

Е. В. Туркова (асп.), К. Г. Кичатов (к.х.н., доц.),  
Т. Р. Просочкина (д.х.н., проф.), Ф. Ш. Вильданов (к.т.н., доц.)

## ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИПРОПИЛЕНА И ЭПОКСИДНЫХ ДОБАВОК, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
кафедра нефтехимии и химической технологии  
450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1; e-mail: kichatov\_k@mail.ru

E. V. Turkova, K. G. Kichatov, T. R. Prosochkina, F. Sh. Vildanov

## POLYPROPYLENE-BASED MATERIALS WITH BIO-DERIVED EPOXY ADDITIVES

Ufa State Petroleum Technological University  
1, Kosmonavtov Str., 450064, Ufa, Russia; e-mail: kichatov\_k@mail.ru

Получена добавка на основе эпоксидированного растительного масла для модификации полипропилена и улучшения его свойств при использовании в 3D-печати. Синтез добавки выполнен с использованием межфазного катализатора, определены соотношения сырья, реагентов, подобраны условия проведения химико-технологического процесса (температура, время контакта, время отстаивания). На основе синтезированной добавки изготовлено три образца полимерных материалов из полипропилена для получения филаментов со сниженной степенью кристалличности.

**Ключевые слова:** добавка; межфазный катализатор; полипропилен; растительные масла; филамент; эпоксидирование

На сегодняшний день аддитивное производство, известное как «быстрое прототипирование», играет важную роль не только в индивидуальном изготовлении деталей, но и внедряется в технологии современной промышленности. Благодаря широкому спектру применений и доступности оборудования, 3D-печать охватывает как высокотехнологические отрасли с дорогостоящим оборудованием, так и индивидуальные установки с простыми принтерами<sup>1</sup>. Особенно востребованным направленным в аддитивных технологиях является моделирование методом наплавления (FDM), в котором основным материалом является филамент – термопластичная нить, подаваемая в сопло принтера<sup>2</sup>.

Полипропилен (ПП) – это полимер, который является одним из наиболее доступных и широко

An additive based on epoxidized vegetable oil was developed for modifying polypropylene and improving its properties for use in 3D printing. The additive was synthesized using a phase-transfer catalyst, the ratios of raw materials and reagents were determined, and the chemical-engineering process conditions (temperature, contact time, and settling time) were selected. Three polymer samples of polypropylene were produced using the synthesized additive to produce filaments with a reduced degree of crystallinity.

**Key words:** additive; epoxidation; filament; phase-transfer catalyst; polypropylene; vegetable oils

применяемых термопластов; он характеризуется высокой химической стойкостью, низкой плотностью и сравнительно невысокой стоимостью<sup>3</sup>. Однако его использование ограничено рядом сложностей, основные из которых – большая термическая усадка, вызывающая деформацию моделей, происходящую по мере остывания напечатанной модели, и низкая адгезия к печатающей платформе из-за отсутствия поверхностных функциональных групп<sup>4</sup>.

Решением первой проблемы может быть снижение степени кристалличности полимера за счет ввода добавок, сополимеров, армирующих наполнителей или изменение скорости и температуры охлаждения. Известно, что чем выше степень кристалличности полимера, тем больше усадка. Для ее снижения обычно используются добавки или наполнители, которые уменьшают скорость кристаллизации<sup>5</sup>.

Дата поступления 30.09.25

Вторую проблему решают обычно либо подбором настроек принтера, либо нанесением адгезива на печатающую платформу.

Растительные масла редко используются в качестве добавки, и ранее они применялись в резиновой промышленности в качестве пластификаторов для улучшения сцепления шин с дорожным полотном. В настоящее время растительные масла считаются одним из наиболее потенциальных недорогих и доступных возобновляемых источников сырья, которые можно применять в химической промышленности<sup>6</sup>. Модификация растительных масел путем их эпексидирования позволяет решить проблему низкой адгезии за счет введения в неполярный полипропилен полярных эпексидных групп.

Для процесса эпексидирования подбираются масла, содержащие наибольшее количество ненасыщенных жирных кислот (олеиновой, линолевой и линоленовой) – соевое, льняное, рапсовое, оливковое, кукурузное, рыжиковое или подсолнечное (табл. 1)<sup>7,8</sup>.

Известно, что чем больше непредельных связей в реагенте, тем более полярным может получиться продукт, однако высокая степень эпексидирования снижает растворимость добавки в полипропилене. Скорость эпексидирования жирных кислот зависит от количества двойных связей и их расположения в молекуле: чем больше двойных связей в молекуле, тем быстрее проходит эпексидирование<sup>9</sup>.

Основным методом получения эпексидированных растительных масел является надкислотный метод по реакции Прилежаева<sup>10,11</sup>. Однако данный процесс имеет свои недостатки:

- высокая коррозионная активность надкислот;
- необходимость утилизации отработанных кислотных растворов;
- использование концентрированного пероксида водорода;
- наличие токсичных растворителей (ароматических или хлорсодержащих), которые необходимо на заключительном этапе отделять от целевого продукта.

Метод эпексидирования с использованием межфазного катализатора (МФК) лишен этих проблем, однако сложность регенерации катализатора ограничивает его внедрение в промышленность. Применение МФК, выпадающего в осадок, например диметилалкилбензиламмония хлорида, позволяет существенно упростить стадию отделения катализатора<sup>12</sup>.

Основные реакции эпексидирования в двухфазной системе<sup>13</sup> представлены на схеме 1.

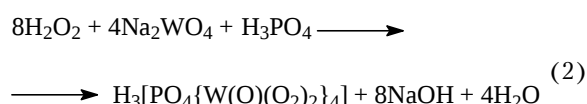
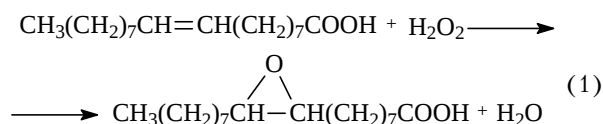


Схема 1

Параллельно протекают процессы разложения пероксида водорода на кислород и воду в водной фазе и гидролиз эпексидных групп с образованием диолов в органической фазе.

В кислой среде продукты эпексидирования растительных масел достаточно устойчивы, поэтому процесс можно проводить при избыточном количестве ортофосфорной кислоты<sup>14</sup>.

## Материалы и методы исследования

Для проведения эпексидирования протестированы образцы рапсового, конопляного, рыжикового и льняного масел, отбор выполнен на основе анализа количества двойных связей путем определения иодного числа по ГОСТ 2070-82<sup>15</sup>. Эпексидирование отобранных образцов масел проведено с использованием пероксида водорода в присутствии МФК с пероксвольфраматной системой.

Реактивы для эпексидирования:

- растительное масло рапсовое, производства ООО «Алмаз», г. Новосибирск;

Таблица 1

Содержание некоторых жирных кислот в составе масел

| Наименование масла | Состав жирных кислот (X:Y, где X – число атомов углерода, Y – число двойных связей), массовая доля, % |                     |                   |                   |                     |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
|                    | Пальмитиновая (C16:0)                                                                                 | Стеариновая (C18:0) | Олеиновая (C18:1) | Линолевая (C18:2) | Линоленовая (C18:3) |
| Подсолнечное       | 3.5–6.4                                                                                               | 1.6–4.6             | 24.0–40.0         | 46.0–62.0         | ≤ 1.0               |
| Рапсовое           | 2.5–7.0                                                                                               | 0.8–3.0             | 51.0–70.0         | 15.0–30.0         | 5.0–14.0            |
| Соевое             | 2.5–6.0                                                                                               | 4.5–7.3             | 23.0 – 29.0       | 51.0–57.0         | 3.0–6.0             |
| Льняное            | 5.0–7.0                                                                                               | 3.4–4.6             | 13.0–29.0         | 15.0–30.0         | 44.0–61.0           |
| Оливковое          | 7.5–20.0                                                                                              | 0.5–5.0             | 55.0–83.0         | 3.5–21.0          | ≤ 1.0               |
| Кукурузное         | 9.0–14.0                                                                                              | ≤ 2.0               | 28.0–30.0         | 30.0–60.0         | ≤ 2.0               |
| Рыжиковое          | 5.0–7.0                                                                                               | 2.0–3.0             | 12.0–20.0         | 14.0–24.0         | 35.0–47.0           |

- растительное масло льняное, производства ООО «РУСЬЭКО», пос. Нагорный Ярославской обл.;

- пероксид водорода  $H_2O_2$  – раствор с массовой концентрацией 35% по ГОСТ 177-88 <sup>16</sup> производства ООО «Селена», г. Ижевск;

- вольфрамат натрия  $Na_2WO_4$  по ГОСТ 18289-78 <sup>17</sup> производства ООО «Армахим», г. Санкт-Петербург;

- ортофосфорная кислота  $H_3PO_4$ , раствор с массовой концентрацией 85% по ГОСТ 6552-80 <sup>18</sup> производства ООО «СмолСпецТехнохим», г. Смоленск;

- алкилдиметилбензиламмоний хлорид «Катамин АБ» производства Группы компаний «СНЕМ PORTAL», г. Мытищи.

Сначала выполнялась подготовка органической фазы (ОФ) из растительного масла и МФК, и водной фазы (ВФ) из фосфорной кислоты, пероксида водорода и вольфрамата натрия.

В лабораторный реактор с рубашкой объемом  $0.001\text{ м}^3$  (рис. 1) наливали ОФ, включали перемешивающее устройство, смесь нагревали до температуры  $65\text{ }^\circ\text{C}$ . Далее к нагретой ОФ вводили ВФ, при этом начинался процесс эпексидирования. Поддерживали стабильную температуру процесса и частоту вращения мешалки 800 об/мин.

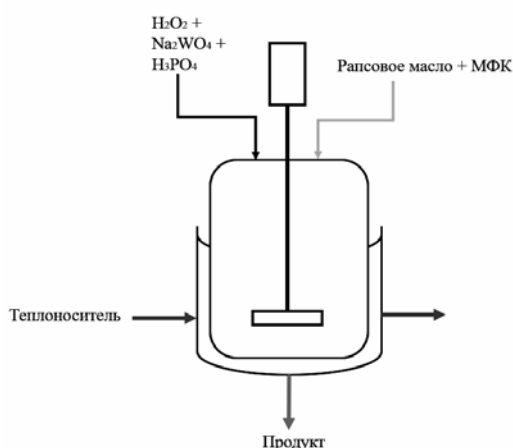


Рис. 1. Схема проведения реакционного процесса

Время реакции варьировалось от 1 до 3 ч. По истечении заданного времени реактор выключали и переливали реакционную смесь в колбу для отстаивания в течение 16–24 ч. Длительное отстаивание обусловлено применяемым катализатором межфазного переноса, который является катионным ПАВ, стабилизирующим эмульсию «вода в масле».

Далее выполнялось определение концентрации эпексидных соединений с применением обратного титрования по ГОСТ Р 56752-2015 <sup>19</sup>.

После отстаивания смеси в делительной воронке и отделения основной части воды в органи-

ческой фазе остается значительное количество эмульгированной воды, которая препятствует процессу экструзии полимеров (вода закипает при температуре экструзии, что приводит к колебаниям давления в экструдере, неравномерности подачи полимера, колебаниям диаметра получаемого филламента, образованию включений в полимере).

Окончательное обезвоживание проведено безводным сульфатом магния, предварительно прокаленным в муфельной печи при температуре  $250\text{--}300\text{ }^\circ\text{C}$ . Безводный сульфат магния добавляется в колбу с органической частью реакционной массы в количестве, примерно в 2 раза превышающий расчетное количество воды в экстракте. Осушенное эпексидное соединение, представляющее собой прозрачную маслянистую жидкость желтоватого цвета, использовано в качестве добавки к полипропилену.

Сырьем для получения филламента являлся полипропилен «БАЛЕН 01270» массой 400 г, показатель текучести расплава полимера 27 г/10 мин.

Далее приготовлены три образца материала с массовой концентрацией добавки 1.5, 2.5 и 4.0 % (табл. 2). Выбор концентраций обусловлен тем, что при концентрации добавки менее 1.5 % значение степени кристалличности практически не меняется по сравнению с немодифицированным полимером, а при концентрации добавки более 4.0% наблюдается явление проскальзывания гранул полимера в загрузочной области шнека, что приводит к нестабильной подаче полимера из экструдера и невозможности получения нити стабильного диаметра. Перемешивание гранул полипропилена с добавкой проводили в лабораторном шейкере в течение 1 ч до равномерного покрытия гранул добавкой.

Таблица 2  
Рецептуры полученных образцов модифицированного полипропилена

| Конц-я эпексидного соединения, % мас. | Масса эпексидного соединения, г | Масса органической фазы, г |
|---------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| 1.5                                   | 6.0                             | 13.3                       |
| 2.5                                   | 10.6                            | 23.5                       |
| 4.0                                   | 16.0                            | 35.6                       |

Далее полученные образцы для получения филламента загружались в одношнековый экструдер FLD-25, характеристики которого указаны в <sup>20</sup>. Также был получен контрольный образец филламента из полипропилена без добавления эпексидной добавки. Параметры экструзии и диаметры полученных филламентов приведены в табл. 3. Для того, чтобы обеспечить постепенное расплавление гранул немодифицированного и модифицированного полипропилена, установлено следующее температурное распределение зон экструдера:

- I – зона питания с  $T = 145\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  
 II – зона пластикации с  $T = 175\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  
 III – зона дозирования полимера с  $T = 175\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  
 IV – зона фильера с  $T = 165\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Далее проведен анализ ДСК полученных образцов филаментов по ГОСТ Р 55134-2012<sup>21</sup>. Степень кристалличности определена по формуле:

$$Y = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^{100}},$$

где  $\Delta H_m$  – энтальпия плавления, полученного вещества, Дж/г;

$\Delta H_m^{100}$  – теоретическая энтальпия плавления полностью кристаллического полимера, Дж/г.

Энтальпия плавления для 100% кристаллического полипропилена равна 207 Дж/г<sup>22</sup>.

## Результаты и их обсуждение

Для четырех образцов растительного масла выполнено определение иодного числа (табл. 3), которое характеризует высокое содержание непредельных жирных кислот во всех образцах масла. Для процесса эпоксидирования выбраны образцы рапсового масла (самое доступное и дешевое на рынке из представленных видов масел) и льняного масла (с одним из самых высоких значений иодного числа).

Таблица 3

**Результаты определения иодного числа для растительных масел**

| Растительное масло | Иодное число, (г $I_2$ /100 г) |
|--------------------|--------------------------------|
| Рапсовое           | 25.0                           |
| Конопляное         | 44.2                           |
| Рыжиковое          | 48.2                           |
| Льняное            | 48.1                           |

Для процесса эпоксидирования подготовлено три образца с различным массовым соотношением реагентов и условиями проведения процесса. Расчет дозировки реагентов выполнен на основе концентрации двойных связей (ДС) в образце растительного масла, полученной путем пересчета иодного числа. Параметры процесса и результаты эпоксидирования приведены в табл. 4.

Максимальная доля эпоксидных соединений наблюдается в образце №3, что обусловлено более высоким временем реакции и более низкой температурой процесса. Более высокая температура позволяет уменьшить время реакции, но приводит к ускорению побочной реакции разложения перекиси водорода, что снижает выход продукта по целевой реакции эпоксидирования.

Таблица 4

**Результаты процесса эпоксидирования**

| Показатель                                                                 | Номер образца |           |           |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------|-----------|
|                                                                            | 1             | 2         | 3         |
| Масло                                                                      | рапсовое      | льняное   | рапсовое  |
| [ДС]:[H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ]                                      | 1:1.2         | 1:2       | 1:2       |
| [ДС]:[Na <sub>2</sub> WO <sub>4</sub> ]                                    | 1:0.0055      | 1:0.0055  | 1:0.0055  |
| [Na <sub>2</sub> WO <sub>4</sub> ]:[H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ]:[МФК] | 1:2.6:0.8     | 1:2.6:2.6 | 1:2.6:2.6 |
| Время процесса, ч                                                          | 1             | 1         | 3         |
| Температура процесса, °C                                                   | 80            | 80        | 65        |
| Массовая доля эпоксидных соединений, %                                     | 32.0          | 19.9      | 36.5      |

Образец добавки с наибольшей массовой долей эпоксидных соединений №3 был использован для получения филаментов с различными концентрациями добавки – 1.5, 2.5 и 4.0 %. мас.

Для каждого образца полученного филамента путем экструзии, выполнен ДСК анализ (табл. 5). Температура плавления и степень кристалличности у всех образцов с добавками ниже по сравнению с контрольным образцом без добавки, что свидетельствует об уменьшении кристаллических областей в полукристаллическом полимере – полипропилене. Выявлено, что увеличение концентрации добавки до 4.0% приводит к снижению степени кристалличности полимерного материала.

Таблица 5

**Результаты ДСК анализа материала филаментов**

| Массовая концентрация добавки, % | $\Delta T_{пл}, ^{\circ}\text{C}$ | $\Delta H_{пл}, \text{Дж/г}$ | $\Delta T_{крст}, ^{\circ}\text{C}$ | $\Delta H_{крст}, \text{Дж/г}$ | Y, % |
|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------|
| 0                                | 162.4                             | 95.8                         | 101.9                               | -117.3                         | 56.6 |
| 1.5                              | 162.1                             | 95.6                         | 107.3                               | -115.4                         | 55.7 |
| 2.5                              | 159.9                             | 94.2                         | 107.5                               | -112.6                         | 54.4 |
| 4.0                              | 158.4                             | 93.1                         | 107.8                               | -110.4                         | 53.3 |

Таким образом, полученные филаменты из модифицированного полипропилена марки «Бален 01270» с эпоксидной добавкой на основе растительного сырья характеризуются меньшей усадкой. По результатам исследования можно рекомендовать использование эпоксидированной растительной добавки на основе рапсового масла для получения филаментов для 3D печати.

Результаты проведенного исследования показывают, что в результате модификации полимеров добавками на основе растительного сырья отечественных промышленных предприятий могут быть получены новые полимерные материалы с пониженной степенью кристалличности, что делает их пригодными для 3D печати изделий.

## Литература

1. Гордеев Е.Г., Анаников В.П. Общедоступные технологии 3D-печати в химии, биохимии и фармацевтике: приложения, материалы, перспективы // Успехи химии. – 2020. – Т.89, №12. – С.1507-1561.
2. Timothy J.H., Harrysson L.A.O. Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications // Science Progress. – 2012. – V.95, №3. – Pp.255-282.
3. Эворо Э.Б., Перухин Ю.В., Билалов Р.Р., Дебердеев Т.Р. Использование наполненных композиций полипропилена для 3D-печати // Вестник технологического университета. – 2017. – Т.20, №21. – С.56-59.
4. Spoerk M., Holzer C., Gonzalez-Gutierrez J. Material extrusion-based additive manufacturing of polypropylene: A review on how to improve dimensional inaccuracy and warpage // Journal of Applied Polymer Science. – 2019. – V.137, №12. – P.48545.
5. Wang L., Gramlich W., Gardner D. J., Han Y., Tajvidi M. J. Unraveling of Advances in 3D-Printed Polymer-Based Bone Scaffolds // Polymers. – 2022. – V.14, №3. – P.566.
6. Biermann U., Friedt W., Lang S., LuhNew W. Syntheses with Oils and Fats as Renewable Raw Materials for the Chemical Industry // Angew. Chem. – 2000. – V.39, №13. – Pp.2206-2247.
7. ГОСТ 1129-2013 Масло подсолнечное. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
8. ГОСТ 31759-2012 Масло рапсовое. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2013. – 15 с.
9. Sun J., Zhao X., Sun G., Zeb Sh., Cui Y., You Q. Thermodynamic and kinetic study on the catalytic epoxidation of allyl chloride with  $H_2O_2$  by new catalyst  $[(C_{18}H_{37})_2(CH_3)_2N]_3\{PO_4[W(O)(O_2)_2]_4\}$  // Chemical Engineering Journal. – 2020. – V.398. – P.125051.
10. Cogliano T., Turco R., Di Serio M., Salmi T., Tesser R., Russo V. Epoxidation of Vegetable Oils via the Prilezhaev Reaction Method: A Review of the Transition from Batch to Continuous Processes // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2024. – V.63, №26. – Pp.11231-11262.
11. Cogliano T., Russo V., Eranen K., Tesser R., Di Serio M., Salmi T. Comparison of continuous technologies for vegetable oils epoxidation // Chemical Engineering Science. – 2025. – V.301. – P.120726.
12. Nguyen T.T., Pham N.L. Epoxidation of vietnam rubber seed oil by using peroxo-phosphatotungstate catalyst complex based on  $Na_2WO_4/H_3PO_4/H_2O_2$  with the presence of phase-transfer catalyst // Molecular Catalysis. – 2021. – V.509, №7. – P.111645.
13. Милославский Д.Г., Готлиб Е.М., Ахмедьянова Р.А., Лиакумович А.Г., Пашин Д.М. О карбонизации эпоксирированных растительных масел и исследовании свойств получаемых циклокарбонатов // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2014. – Т.57, №7. – С.3-10.
14. Милославский Д.Г., Черезова Е.Н., Ахмедьянова Р.А., Лиакумович А.Г. Эпоксирирование технической олеиновой кислоты пероксидом водорода на пероксофосфовольфраматной каталитической системе, образующейся *in situ* // Бутлеровские сообщения. – 2012. – Т.29, №3. – С.72-78.
15. ГОСТ 2070-82 Нефтепродукты светлые. Методы определения иодных чисел и содержания непредельных углеводородов. – М.: Стандартинформ, 1983. – 6 с.

## References

1. Gordeev E.G., Ananikov V.P. [Widely accessible 3d printing technologies in chemistry, biochemistry and pharmaceuticals: applications, materials and prospects]. *Russian Chemical Reviews*, 2020, vol.89, no.12, pp.1507-1561.
2. Timothy J. H., Harrysson L. A. O. [Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications]. *Science Progress*, 2012, vol.95, no.3, pp.255-282.
3. Evoro E. B., Perukhin Yu. V., Bilalov R. R., Deberdeev T. R. *Ispolzovanie napolnennikh kompozitsii polipropilena dlya 3D-pechati* [The use of filled polypropylene compositions for 3D printing]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2017, vol.20, no.21, pp.56-59.
4. Spoerk M., Holzer C., Gonzalez-Gutierrez J. [Material extrusion-based additive manufacturing of polypropylene: A review on how to improve dimensional inaccuracy and warpage]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, vol.137, no.12, p.48545.
5. Wang L., Gramlich W., Gardner D. J., Han Y., Tajvidi M. J. [Unraveling of Advances in 3D-Printed Polymer-Based Bone Scaffolds]. *Polymers*, 2022, vol.14, no.3, p.566.
6. Biermann U., Friedt W., Lang S., LuhNew W. [Syntheses with Oils and Fats as Renewable Raw Materials for the Chemical Industry]. *Angew. Chem.*, 2000, vol.39, no.13, pp.2206-2247.
7. *GOST 1129-2013 Maslo podsolnechnoe. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 1129-2013. Sunflower oil. Technical specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 19 p.
8. *GOST 31759-2012 Maslo rapsovoe Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 1129-2013. Rapeseed oil. Technical specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 15 p.
9. Sun J., Zhao X., Sun G., Zeb Sh., Cui Y., You Q. [Thermodynamic and kinetic study on the catalytic epoxidation of allyl chloride with  $H_2O_2$  by new catalyst  $[(C_{18}H_{37})_2(CH_3)_2N]_3\{PO_4[W(O)(O_2)_2]_4\}$ ]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, vol.398, p.125051.
10. Cogliano T., Turco R., Di Serio M., Salmi T., Tesser R., Russo V. [Epoxidation of Vegetable Oils via the Prilezhaev Reaction Method: A Review of the Transition from Batch to Continuous Processes]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2024, vol.63, no.26, pp.11231-11262.
11. Cogliano T., Russo V., Eranen K., Tesser R., Di Serio M., Salmi T. [Comparison of continuous technologies for vegetable oils epoxidation]. *Chemical Engineering Science*, 2025, vol. 301, p.120726.
12. Nguyen T. T., Pham N. L. [Epoxidation of vietnam rubber seed oil by using peroxo-phosphatotungstate catalyst complex based on  $Na_2WO_4/H_3PO_4/H_2O_2$  with the presence of phase-transfer catalyst]. *Molecular Catalysis*, 2021, vol.509, no. 7, p.111645.
13. Miloslavskii D.G., Gotlib Ye.M., Akhmedyanova R.A., Liakumovich A.G., Pashin D.M. *O karbonizatsii epoksidirovannikh rastitelnikh masel I issledovaniy svoistv poluchaemikh tsiklokarbonatov* [On carbonization of epoxidized vegetable oils and investigation of the properties of the obtained cyclocarbonates]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News

16. ГОСТ 177-88 Водорода перекись. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 1989. – 12 с.
17. ГОСТ 18289-78 Реактивы. Натрий вольфрамовокислый 2-водный. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 1980. – 18 с.
18. ГОСТ 6552-80 Реактивы. Кислота ортофосфорная. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 1982. – 11 с.
19. ГОСТ Р 56752-2015 Смолы и соединения эпоксидные. Методы определения массовой доли эпоксидных групп и эпоксидного эквивалента. – М.: Стандартинформ, 2017. – 12 с.
20. Kalmykov F.M., Shakirov A.F., Kichatov K.G., Prosochkina T.R. Effect of Structural Characteristics of Polyethylene Terephthalate and Its Recycled Products on Filament Production // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2024. – V.60, №1. – Pp.27-36.
21. ГОСТ Р 55134-2012. Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Часть 1. Общие принципы. – М.: Стандартинформ, 2014. – 27 с.
22. Кристалличность / Степень кристалличности. NETZSCH. Анализ и тестирование. URL: <https://analyzing-testing.netzsch.com/ru/nou-khau/glossarii/stepen-kristallichnosti> (дата обращения: 02.03.2025). – Текст: электронный.
14. Miloslavskiy D.G., Cherezova E.N., Akhmedyanova R.A., Liakumovich A.G. *Epoksidirovanie tekhnicheskoi oleinovo kisloti peroksidom vodoroda na peroksofosfovolframatnoi kataliticheskoi sisteme, obrazuyushcheysya in situ* [Epoxidation of technical oleic acid with hydrogen peroxide on a peroxophosphovolframate catalytic system formed *in situ*]. *Butlerovskie soobshcheniya* [Butlerov Communications], 2012, vol.29, no.3, pp.72-78.
15. *GOST 2070-82 Nefteprodukty svetlye. Metody opredeleniya jodnyh chisel i sodержaniya nepredel'nyh uglevodorodov* [State Standard 2070-82. Light oil products. Methods for the determination of iodine numbers and the content of unsaturated hydrocarbons.]. Moscow, Standartinform Publ., 1983, 6 p.
16. *GOST 177-88 Vodoroda perekis. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 177-88. Hydrogen peroxide. Technical specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 1989, 12 p.
17. *GOST 18289-78 Reaktiv. Natrii volframovokislui 2-vodnoi. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 18289-78. Reagents. Sodium tungstate is 2-aqueous.]. Moscow, Standartinform Publ., 1980, 18 p.
18. *GOST 6552-80 Reaktiv. Kislota ortofosforная. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 6552-80. Reagents. Orthophosphoric acid. Technical specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 1982, 11 p.
19. *GOST R 56752-2015 Smoli I soedineniya epoksidnie. Metodi opredeleniya massovoi doli epoksidnykh grupp I epoksidnogo ekvivalenta* [State Standard R 56752-2015. Resins and epoxy compounds. Methods for determining the mass fraction of epoxy groups and the epoxy equivalent]. Moscow, Standartinform Publ., 2017, 12 p.
20. Kalmykov F.M., Shakirov A.F., Kichatov K.G., Prosochkina T.R. [Effect of Structural Characteristics of Polyethylene Terephthalate and Its Recycled Products on Filament Production]. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2024, vol.60, no.1, pp.27-36.
21. *GOST R 55134-2012. Plastmassi. Differentsialnaya skaniruyushchaya kalorimetriya (DSK). Chast 1. Obshchie printsipy* [State Standard R 55134-2012. Plastics. Differential scanning calorimetry (DSC). Part 1. General principles]. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 27 p.
22. *Kristallichnost/Stepen kristallichnosti. NETZSCH. Analiz i testirovanie* [Crystallinity/The degree of crystallinity. NETZSCH. Analysis and testing]. Available at: <https://analyzing-testing.netzsch.com/ru/nou-khau/glossarii/stepen-kristallichnosti> (accessed: 02.03.2025).