

СИНТЕЗ, ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ВЫДЕЛЕНИЕ СЛОЖНЫХ ЭФИРОВ ПЕНТАЭРИТРИТА И ЛИНЕЙНЫХ КАРБОНОВЫХ КИСЛОТ C₄–C₇

© 2021 г. В. В. Емельянов¹, Е. Л. Красных^{1,*}, Д. А. Фетисов¹, С. В. Леванова¹, В. А. Шакун¹

¹ ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Самара, 443100 Россия

*E-mail: kinterm@samgtu.ru

Поступила в редакцию 19 января 2021 г.

После доработки 19 апреля 2021 г.

Принята к публикации 2 июля 2021 г.

Исследованы варианты термической этерификации индивидуальных одноосновных карбоновых кислот C₄–C₇ пентаэритритом в избытке соответствующей кислоты в присутствии (и без) растворителя в комплексе с азеотропной дистилляцией выделяющейся реакционной воды. Синтезированы, выделены, очищены (до ≥ 99 мас. %) с помощью ГЖХ и идентифицированы методом ГХ-МС образцы четырех тетраэфиров пентаэритрита (ПЭ) и кислот C₄–C₇; определены их некоторые физико-химические характеристики. Изучена зависимость индукционного эффекта – длины алкильной цепи в молекуле кислоты – на скорость этерификации: 90%-ный выход тетрабутирата ПЭ достигается за 30 ч, а тетраэфиров C₅–C₇ за 13–14 ч, при температуре 100–110°C. После проведения очистки, содержание тетраэфиров более 99% масс., выход составил 78–85%.

Ключевые слова: сложные эфиры, пентаэритрит, синтетические масла, этерификация, карбоновые кислоты, тетраэфиры

DOI: 10.31857/S0028242121050087

Одно из важных направлений развития нефтехимии в РФ – создание отечественного производства синтетических смазочных материалов пятой группы [1–4]. В настоящее время в промышленной сфере основным способом производства сложных эфиров неополиолов является этерификация спиртов карбоновыми кислотами [5, 6]. В качестве кислотной составляющей в ряде случаев используют не индивидуальные кислоты, а их смеси [6–8]; в качестве катализаторов – серную кислоту, толуолсульфокислоту, оксид цинка или ионообменные смолы [9, 10]. Однако, ввиду образования большого количества побочных продуктов и неполной глублины протекания реакции, возможно ухудшение термической и термоокислительной стабильности смазочных материалов, что может существенно уменьшить срок службы двигателя.

По свойствам, сложные эфиры, применяемые в качестве базовых основ смазочных масел пятой группы, должны обладать: низкой температурой застывания [11] для использования при низких

температурах [12, 13]; высокой стойкостью к термическому окислению и гидролизу [14, 15]; низкой летучестью, обеспечивающей минимальную эмиссию [16–17] и, самое главное, – вязкостью, соответствующей эксплуатационным требованиям [18–19]. Однако анализ литературных данных показывает, что имеющиеся данные по свойствам рассматриваемых эфиров, достаточно рассогласованы между собой, что в ряде случаев связано с чистотой исследуемых эфиров и требуют уточнений. Например, для тетрагептаноата ПЭ температура кристаллизации составляет –40°C по данным работы [20], –1°C [21] и –34°C по нашим данным.

Таким образом, для создания смазочных материалов высокого качества и с заданными свойствами требуется определение физико-химических и эксплуатационных свойств чистых (не менее 99 мас. %) эфиров.

Цель работы – исследование вариантов термической этерификации пентаэритрита линейными карбоновыми кислотами C₄–C₇ с получением ин-

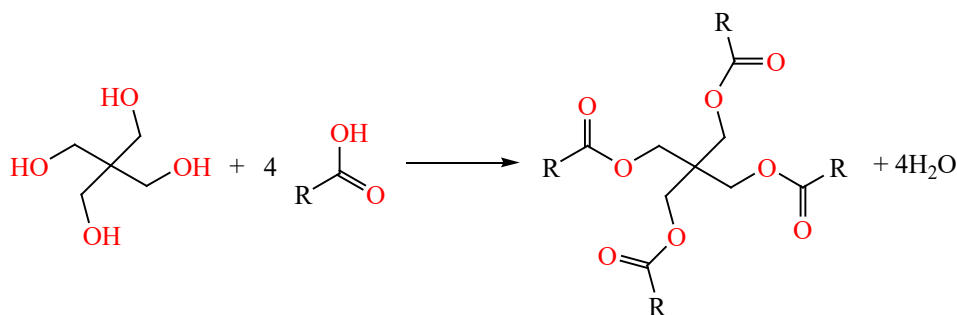


Рис. 1. Схема получения тетразамещенного сложного эфира пентаэритрита ($R = -C_3H_7; -C_4H_9; -C_5H_{11}; -C_6H_{13}$).

дивидуальных высокочистых эфиров (технология, анализ и идентификация, выделение, очистка).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Целевые продукты – тетразамещенные сложные эфиры ПЭ получали этерификацией ПЭ карбоновыми кислотами C_4 – C_7 ; реакция протекает в соответствии со схемой (рис. 1):

В качестве исходных реагентов использовали образцы марки «ч.» с чистотой не менее 97% поставленные ООО «Вектон», ООО «Реактив» и Sigma-Aldrich.

Известно, что реакция этерификации является экзотермической и обратимой (равновесная конверсия в интервале температур 120–160°C не превышает 40–60% [22]). Для смещения равновесия в сторону целевых продуктов традиционно используют несколько технологических приемов: выделяющуюся реакцию воду удаляют в виде газопаровой смеси (вариант I) или в виде азеотропа с соответствующим растворителем (вариант II). Остаток неэтерифицированных гидроксильных групп в эфирах для смазочных масел недопустим, т.к. снижает стабильность продукта [23]. Поэтому необходимо использовать пяти–восьмикратный мольный избыток кислоты, что подтверждается и результатами термодинамического анализа, выполненного нами в работе [24].

Синтез проводили в реакторе ($V = 250$ мл), снабженном насадкой Дина–Старка с обратным холодильником. В варианте I (без растворителя) загружали 20 г ПЭ (0.15 моль) и восьмикратный мольный избыток соответствующей кислоты. Реакцию вели до полного прекращения выделения реакционной воды при температурах кипения кис-

лот C_4 – C_7 соответственно: $C_4 - 163$; $C_5 - 186$; $C_6 - 203$; $C_7 - 223$ °C. Затем удаляли избыток кислоты вакуумной перегонкой при остаточном давлении 10–12 мм. рт. ст.

В варианте II к исходным реагентам добавляли толуол ($T_{кип} = 110.6$ °C) в количестве 25–30 мас. %. Температура синтеза во всех случаях была одинаковой (100–110°C) и контролировалась температурой азеотропа (толуол + вода). После удаления выделившейся в результате реакции воды с азеотропом, оставшийся растворитель удаляли перегонкой при атмосферном давлении, а затем избыток кислоты – под вакуумом. Выход эфиров составил 90%.

Использование растворителя при синтезе уменьшает количество побочных соединений, улучшает начальный цвет готового продукта и обеспечивает его цветостабильность.

Для удаления образующихся смолистых соединений и получения стандартного уровня цветности (0–1 по стандарту ISO 2049) фракции (по варианту II) смешивали с отбеленной землей в соотношении 1 г на 10 г эфира и нагревали при 60°C в течение 1–2 ч с последующей фильтрацией. В синтезах без растворителя (вариант I) эту процедуру проводили 2–3 раза. Чистота полученных эфиров составляла 90–95%, основные примеси – продукты неполной этерификации.

Для очистки тетраэфиров от продуктов неполного замещения гидроксильных групп и следовых количеств карбоновых кислот применяли экстракцию растворителями: смесь метанола и воды (1:1, по массе) или метанола–воды–ацетонитрила (1:1:1, по массе) при комнатной температуре. Соотношение эфирная фракция/экстрагент = 1:1, по массе. После отделения экстрагента декантацией образцы

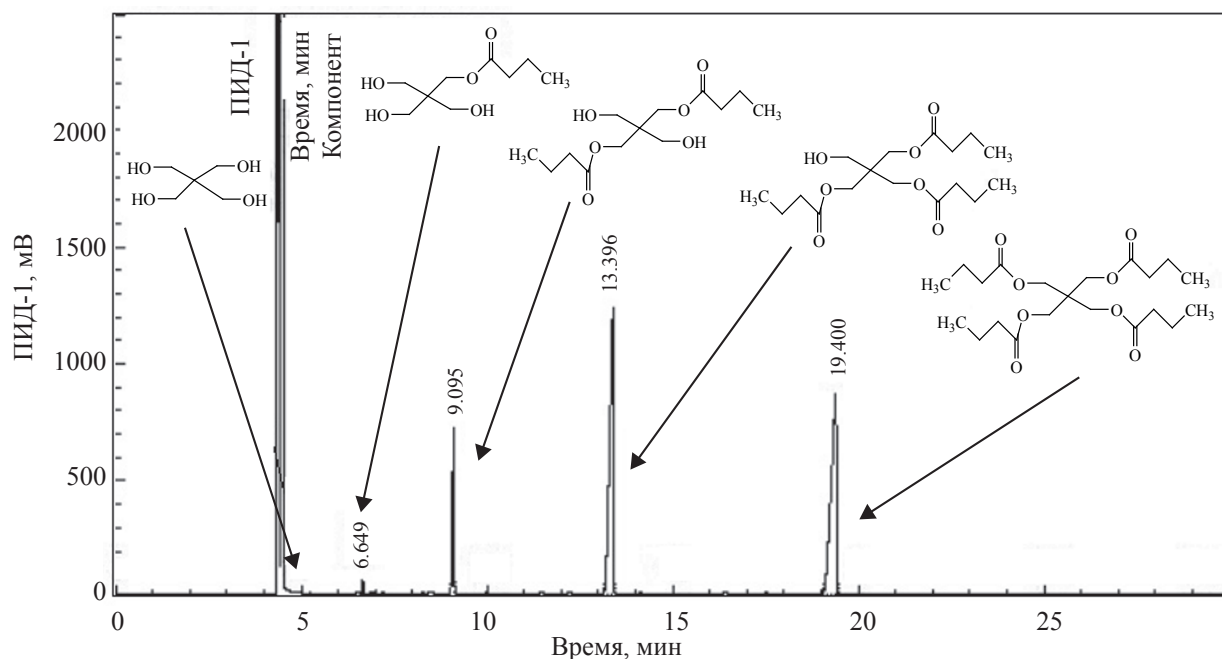


Рис. 2. Хроматограмма реакционной массы при этерификации пентаэритрита масляной кислотой.

эфиров сушили при пониженном давлении в токе азота и температуре 60–80°C в течении 2–3 ч для удаления остатков экстрагента. После 2–3 ступеней экстракции для всей синтезированной линейки сложных эфиров ПЭ чистота полученных целевых продуктов составляла >99 мас. % (ГЖХ), выход – 78–85%.

Анализ состава реакционных смесей и эфирных фракций проводили методом ГЖХ на аппаратно-программном комплексе «Хроматэк Аналитик» на базе хроматографа «Кристалл-2000М», оснащенного пламенно-ионизационным детектором и капиллярной колонкой с привитой неполярной фазой ВР-1, 60м × 0.32 мм × 0.5 мкм. Условия анализа [12]: газ-носитель – гелий, деление потока 1/50, детектор – пламенно-ионизационный, температура испарителя – 623.2 К, температура детектора – 573.2 К, температура колонки – 433.2–563.2 К, объем вводимой пробы 0.2 мкл. Определение количественного состава проводилось методом внутренней нормализации.

Типичная хроматограмма реакционной смеси на примере получения бутиратов представлена на рис. 2.

Идентификация компонентов реакционных смесей выполнена методом ГХ-МС на газовом хроматографе Agilent 6850, оснащенный: капиллярной колонкой Agilent 19091S-433E (30 м × 250 мкм × 0.25 мкм); хроматографической колонкой HP-5MS (неподвижная фаза 5% дифенилполисилоксана + 95% диметилполисилоксана); масс-селективным детектором Agilent 5975C VL MSD при ионизирующем напряжении 70 эВ.

Характеристики масс-спектров, синтезированных нами тетраэфиров ПЭ и C₄–C₇-карбоновых кислот приведены в табл. 1. Из представленных в табл. 1 данных, видно, что для масс-спектров тетраэфиров ПЭ C₄–C₇-карбоновых кислот характерно следующее:

- отсутствие молекулярного иона, связанное с быстрым отщеплением от молекулярного иона тетраэфира молекулы воды;

- рост интенсивностей ионов $[M^{++} - C_nH_{2n-1}O_2]^+$ и $[M^{+} - C_nH_{2n-2}O; -C_nH_{2n-2}O]^+$ с увеличением числа атомов углерода карбоновой кислоте, от C₄ к C₇.

Таблица 1. Характеристика основных серий ионов в масс-спектрах тетраэфиров ПЭ и C4-C7-карбоновых кислот

Соединение	Основная серия ионов масс-спектра 70 эВ, m/z , (структура, отн. %.)
C ₄ -тетраэфир	416 (M^+ , 0); 398 ($[M^{++} - H_2O]^+$, 1); 329 ($[M^{++} - C_4H_7O_2]^+$, 43); 259 ($[M^{++} - C_4H_7O_2^+ - C_4H_6O]^+$, 21); 257 ($[M^{++} - C_4H_7O_2^+ - C_4H_8O]^+$, 21); 228 ($[M^{++} - C_4H_7O_2^+ - C_4H_8O - HCO^+]^{++}$, 18); 142 ($[M^{++} - C_4H_7O_2^+ - C_4H_8O - HCO^+ - C_4H_6O_2]^+$, 27); 71 ($C_4H_7O^+$, 100); 43 ($C_3H_7^+$, 23)
C ₅ -тетраэфир	472 (M^+ , 0); 454 ($[M^{++} - H_2O]^+$, 1); 371 ($[M^{++} - C_5H_9O_2]^+$, 51); 287 ($[M^{++} - C_5H_9O_2^+ - C_5H_8O]^+$, 28); 285 ($[M^{++} - C_5H_9O_2^+ - C_5H_{10}O]^+$, 17); 256 ($[M^{++} - C_5H_9O_2^+ - C_5H_8O - HCO^+]^{++}$, 12); 156 ($[M^{++} - C_5H_9O_2^+ - C_5H_8O - HCO^+ - C_5H_8O_2]^+$, 34); 85 ($C_5H_9O^+$, 100); 57 ($C_4H_9^+$, 29)
C ₆ -тетраэфир	528 (M^+ , 0); 510 ($[M^{++} - H_2O]^+$, 1); 413 ($[M^{++} - C_6H_{11}O_2]^+$, 72); 315 ($[M^{++} - C_6H_{11}O_2^+ - C_6H_{10}O]^+$, 50); 313 ($[M^{++} - C_6H_{11}O_2^+ - C_6H_{12}O]^+$, 47); 284 ($[M^{++} - C_6H_{11}O_2^+ - C_6H_{10}O - HCO^+]^{++}$, 18); 170 ($[M^{++} - C_6H_{11}O_2^+ - C_6H_{10}O - HCO^+ - C_6H_{10}O_2]^+$, 37); 99 ($C_6H_{11}O^+$, 100); 71 ($C_5H_{11}^+$, 26)
C ₇ -тетраэфир	584 (M^+ , 0); 566 ($[M^{++} - H_2O]^+$, 1); 455 ($[M^{++} - C_7H_{13}O_2]^+$, 92); 343 ($[M^{++} - C_7H_{13}O_2^+ - C_7H_{12}O]^+$, 75); 341 ($[M^{++} - C_7H_{13}O_2^+ - C_7H_{14}O]^+$, 26); 312 ($[M^{++} - C_7H_{13}O_2^+ - C_7H_{12}O - HCO^+]^{++}$, 23); 184 ($[M^{++} - C_7H_{13}O_2^+ - C_7H_{12}O - HCO^+ - C_7H_{12}O_2]^+$, 39); 113 ($C_7H_{13}O^+$, 100); 85 ($C_6H_{13}^+$, 23)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследований показали, что при проведении термической этерификации реакция протекает медленно: 90%-ный выход тетраэфиров достигается за 12–30 ч в зависимости от используемой кислоты. В отсутствие растворителя наблюдаются локальные перегревы, вызванные повышением вязкости реакционной массы при отгонке образующейся воды. Наблюдается осмоление (по-

темнение реакционной массы), что усложняет выделение и очистку целевых продуктов.

Процесс, проводимый в среде толуола, для всех кислот проходит при низких температурах (100–110°C), стабильно, с незначительным образованием смол и изменением цвета.

На рис. 3 и 4 в качестве примера приведены результаты, иллюстрирующие кривые накопления продуктов реакции для этерификации ПЭ масля-

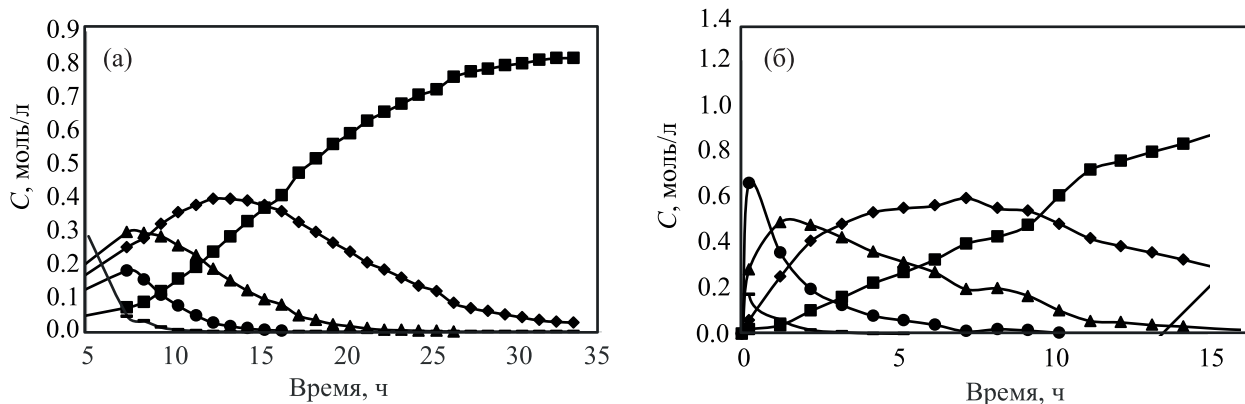


Рис. 3. Диаграмма кривых накопления продуктов при этерификации пентаэритрита масляной кислотой: (а)- метод I; (б) метод II; ■ – тетрабутират ПЭ, ◆ – трибутират ПЭ, ▲ – дибутират ПЭ, ● – монобутират ПЭ, — – пентаэритрит (ПЭ).

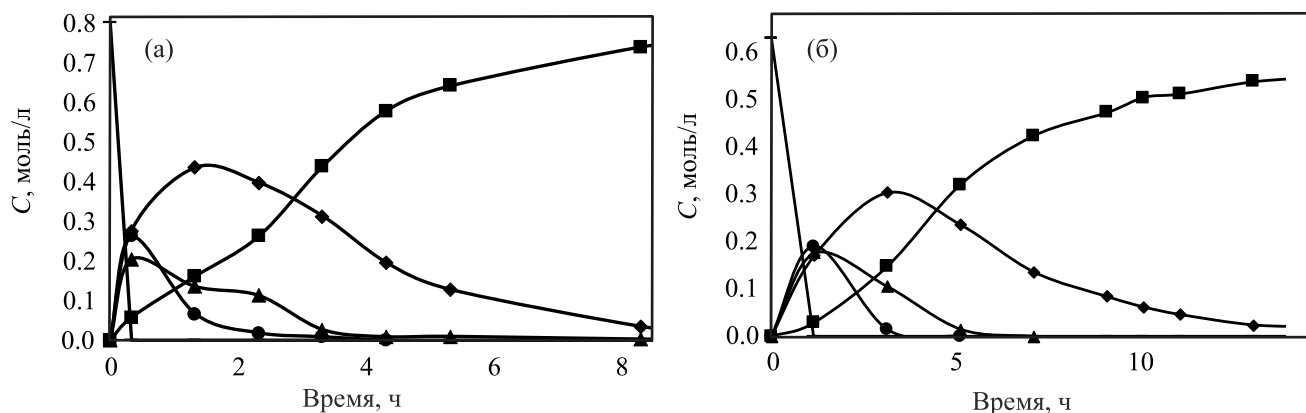


Рис. 4. Диаграмма кривых накопления продуктов при этерификации пентаэритрита гептановой кислотой: (а) метод I; (б) метод II; ■ – тетрагептаноат ПЭ, ◆ – тригептаноат ПЭ, ▲ – дигептаноат ПЭ, ● – моногептаноат ПЭ, — – пентаэритрит (ПЭ).

ной (C_4) и гептановой (C_7) кислотами по I и II методам (мольное соотношение ПЭ и кислоты – 1:8).

В отношении влияния длины алкильной цепи в карбоновой кислоте на скорость этерификации известно, что электронодонорные группы, связанные с карбонильным атомом углерода, понижают частичный положительный заряд (по сравнению с зарядом в HCOOH), и, тем самым, препятствуют взаимодействию кислоты с нуклеофилом (молекулой спирта), т.е. величина (δ^+) на углероде алкильной группы зависит от длины радикала R^* [25].

В нашем случае этот эффект особенно активно проявляется у масляной кислоты: скорость ее взаимодействия с ПЭ в 2.5–3 раза ниже по сравнению

с кислотами C_5 – C_6 . Для энантовой кислоты (C_7) в сравнении с кислотами C_5 – C_6 он оказывается почти незначимым (рис. 5).

Количественные выходы тетраэфиров C_5 – C_7 при 100–110°C достигаются за 13–14 ч, 80%-ный выход тетрабутирата при прочих равных условиях – за 30–31 ч. Оцененные для кислот C_4 – C_7 начальные скорости расхода ПЭ имеют значения (моль/л·мин): C_4 – $(0.2\text{--}0.3)\times 10^{-3}$; C_5 – $(0.6\text{--}0.65)\times 10^{-3}$; C_6 – 0.7×10^{-3} ; C_7 – $0.7\text{--}0.75)\times 10^{-3}$.

В табл. 2 приведены полученные данные для синтезированных тетраэфиров карбоновых кислот C_4 – C_7 .

Таблица 2. Свойства полученных сложных эфиров пентаэритрита

Эфир ПЭ	Чистота, мас. % (ГЖХ)	n_D^{25}	$T_{\text{кин}}$, °C (мм. рт. ст.)	$T_{\text{кр}}$, °C	Индекс вязкости	Кинематич. вязкость ^a , ν_{100} , мм ² /с
Тетрабутианоат	99.4	1.445	242–245 (7)	–29	108 [20]	3.52 [20]
			205–208 (9) [21]	–55 [20]		
Тетравалериат	99.3	1.448	273–278 (8)	–47	138 [7]	4.2 [8]
		1.448 [26]	244 (4) [21]	–15 [21]		
Тетракапроат	99.1	1.449	305–309 (12)	–40	131 [20]	4.38 [20]
		1.449 [10]	231–236 (0.3) [8]	–6 [21]		
		1.4519 [8]	201 (0.1) [6]	–40 [9]		
Тетрагептаноат	99.3	1.451	339–343 (12)	–34	131 [20]	4.38 [20]
		1.451 [10]	233 (0.1) [26]	–40 [20]		
		1.451 [10]	221 (0.1) [21]	–1 [21]		

^a Кинематическая вязкость при 100°C.

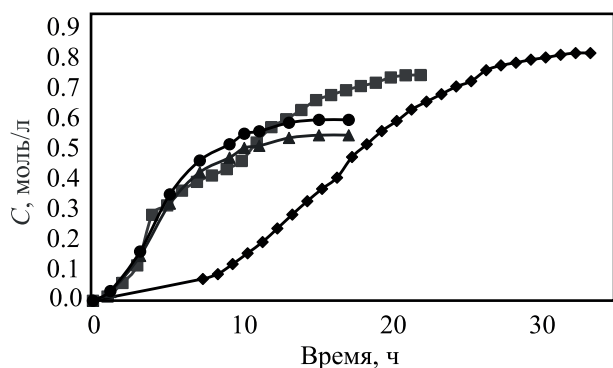


Рис. 5. Сравнение кинетических кривых накопления тетраэфиров ПЭ и карбоновых кислот C_4 – C_7 (в присутствии толуола), $T = 100$ – 110°C ; ■ – тетравалернат ПЭ, ◆ – тетрабутират ПЭ, ▲ – тетрагептаноат ПЭ, ● – тетракапроат ПЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получение сложных эфиров ПЭ, как базовой основы смазочных масел 5 группы, наиболее рационально осуществлять при проведении реакции этерификации одноосновных карбоновых кислот (C_5 – C_7) пентаэритритом в избытке соответствующей кислоты и в присутствии растворителя (толуола) в комплексе с азеотропной ректификацией выделяющейся реакционной воды при температуре 100 – 110°C . При этом обеспечивается выход 78 – 85% целевых продуктов чистотой свыше 99% при минимальных затратах на выделение и очистку.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Емельянов Владимир Владимирович, ассистент, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6228-5713>

Красных Евгений Леонидович, зав. кафедрой, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3886-1450>

Шакун Владимир Андреевич, ассистент, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2682-3024>

Фетисов Дмитрий Александрович, магистрант, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5438-2919>

Леванова Светлана Васильевна, проф. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2539-8986>

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90141.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nagendramma P., Kaul S. Biodegradable lubricants: An overview // *Renew Sustain Energy Reviews*. 2012. № 16. P. 764–774. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.002>.
2. Campanella A., Rustoy E., Baldessari A., Baltanás M.A. Lubricants from chemically modified vegetable oils // *Bioresource technology*. 2010. P. 245–254. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.035>
3. Kalam M.A., Masjuki H.H. Recent development son biodiesel in Malaysia // *J. Sci. Ind. Res*. 2005. V. 64. № 11. P. 920–927.
4. Soni S., Agarwal M. Lubricants from renewable energy sources – a review // *Green Chem. Lett. Rev*. 2014. P. 359–382. <https://doi.org/10.1080/17518253.2014.959565>
5. Калайтман Е.Н. Смазочные масла для реактивных двигателей. М.: Химия, 1968. 196 с.
6. Яновский Л.С., Дубовкин Н.Ф., Галимов Ф.М. Горюче-смазочные материалы для авиационных двигателей. Казань, 2002. 399 с.
7. Тонконогов Б.П., Попова К.А., Хурумова А.Ф. Перспективы применения сложных эфиров отечественного производства в качестве основ масел для авиационной техники // Сб. «Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина». 2015. № 1(278). С. 109–120.
8. Lingnan Lin, Mark A. Kedzierski Density and viscosity of a polyol ester lubricant: Measurement and molecular dynamics simulation. // *Intern. J. of Refrigeration*. 2020. V. 118. P. 188–201. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.07.004>
9. Giuseppe Mancini, Luigi Imparato, Franco Berti. Organic ester for use in lubricant compositions // Patent USA. № 4317780. Published 02.03.1982.
10. Мартемьянов В.С. Кинетика и механизм высокотемпературного окисления сложных эфиров многоатомных спиртов: отчет. Москва: ВНИИ НП, 1988. 51 с.
11. George E. Bohner, John A. Krimmel, Josef J. Schmidt-Collerus, Richard D. Stacy. Properties of polyester fluids with desirable synthetic lubricant characteristics // *J. of Chemical and Engineering Data*. 1962. V. 7. № 4. P. 547–553. <https://doi.org/10.1021/jc60015a035>
12. Yunus R., Fakhru'l-Razi A., Ooi T.L., Omar R. Azni Idriset. Synthesis of palm oil based trimethylolpropane esters with improved pour points // *Ind. Eng. Chem. Res*. 2005. V. 44. P. 8178–8183. <https://doi.org/10.1021/ie050530>

13. Емельянов В.В., Красных Е.Л., Портнова С.В. Характеристики удерживания и энтальпии сорбции сложных эфиров пентаэритрита и кислот C_2-C_8 на неполярной неподвижной фазе // Журн. физ. химии. 2020. V. 94. 10. P. 1567–1575. <https://doi.org/10.31857/S004445372010009X>
14. Nur A.M.A., Robiah Y., Umer R., Nurin W.M.Z. Temperature effect on tribological properties of polyol ester-based environmentally adapted lubricant // Tribology Intern. 2016. V. 93. P. 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.09.014>
15. Quinchia L.A., Delgado M.A., Reddyhoff T., Gallegos C. Spikes H.A. Tribological studies of potential vegetable oil-based lubricants containing environmentally friendly viscosity modifiers // Tribol. Int. 2014. V. 69. P. 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.08.016>
16. Kishore K., Shobha H.K. Thermodynamics of flow and vaporization processes in long-chain liquids // J. Phys. Chem. 1992. V. 96. № 20. P. 8161–8168. <https://doi.org/10.1021/j100199a063>
17. Antonio Razzouk, Ilham Mokbel, Josefa Garc'ia, Josefa Fernandez, Nizar Msakni, Jacques Jose. Vapor pressure measurements in the range 10–5 Pa to 1 Pa of four pentaerythritol esters. Density and vapor–liquid equilibria modeling of ester lubricants // Fluid Phase Equilibria. 2007. V. 260. № 2. P. 248–261. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2007.07.029>
18. Ewen, J.P., Gattinoni, C., Thakkar, F.M., Morgan, N., Spikes, H.A., Dini, D. A comparison of classical force-fields for molecular dynamics simulations of lubricants. Materials (Basel). 2016. P. 1–17. <https://doi.org/10.3390/ma9080651>
19. Bair S. An Introduction to elastohydrodynamic lubrication. In: High pressure rheology for quantitative elastohydrodynamics. 2019. P. 1–19. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64156-4.00001-5>
20. El-Magly I.A., Nagib H.K., Mokhtar W.M. Aspects of the behavior of some pentaerythritol ester base synlubers for turbo-engines // Egyptian J. of Petroleum Volume. 2013. № 1. P. 169–177. DOI:10.1016/j.ejpe.2012.09.008
21. Friedrich L. Breusch, Mitat Oğuzer. Darstellung der di-, tri- und tetra-Homologen Reihen der Methan-Methylol-Fettsäureester (XIV. Mitteil.1) über Isomere und Homologe Reihen) // Chemische Berichte. 1955. V. 88. P. 1511–1518.
22. Сушкова С.В., Леванова С.В., Глазко И.Л., Александров А.Ю. Этерификация лимонной кислоты алифатическими спиртами C_2-C_5 // Тонкие химические технологии. 2017. Т. XII. № 3. С. 28–32. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2017-12-3-28-32>.
23. Марочкин Д.В., Носков Ю.Г., Крон Т.Е., Карчевская О.Г., Корнеева Г.А. Продукты оксосинтеза в производстве сложноэфирных смазочных масел // Научно-технический вестник ОАО НК «РОСНЕФТЬ». 2016. № 45. С. 74–81.
24. Александров А.Ю., Красных Е.Л., Леванова С.В., Глазко И.Л., Лукина О.Д. Разработка технологии получения пластификаторов на основе триметилпропана // Тонкие химические технологии. 2019. Т. 14. № 1. С. 66–74. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2019-14-1-66-74>
25. Травень В.Ф. Органическая химия. Учебное пособие для вузов в 3 т. Т. III. М.: Лаборатория знаний. 2019. 388 с.
26. Bohner G.E., Krimmel J.A., Schmidt-Collérus J.J. Properties of polyester fluids with desirable synthetic lubricant characteristics // J. of Chemical and Engineering Data. 1962. V. 7. P. 547–553.