравиметрического анализа сшитого полиэтилена. Анализ кривой потери массы от температуры показывает, сшитый полимер в инертной среде проявляет высокую термостабильность. Он не разлагается до температуры 400 °С, что является достаточно высоким показателем. Большинство выпускаемых промышленностью полимеров начинает разрушаться при температуре свыше 250 °С.

Основная потеря массы образцом полимера происходит в интервале температур 450–480 °С. Начало разложения сшитого полиэтилена происходит при температуре 430 °С. Полимер разлагается полностью при температуре 500 °С без образования твердого остатка. Остаточная масса образца при температуре свыше 500 °С близка к нулю.

При рассмотрении дифференциального вида кривой потери массы образцом наблюдается один большой пик. Таким образом, большое разнообразие элементарных реакций распада, дегидрирования, циклизации, изомеризации и других, свойственных

пиролизу, протекают одновременно. Т. е. для повышения селективности процесса в определенные вещества необходимо использование предобработки или специфических условий пиролиза (скорость и время нагрева сырья, давление, катализатор).

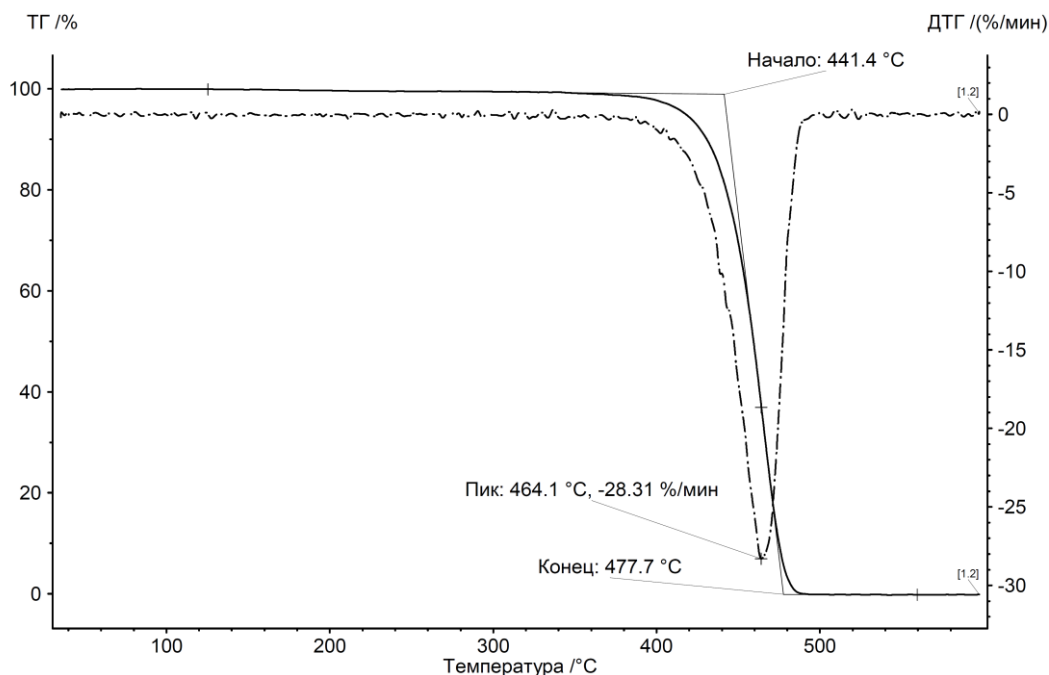


Рисунок 2. Кривые потери массы для сшитого полиэтилена при скорости нагрева 10 К/мин.

Активное разложение сшитого полиэтилена происходило в интервале температур 450–500 °С, поэтому данный диапазон был выбран для исследования пиролиза полимера на экспериментальной установке.

На Рисунке 3 представлены данные по выходу продуктов пиролиза, полученных при разной температуре. Согласно полученным данным, температура 450 °С является минимальной для проведения процесса термодеструкции сшитого полиэтилена. Так как при данной температуре выход твердого остатка составлял 43% (масс.). Твердый остаток представлял собой частично разложившееся сырье в виде аморфного (пастообразного) вещества, в котором произошло разложение пространственной (сшитой) структуры и возможно разрыв макромолекул с уменьшением молекулярной массы. Выход жидких и газообразных продуктов при данной температуре составлял 11,5% и 45% (масс.) соответственно.

Следовательно процесс термодеструкции сшитого полиэтилена при температурах ниже 450 °С можно использовать с целью разрушения сетчатой структуры и получения термопластичного полимера с возможностью его вторичной переработки для термопластов.

При температуре 500 °С наблюдался высокий выход жидких 85% (масс.) и увеличение выхода газообразных продуктов на 1% (масс.). В отличие от результатов термогравиметрического анализа при проведении пиролиза в реакторе со стационарным слоем наблюдался выход углеродсодержащего остатка образца полимера (3,5% масс.). Образование остатка может быть связано с влиянием тепло– и массопереноса на ускорение вторичных реакций смоло– и коксообразования.



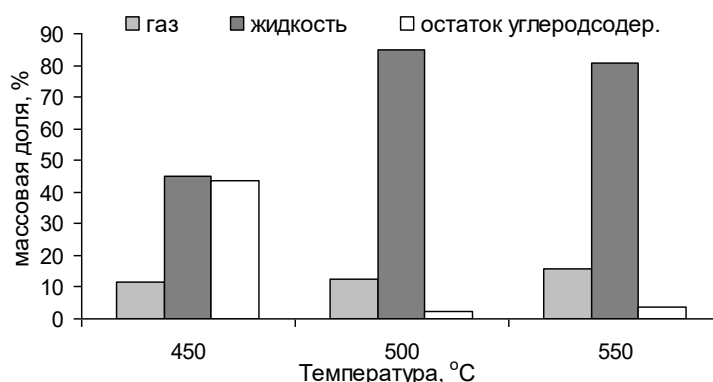


Рисунок 3. Зависимость выхода продуктов пиролиза от температуры процесса.

С повышением температуры процесса до 550 °C наблюдался выход углеродсодержащего остатка, что говорит о влиянии вторичных реакций на процесс разложения сшитого полимера. При данной температуре сохраняется высокий суммарный выход жидких и газообразных продуктов. Однако незначительно снижается выход жидких продуктов (81% масс.) и увеличивается выход газообразных (16% масс.). Это свидетельствует об изменении состава продуктов пиролиза и соответственно об изменении вклада элементарных реакций в процесс деструкции сшитого полиэтилена.

Данные хроматографического анализа показали, что в состав пиролизных газов входят углеводороды  $C_1$ – $C_4$ , водород, оксид и диоксид углерода. Необходимо отметить, что содержание водорода, оксид и диоксид углерода в газообразных продуктах, полученных при различной температуре пиролиза не превышало 1% об. Низкое содержание оксида и диоксида углерода связано с низким массовым содержанием кислорода (в виде пероксидных сшивок) в исходном образце и проведением процесса в инертной среде ( $N_2$ ). Невысокое содержание водорода может быть связано с низкими скоростями реакций дегидрирования по сравнению с реакциями разрыва углеродной цепи при данных температурах, так как энергия разрыва связи C–C на несколько кДж/моль ниже чем энергия разрыва связи C–H.

Исходя из данных Рисунка 3, с ростом температуры процесса происходит увеличение выхода газообразных углеводородов  $C_1$ – $C_4$  во всем исследуемом интервале температур. При повышении температуры процесса от 450 до 500 °C увеличивается объем образующихся углеводородов  $C_1$ – $C_4$  более чем в 4 раза. При дальнейшем повышении температуры до 550 °C наблюдалось увеличение объема метана, этана и этилена на 24, 14 и 36% соответственно. Объем углеводородов  $C_3$ – $C_4$  практически не изменялся. Данные по объему образующихся пиролизных газов согласуются с данными по выходу газообразных продуктов.

В Таблице представлена зависимость теплоты сгорания пиролизных газов от температуры процесса пиролиза.

Таблица.

#### ТЕПЛОТА СГОРАНИЯ ПИРОЛИЗНЫХ ГАЗОВ

Температура	Значение, МДж/м <sup>3</sup>
450	2,91
500	16,26
550	18,68

С повышением температуры процесса происходит увеличение теплоты сгорания газов, которое связано с повышением содержания горючих компонентов (Рисунок 4). При увеличении температуры процесса от 450 до 500 °C наблюдалось скачкообразное увеличение

теплоты сгорания пиролизных газов, связанное с многократным увеличением содержания углеводородов  $C_1$ – $C_4$  в газе. В интервале температур 500–550 °С теплота сгорания газа изменяется незначительно и составляет порядка 17–18 МДж/м<sup>3</sup>.

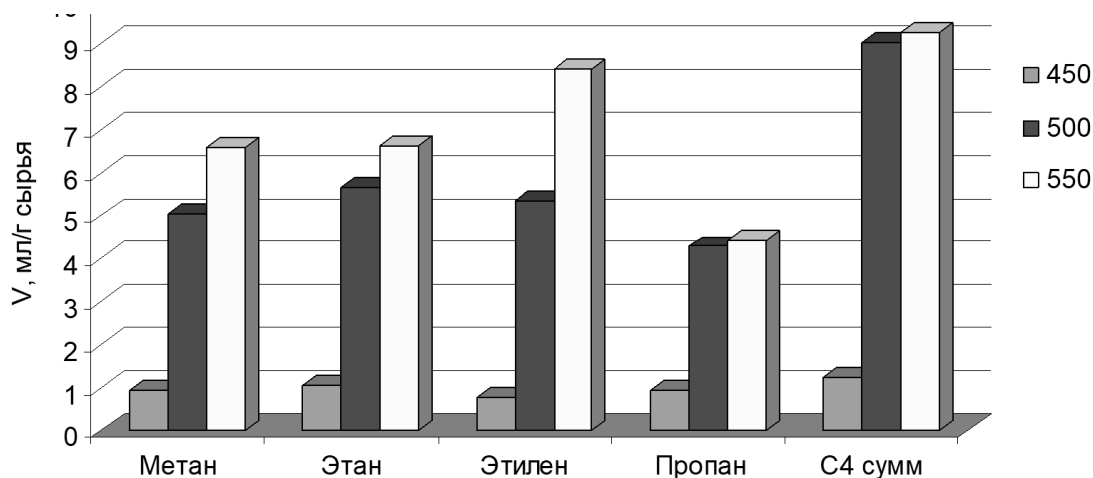


Рисунок 4. Содержание углеводородов в пиролизном газе полученном при различной температуре.

#### Заключение

Термогравиметрический анализ показал, что сшитый полиэтилен термически стабилен до температур 400 °С. Полимер разлагается полностью при температуре 500 °С без образования твердого остатка. Остаточная масса образца при температуре свыше 500 °С близка к нулю.

Оптимальная температура процесса пиролиза составляет 500 °С. При данной температуре наблюдался высокий выход жидких и газообразных продуктов с высокой теплотой сгорания. Проведение процесса пиролиза при температуре свыше 500 °С не приводит к значительному увеличению выхода жидких и газообразных продуктов, а теплота сгорания газов возрастает на 2 МДж/м<sup>3</sup>. Повышение температуры требует дополнительных затрат энергии на нагрев сырья.

Для создания термического метода переработки отходов сшитого полиэтилена требуются особые условия: температура не менее 450 °С; небольшой размер частиц для снижения негативного влияния низкой скорости диффузии тепла, характерной для данного полимера.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований (проект № 19-08-00188).*

#### Список литературы:

1. Хазарова Т. Рынки ПЭ и ПП: движение к профициту // Пластикс. 2016. №1-2 (153). С. 46-49.
2. Mo S. J., Zhang J., Liang D., Chen H. Y. Study on pyrolysis characteristics of cross-linked polyethylene material cable // Procedia Engineering. 2013. V. 52. P. 588-592. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.190>
3. Tamboli S. M., Mhaske S. T., Kale D. D. Crosslinked polyethylene // Indian Journal of Chemical Technology. 2004. V. 11. P. 853-864. <https://doi.org/10.1021/cen-v032n014.p1392>

4. Du Y., Jiang X., Lv G., Jin Y., Wang F., Chi Y., ... Buekens A. TG-DSC and FTIR study on pyrolysis of irradiation cross-linked polyethylene // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2017. V. 19. №4. P. 1400-1404. <https://doi.org/10.1007/s10163-016-0530-z>
5. Tokuda S., Horikawa S., Negishi K., Uesugi K., Hirukawa H. Thermoplasticizing technology for the recycling of crosslinked polyethylene // *Furukawa Rev.* 2003. V. 23. P. 88-93.
6. Goto T. et al. Selective decomposition of the siloxane bond constituting the crosslinking element of silane-crosslinked polyethylene by supercritical alcohol // *Journal of applied polymer science*. 2008. V. 109. №1. P. 144-151. <https://doi.org/10.1002/app.27928>
7. Watanabe S., Komura K., Nagaya S., Morita H., Nakamoto T., Hirai S., Aida F. Development of cross-linked polymer material recycling technology by supercritical water // *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. IEEE*, 2003. V. 2. P. 595-598. <https://doi.org/10.1109/ICPADM.2003.1218487>
8. Marcilla A., Ruiz-Femenia R., Hernández J., García-Quesada J. C. Thermal and catalytic pyrolysis of crosslinked polyethylene // *Journal of analytical and applied pyrolysis*. 2006. V. 76. №1-2. P. 254-259. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2005.12.004>
9. Goto T., Yamazaki T., Sugeta T., Okajima I., Sako T. Selective decomposition of the siloxane bond constituting the crosslinking element of silane-crosslinked polyethylene by supercritical alcohol // *Journal of applied polymer science*. 2008. V. 109. №1. P. 144-151. <https://doi.org/10.1002/app.27928>
10. Goto T., Yamazaki T. Recycling of silane cross-linked polyethylene for insulation of cables using supercritical alcohol // *Hitachi Cable Review*. 2004. V. 23. P. 24-27.
11. Hong S. M., Cho H. K., Koo C. M., Lee J. H., Park W. Y., Lee H. S., Lee Y. W. Decrosslinking of Cross-linked Polyethylene using Supercritical Methanol // *Korean Chemical Engineering Research*. 2008. V. 46. №1. P. 63-68.
12. Goto T., Yamazaki T., Sugeta T., Okajima I., Sako T. Selective decomposition of the siloxane bond constituting the crosslinking element of silane-crosslinked polyethylene by supercritical alcohol // *Journal of applied polymer science*. 2008. V. 109. №1. P. 144-151. <https://doi.org/10.1002/app.27928>
13. Santana R. C., Manrich S. Studies on Thermo-Mechanical Properties of Post-Consumer High Impact Polystyrene in Five Reprocessing Steps // *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*. 2002. V. 18. №2. P. 99-110. <https://doi.org/10.1177/147776060201800202>
14. Edwards Y., Tasdemir Y., Isacson U. Effects of commercial waxes on asphalt concrete mixtures performance at low and medium temperatures // *Cold Regions Science and Technology*. 2006. V. 45. №1. P. 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2006.01.002>
15. Edwards Y., Tasdemir Y., Isacson U. Rheological effects of commercial waxes and polyphosphoric acid in bitumen 160/220-low temperature performance // *Fuel*. 2006. V. 85. №7-8. P. 989-997. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.09.014>
16. Edwards Y., Tasdemir Y., Isacson U. Influence of commercial waxes and polyphosphoric acid on bitumen and asphalt concrete performance at low and medium temperatures // *Materials and structures*. 2006. V. 39. №7. P. 725-737. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9134-8>
17. Tokuda S., Horikawa S., Negishi K., Uesugi K., Hirukawa H. Thermoplasticizing technology for the recycling of crosslinked polyethylene // *Furukawa Rev.* 2003. V. 23. P. 88-93.
18. Carlson D., Nie L., Narayan R., Dubois P. Maleation of polylactide (PLA) by reactive extrusion // *Journal of applied polymer science*. 1999. V. 72. №4. P. 477-485. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19990425\)72:4%3C477::AID-APP3%3E3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19990425)72:4%3C477::AID-APP3%3E3.0.CO;2-Q)



19. Schirmer J., Kim J. S., Klemm E. Catalytic degradation of polyethylene using thermal gravimetric analysis and a cycled-spheres-reactor // *Journal of analytical and applied pyrolysis*. 2001. V. 60. №2. P. 205-217. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(00\)00197-2](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(00)00197-2)
20. Takuma K., Uemichi Y., Sugioka M., Ayame A. Production of aromatic hydrocarbons by catalytic degradation of polyolefins over H-gallosilicate // *Industrial & engineering chemistry research*. 2001. V. 40. №4. P. 1076-1082. <https://doi.org/10.1021/ie000638j>
21. Archer E., Klein A., Whiting K. *Waste Management World*. James & James Science Publishers, 2004. P. 3.
22. Hamidi N., Tebyanian F., Massoudi R., Whitesides L. Pyrolysis of household plastic wastes // *British Journal of Applied Science & Technology*. 2013. V. 3. №3. P. 417-439. <https://doi.org/10.9734/BJAST/2014/1984>

#### References:

1. Khazarova, T. (2016). Rynki PE i PP: dvizhenie k profitsitu. *Plastiks*, (1-2), 46-49. (in Russian).
2. Mo, S. J., Zhang, J., Liang, D., & Chen, H. Y. (2013). Study on pyrolysis characteristics of cross-linked polyethylene material cable. *Procedia Engineering*, 52, 588-592. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.190>
3. Tamboli, S. M., Mhaske, S. T., & Kale, D. D. (2004). Crosslinked polyethylene. *Indian Journal of Chemical Technology*, 11, 853-864. <https://doi.org/10.1021/cen-v032n014.p1392>
4. Du, Y., Jiang, X., Lv, G., Jin, Y., Wang, F., Chi, Y., ... & Buekens, A. (2017). TG-DSC and FTIR study on pyrolysis of irradiation cross-linked polyethylene. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19(4), 1400-1404. <https://doi.org/10.1007/s10163-016-0530-z>
5. Tokuda, S., Horikawa, S., Negishi, K., Uesugi, K., & Hirukawa, H. (2003). Thermoplasticizing technology for the recycling of crosslinked polyethylene. *Furukawa Rev*, 23, 88-93.
6. Goto, T., Yamazaki, T., Sugeta, T., Okajima, I., & Sako, T. (2008). Selective decomposition of the siloxane bond constituting the crosslinking element of silane-crosslinked polyethylene by supercritical alcohol. *Journal of applied polymer science*, 109(1), 144-151. <https://doi.org/10.1002/app.27928>
7. Watanabe, S., Komura, K., Nagaya, S., Morita, H., Nakamoto, T., Hirai, S., & Aida, F. (2003, June). Development of cross-linked polymer material recycling technology by supercritical water. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, 2, 595-598. *IEEE*. <https://doi.org/10.1109/ICPADM.2003.1218487>
8. Marcilla, A., Ruiz-Femenia, R., Hernández, J., & García-Quesada, J. C. (2006). Thermal and catalytic pyrolysis of crosslinked polyethylene. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 76(1-2), 254-259. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2005.12.004>
9. Goto, T., Yamazaki, T., Sugeta, T., Okajima, I., & Sako, T. (2008). Selective decomposition of the siloxane bond constituting the crosslinking element of silane-crosslinked polyethylene by supercritical alcohol. *Journal of applied polymer science*, 109(1), 144-151. <https://doi.org/10.1002/app.27928>
10. Goto, T., & Yamazaki, T. (2004). Recycling of silane cross-linked polyethylene for insulation of cables using supercritical alcohol. *Hitachi Cable Review*, 23, 24-27.
11. Hong, S. M., Cho, H. K., Koo, C. M., Lee, J. H., Park, W. Y., Lee, H. S., & Lee, Y. W. (2008). Decrosslinking of Cross-linked Polyethylene using Supercritical Methanol. *Korean Chemical Engineering Research*, 46(1), 63-68.

12. Goto, T., Yamazaki, T., Sugeta, T., Okajima, I., & Sako, T. (2008). Selective decomposition of the siloxane bond constituting the crosslinking element of silane-crosslinked polyethylene by supercritical alcohol. *Journal of applied polymer science*, 109(1), 144-151. <https://doi.org/10.1002/app.27928>
13. Santana, R. C., & Manrich, S. (2002). Studies on Thermo-Mechanical Properties of Post-Consumer High Impact Polystyrene in Five Reprocessing Steps. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 18(2), 99-110. <https://doi.org/10.1177/147776060201800202>
14. Edwards, Y., Tasdemir, Y., & Isacsson, U. (2006). Effects of commercial waxes on asphalt concrete mixtures performance at low and medium temperatures. *Cold Regions Science and Technology*, 45(1), 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2006.01.002>
15. Edwards, Y., Tasdemir, Y., & Isacsson, U. (2006). Rheological effects of commercial waxes and polyphosphoric acid in bitumen 160/220-low temperature performance. *Fuel*, 85(7-8), 989-997. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.09.014>
16. Edwards, Y., Tasdemir, Y., & Isacsson, U. (2006). Influence of commercial waxes and polyphosphoric acid on bitumen and asphalt concrete performance at low and medium temperatures. *Materials and structures*, 39(7), 725-737. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9134-8>
17. Tokuda, S., Horikawa, S., Negishi, K., Uesugi, K., & Hirukawa, H. (2003). Thermoplasticizing technology for the recycling of crosslinked polyethylene. *Furukawa Rev*, 23, 88-93.
18. Carlson, D., Nie, L., Narayan, R., & Dubois, P. (1999). Maleation of polylactide (PLA) by reactive extrusion. *Journal of applied polymer science*, 72(4), 477-485. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19990425\)72:4%3C477::AID-APP3%3E3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19990425)72:4%3C477::AID-APP3%3E3.0.CO;2-Q)
19. Schirmer, J., Kim, J. S., & Klemm, E. (2001). Catalytic degradation of polyethylene using thermal gravimetric analysis and a cycled-spheres-reactor. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 60(2), 205-217. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(00\)00197-2](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(00)00197-2)
20. Takuma, K., Uemichi, Y., Sugioka, M., & Ayame, A. (2001). Production of aromatic hydrocarbons by catalytic degradation of polyolefins over H-gallosilicate. *Industrial & engineering chemistry research*, 40(4), 1076-1082. <https://doi.org/10.1021/ie000638j>
21. Archer, E., Klein, A., & Whiting, K., (2004). Waste Management World. *James & James Science Publishers*, 3
22. Hamidi, N., Tebyanian, F., Massoudi, R., & Whitesides, L. (2013). Pyrolysis of household plastic wastes. *British Journal of Applied Science & Technology*, 3(3), 417-439. <https://doi.org/10.9734/BJAST/2014/1984>

Работа поступила  
в редакцию 20.11.2019 г.

Принята к публикации  
25.11.2019 г.

---

Ссылка для цитирования:

Чалов К. В., Луговой Ю. В., Косивцов Ю. Ю., Сульман Э. М. Исследование кинетики термодеструкции сшитого полиэтилена // Бюллетень науки и практики. 2019. Т. 5. №12. С. 37-46. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/49/04>

Cite as (APA):

Chalov, K., Lugovoy, Yu., Kosivtsov, Yu., & Sulman, E. (2019). Study of the Kinetics of Thermal Destruction of Crossed Polyethylene. *Bulletin of Science and Practice*, 5(12), 37-46. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/49/04> (in Russian).