

УДК 665.947.2:665.947.3:665.944.824.5

ПЕНТАЭРИТРИТОВЫЕ ЭФИРЫ ДИСПРОПОРЦИОНИРОВАННОЙ ТАЛЛОВОЙ КАНИФОЛИ

© А.Н. Евдокимов^{1*}, А.В. Курзин¹, К.А. Пискунов^{2,3}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, 4, Санкт-Петербург, 198095, Россия, eanchem@mail.ru

² ООО «Янтарный поток», ул. Дыбцына, 42, Коряжма, 165650, Россия

³ АО «Группа «Илим»», ул. Марата, 17, Санкт-Петербург, 191025, Россия

С целью получения качественных пентаэритритовых эфиров канифоли (с цветностью по шкале Гарднера не более 3 и температурой размягчения не менее 101 °С) исследована возможность применения диспропорционированной талловой канифоли в качестве источника смоляных кислот с цветностью по шкале Гарднера не более 2. Такие эфиры преимущественно используются в качестве адгезивов в составах для дорожной разметки. Использование диспропорционированного канифольного сырья позволило провести этерификацию в традиционно применяемом в синтезе эфиров канифоли в температурном диапазоне 260–270 °С без использования катализаторов, технологических добавок и вакуумной дистилляции. В результате получены пентаэритритовые эфиры канифоли с высокими качественными характеристиками: цвет по шкале Гарднера – 2.5, кислотное число – 10 мг КОН·г⁻¹, температура размягчения – 103.1 °С. Подобные сложные эфиры диспропорционированной талловой канифоли могут быть также получены на основе других, одно- и многоатомных спиртов, например, метанола, этанола, этиленгликоля, глицерина и др., и использованы в качестве основы адгезивных составов и добавок различного назначения, в которых важна их цветность и ее стабильность.

Ключевые слова: пентаэритритовые эфиры, диспропорционированная талловая канифоль, этерификация, цвет по шкале Гарднера.

Для цитирования: Евдокимов А.Н., Курзин А.В., Пискунов К.А. Пентаэритритовые эфиры диспропорционированной талловой канифоли // Химия растительного сырья. 2025. №4. С. 359–366. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250415951>.

Введение

Талловая и живичная канифоль являются основными промышленными источниками смоляных кислот [1–4]. Сложные эфиры смоляных кислот [1, 5–10], наряду с канифольным мылом и диспропорционированной канифолью, являются крупнотоннажными лесохимическими продуктами органического синтеза [1–6]. Лабораторная и промышленная технология производства различных сложных эфиров канифоли всесторонне изучена [1, 5–16]. Пентаэритритовые эфиры канифоли (талловой/живичной, гидрированной или модифицированной малеиновым ангидридом/фумаровой кислотой) используются в производстве лакокрасочных материалов, защитных и изоляционных покрытий, термопластичных составов для дорожной разметки, адгезивов и клеев различного назначения, в том числе клеев-расплавов, а также добавок в смазочные материалы и полимеры [1, 5, 7, 9–12]. Процесс получения пентаэритритовых эфиров – это, как правило, некаталитическая этерификация при температуре до 280 °С в инертной атмосфере. В последнее время были описаны условия каталитической этерификации с использованием соединений цинка, железа и кремния [9], а также применение добавок (акридон, антрон, ксантон и др.), обеспечивающих получение эфиров с улучшенной цветностью [15]. При этом в течение этерификации либо после ее окончания проводится вакуумное удаление воды вместе с неомыляемыми примесями, присутствующими в исходной канифоли, а также с продуктами декарбоксилирования кислотных компонентов канифоли (в т.ч. примесных) – «канифольными маслами», представляющими собой преимущественно смесь углеводородов [5]. Для производства

* Автор, с которым следует вести переписку.

термопластичных составов для дорожной разметки наиболее востребованы пентаэритритовые эфиры канифоли со следующими свойствами и характеристиками:

- кислотное число – не более 15–20 мг КОН·г⁻¹;
- температура размягчения по методу кольца и шара (КиШ) – не менее 101 °С;
- цвет по шкале Гарднера – не более 3.

Для получения эфиров канифоли с низким значением цветности по шкале Гарднера (0.5–3) их дополнительно очищают различными методами, например, так называемой молекулярной дистилляцией [17]. Из-за высокой температуры кипения тетраэфиров пентаэритрита и смоляных кислот их дистилляцию осуществляют в жестких условиях.

Диспропорционированная канифоль – это многотоннажный продукт, представляющий собой смесь смоляных кислот с минимальным количеством или полным отсутствием сопряженных двойных связей, который получают при каталитическом действии различных веществ, прежде всего, йода или некоторых металлов и солей на живичную или талловую канифоль [1, 18]. Она используется в виде водных растворов калиевых (реже натриевых) солей в составах эмульгаторов при производстве бутадиен-стирольных и бутадиен-нитрильных каучуков эмульсионной полимеризацией [18, 19].

Цель работы – синтез сложных эфиров с улучшенной цветностью (не более 3 по шкале Гарднера) на основе диспропорционированной талловой канифоли и пентаэритрита без применения стабилизационных добавок и дистилляции.

Экспериментальная часть

Реактивы. В работе был использован образец диспропорционированной талловой канифоли, предоставленный ООО «Янтарный поток» (Россия) со свойствами и характеристиками, указанными в таблице 1. 2,2-Бис(гидроксиметил)пропан-1,3-диол (98%, пентаэритрит микронизированный, высший сорт, ООО «Бина Групп», Россия) и толуол (толуол для спектроскопии, АО «ЛенРеактив», Россия) применили без дополнительной очистки.

Методы анализа и контроля. Кислотное число определяли потенциометрическим титрованием по ГОСТ 17823.1-72 [20], используя титратор Titrino Basic 794 (Metrohm). Цвет по шкале Гарднера 50%-ных растворов эфиров в толуоле фиксировали по ISO 4630:2015 [21] на спектроколориметре Lico 200 (Hach). Температуру размягчения эфиров измеряли по ASTM E28-18(2022) [22] методом КиШ на приборе ЛинтеЛ КИШ-20М4 (АО «БСКБ «Нефтехимавтоматика»). Содержание йода определяли с помощью рентгенофлуоресцентного анализатора Compass 200 (ESI).

Синтез эфиров канифоли. Сложные эфиры пентаэритрита и диспропорционированной талловой канифоли синтезированы по методике, в основе которой лежит способ (в отношении температурного режима и соотношения компонентов), предложенный ранее соавторами данной статьи в [23] при получении аналогичных эфиров исходной и обессеренной талловой канифоли: в трехгорлой колбе, снабженной мешалкой, термометром и обратным холодильником с хлоркальциевой трубкой, смешивали 220 г диспропорционированной талловой канифоли и 26 г пентаэритрита. Полученную смесь нагревали в течение 5 ч, постепенно повышая температуру с 100 до 270 °С (после достижения 180 °С скорость подъема температуры составила 20 °С·ч⁻¹). После достижения требуемой температуры контролировали изменение кислотного числа смеси, отбирая пробы из колбы каждые 20 мин, при достижении значения кислотного числа ниже 15 мг КОН/г процесс прекращали. Затем из реакционной массы при пониженном давлении (262–265 °С/0.05–0.07 МПа) удаляли воду и продукты декарбоксилирования смоляных кислот. Остаток – пентаэритритовые эфиры диспропорционированной талловой канифоли, масса которых составила 218 г. У синтезированных эфиров определяли важнейшие характеристики, требуемые для подтверждения их качества: кислотное число, цветность и температуру размягчения.

Обсуждение результатов

Преимущества талловой канифоли для производства ее эфиров по сравнению с живичной заключаются в относительной стабильности качественных показателей и отсутствии пенообразующих нейтральных (неомыляемых) примесей. Исходя из сведений о свойствах, составе и характеристиках использованного в работе образца диспропорционированной талловой канифоли (табл. 1), можно заключить, что она получена

с использованием йода, но в то же время обладает низким значением цветности по шкале Гарднера. Применение диспропорционированной талловой канифоли для получения пентаэритритовых эфиров основывается на том, что она (помимо улучшенной цветности):

- содержит меньшее количество нейтральных веществ в сравнении с талловой канифолью, производимой в России и с некоторыми видами и сортами живичной канифоли;
- состоит в основном из дегидро- и дигидроабиетиновых кислот [1, 7, 18, 24] (рис. 1).

Эти кислоты обладают большей устойчивостью к окислению при хранении и в жестких условиях получения эфиров канифоли (260–270 °С), чем абиетиновая кислота, что должно уменьшить ухудшение цвета эфиров по сравнению с эфирами талловой канифоли.

При этерификации смоляных кислот пентаэритритом последовательно образуется смесь моно-, ди-, три- и тетраэфиров (одна из возможных схем показана на рисунке 2), при этом с увеличением содержания тетраэфиров уменьшается кислотное число и увеличивается температура размягчения. Следует учитывать, что кислотные остатки дегидроабиетиновой и дигидроабиетиновых кислот присоединяются в случайном порядке, в силу чего можно говорить только об усредненном составе эфиров на основе сведений о присутствующих в реакционной смеси смоляных кислотах.

Взаимодействие диспропорционированной талловой канифоли с пентаэритритом на примере главного компонента – дегидроабиетиновой кислоты, с образованием тетраэфиров может быть представлено в виде схемы (рис. 3).

Изменение кислотного числа в процессе получения пентаэритритового эфира диспропорционированной талловой канифоли приведено на рисунке 4.

Таблица 1. Свойства образца диспропорционированной талловой канифоли

Наименование показателя	Значение показателя
Кислотное число, мг КОН·г ⁻¹	164
Содержание неомыляемых веществ, %	6.2
Цвет по шкале Гарднера	Не более 2
Содержание дегидроабиетиновой кислоты, %	73.2
Содержание дигидроабиетиновых кислот, %	3.1
Содержание неидентифицированных смоляных кислот, %	16.1
Содержание йода, мг·кг ⁻¹	67
Содержание смоляных кислот с сопряженными двойными связями (в пересчете на абиетиновую кислоту при $\lambda = 239\text{--}243$ нм), %	0
Содержание смоляных кислот с сопряженными двойными связями (при $\lambda = 241$ нм), %	2.14

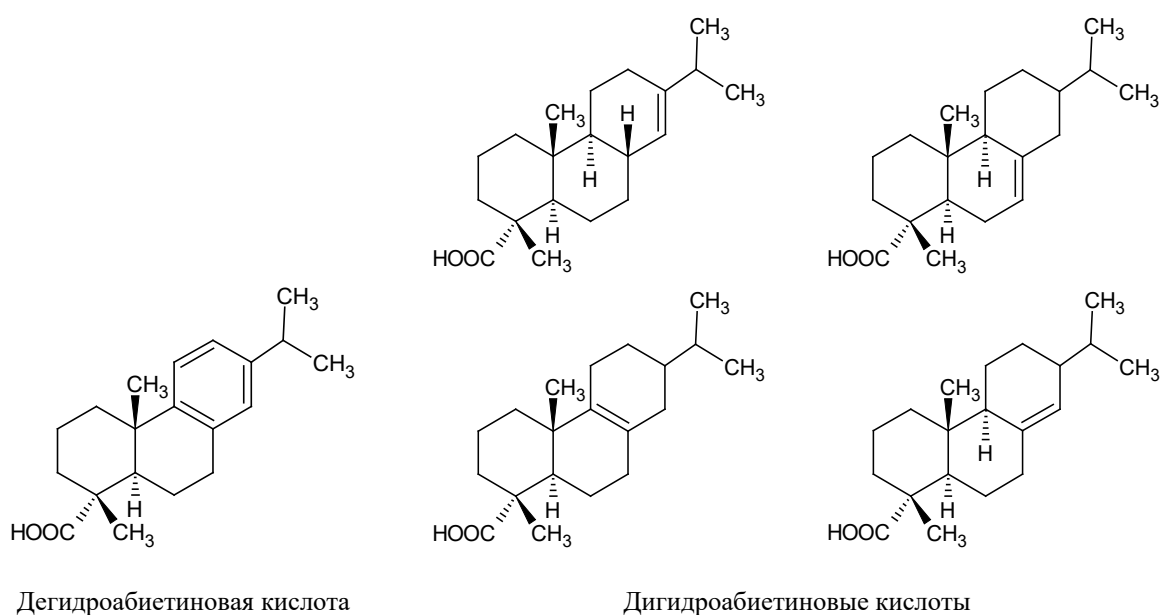


Рис. 1. Главные компоненты диспропорционированной канифоли

Установлено, что для достижения кислотного числа ниже численного значения 15 мг КОН/г достаточно не более 7 ч суммарного времени процесса. Вышеуказанные преимущества очищенной диспропорционированной талловой канифоли позволили получить пентаэритритовые эфиры с наиболее востребованными характеристиками, главной из которых является температура размягчения более 100 °С. Характеристики синтезированных сложных эфиров пентаэритрита и диспропорционированной талловой канифоли приведены в таблице 2. Обнаружено, что цвет эфиров ухудшился на 1 ед. по шкале цветности по Гарднеру. Синтезированные эфиры канифоли не обладали сернистым запахом. Наличие остаточного йода не будет ограничением в применении пентаэритритовых эфиров в традиционных областях их использования.

Приведем сведения о пентаэритритовых эфирах обессеренной талловой канифоли, полученных соавторами данной работы в традиционных условиях этерификации [23]: защитная атмосфера азота, применение – 4,4'-тио-бис(2-*трет*-бутил-5-метилфенола) и бис(моноэтил(3,5-ди-*трет*-бутил-4-гидроксibenзил)фосфоната) кальция: кислотное число – 9.6 мг КОН·г⁻¹, температура размягчения – 103.3 °С, цвет по шкале Гарднера – 2. Использование в [23] талловой канифоли, очищенной кристаллизацией из простых эфиров гликолей в присутствии пероксида водорода, способствовало получению высококачественного пентаэритритового эфира. Однако приведенный в [23] процесс очистки талловой канифоли весьма трудоемкий, требует помимо применения 30%-ного раствора пероксида водорода, еще и использования нескольких традиционных технологических стадий при кристаллизации, таких как растворение, фильтрование, вакуумная сушка, регенерация растворителя и др.

Повторим, что главное направление использования пентаэритритовых эфиров канифоли – в качестве компонента дорожной разметки; и в этом случае важнейшими их характеристиками являются кислотное число, цветность и температура размягчения [10]. В таблице 3 приведены показатели качества промышленно производимых пентаэритритовых эфиров канифоли (выбраны эфиры с наилучшими показателями) в сравнении с синтезированными в данной работе эфирами на основе диспропорционированной талловой канифоли.

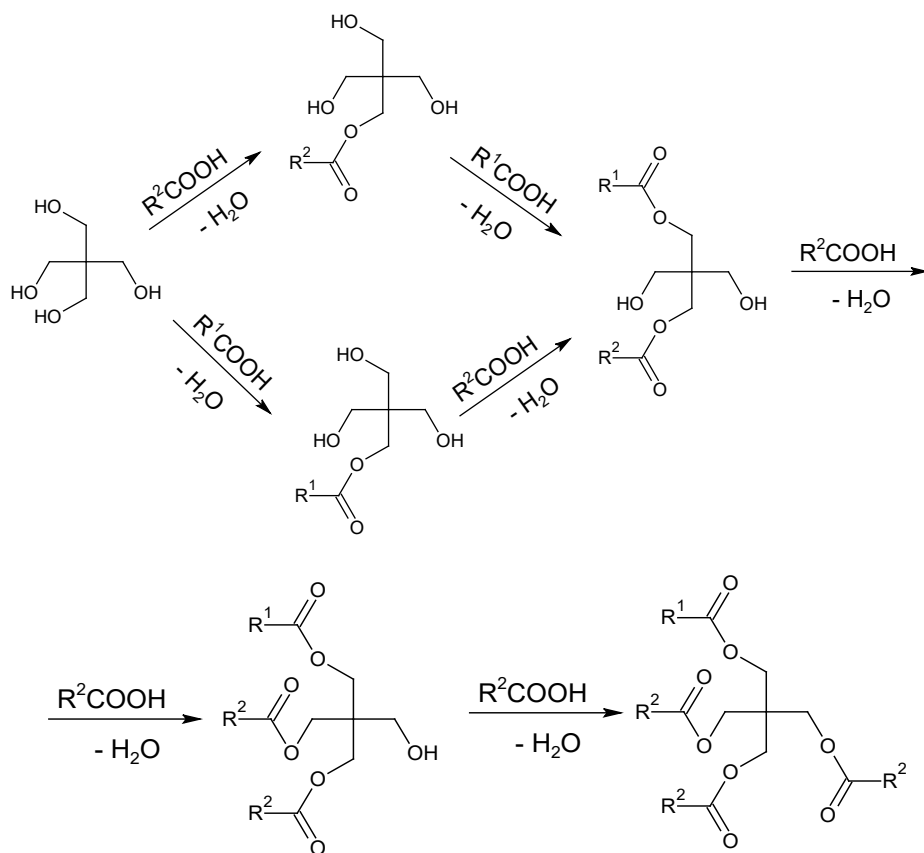


Рис. 2. Схема образования моно-, ди-, три- и тетраэфиров пентаэритрита и смоляных кислот (R^1 и R^2 – остатки дегидроабетиновой и дегидроабетиновых кислот)

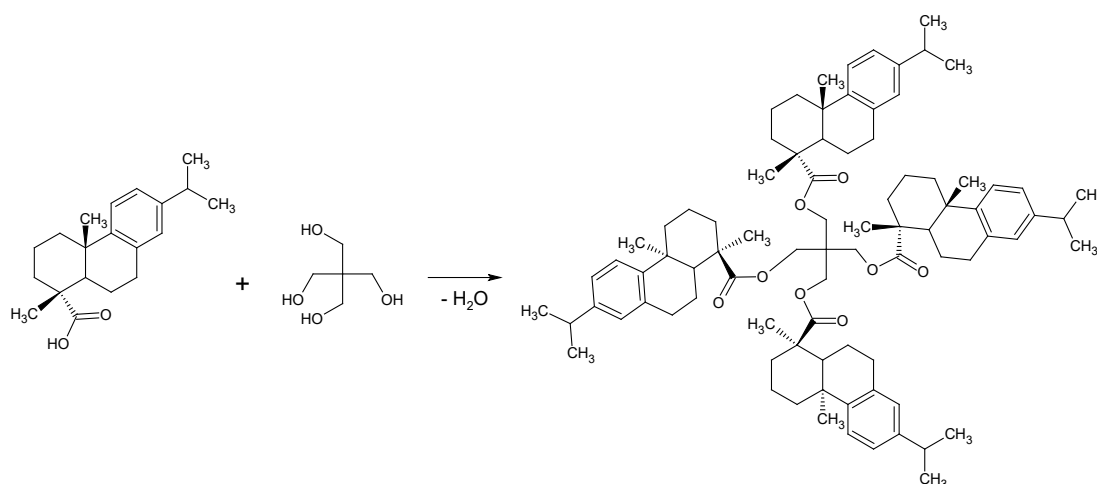


Рис. 3. Схема синтеза тетраэфира пентаэритрита и дегидроабетиновой кислоты

Рис. 4. Изменение кислотного числа реакционной массы в зависимости от времени этерификации

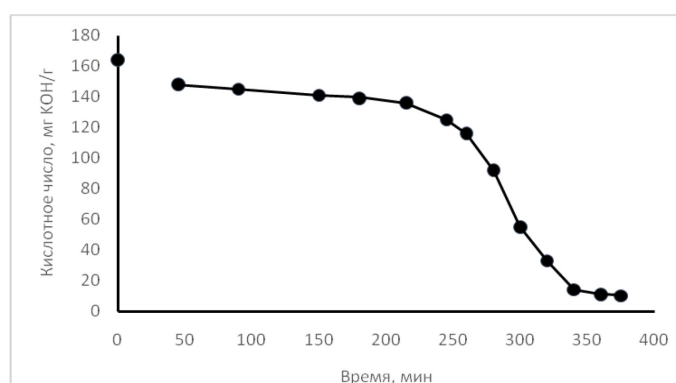


Таблица 2. Свойства пентаэритритовых эфиров диспропорционированной талловой канифоли

Наименование показателя	Значение показателя
Кислотное число, мг КОН·г ⁻¹	10
Цвет по шкале Гарднера	2.5
Содержание йода, мг·кг ⁻¹	10
Температура размягчения (по КиШ), °С	103.1
Сернистый запах	отсутствует

Таблица 3. Показатели качества пентаэритритовых эфиров канифоли

Производитель	Место производства	Характеристика сырья и производства эфиров	Кислотное число, мг КОН·г ⁻¹	Цвет по шкале Гарднера	Температура размягчения (по КиШ), °С
Компания 1	Россия	Канифоль*	15–20	Минимум 5–6	Не более 90
Компания 2	Беларусь	Канифоль**	Не более 15	Минимум 5–6	Не менее 101
Компания 3	Россия	Канифоль***	Не более 20	Минимум 0.5–1.0	Не менее 100
Компания 4	Другие страны	Канифоль***	Не более 10	Минимум 2.5	Не менее 101
Лабораторный синтез в данной статье	Россия	Диспропорционированная канифоль (без применения добавок для стабилизации цвета эфиров и дистилляции)			103.1

*Получены в защитной атмосфере с применением добавок для стабилизации цвета.

**Получены в защитной атмосфере с применением малеинового ангидрида/фумаровой кислоты в процессе синтеза эфиров с целью повышения температуры их размягчения, а также с использованием добавок для стабилизации цвета.

***Получены в защитной атмосфере с применением добавок для стабилизации цвета с последующей дистилляцией.

Выводы

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о возможности получения пентаэритритовых эфиров на основе смоляных кислот диспропорционированной талловой канифоли без использования добавок и вакуумной дистилляции, традиционно применяемых в синтезе сложных эфиров канифоли и обеспечивающих низкие значения цветности по шкале Гарднера. Использование диспропорционированной талловой канифоли с улучшенной цветностью исключает необходимость ее предварительной очистки методом кристаллизации для получения качественных эфиров. Кроме того, пентаэритритовые эфиры диспропорционированной канифоли обладают большей устойчивостью к окислению при хранении по сравнению с аналогичными эфирами талловой канифоли. Подобные сложные эфиры могут быть также получены на основе других спиртов, в том числе многоатомных, и использованы, например, в качестве основы адгезивных/клеевых составов различного назначения, в которых важна их цветность и ее стабильность [10].

Финансирование

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна и ООО «Янтарный поток», АО «Группа «Илим»». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Журавлев П.И. Канифоль, скипидар и продукты их переработки. М., 1988. 69 с.
2. Головин А.И., Трофимов А.Н., Узлов Г.А., Жукова И.П., Киприанов А.И., Прохорчук Т.И., Ковалев В.Е. Лесохимические продукты сульфатцеллюлозного производства. М., 1988. 288 с.
3. Rowe J.W. Natural products of woody plants. Berlin; Heidelberg, 1989. 1243 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-74075-6>.
4. Fiebach K., Grimm D. Resins, Natural // Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Weinheim, 2012. Vol. 31. Pp. 485–490. https://doi.org/10.1002/14356007.a23_073.
5. Бронникова Г.В., Киреев Р.И. Продукты на основе канифоли и скипидара // Лесохимия и подсочка: обзор информ. 1984. №2. С. 12–32.
6. Попова Л.М., Иванова В.А., Вершилов С.В. Синтез N-фенилимидов полифторалкиловых эфиров малеопимаровой кислоты // Химия растительного сырья. 2019. №2. С. 205–211. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2019023999>.
7. Zinkel D.F., Russell J. Naval stores: production, chemistry, utilization. New York, 1989. 1060 p.
8. Mahendra V. Rosin product review // Appl. Mech. Mater. 2019. Vol. 890. Pp. 77–91. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.890.77>.
9. Mardiah M., Samadhi T.W., Wulandari W., Aqsha A., Situmorang Y.A., Indarto A. Recent progress on catalytic of rosin esterification using different agents of reactant // AgriEngineering. 2023. Vol. 5. Pp. 2155–2169. <https://doi.org/10.3390/agriengineering5040132>.
10. Hiscock K., Krajca K. Rosin ester handbook. Almere, 2007. 175 p.
11. de la Rosa-Ramírez H., Dominici F., Ferri J.M., Luzi F., Puglia D., Torre L., López-Martínez J., Samper M.D. Pentaerythritol and glycerol esters derived from gum rosin as bio-based additives for the improvement of processability and thermal stability of polylactic acid // J. Polym. Environ. 2023. Vol. 31, no. 12. Pp. 5446–5461. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02949-0>.
12. Xu Z., Lou W., Zhao G., Zhang M., Hao J., Wang X. Pentaerythritol rosin ester as an environmentally friendly multifunctional additive in vegetable oil-based lubricant // Tribol. Int. 2019. Vol. 135. Pp. 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.038>.
13. Hardhianti M.P.W., Rochmadi, Azis M.M. Kinetic studies of esterification of rosin and pentaerythritol // Processes. 2022. Vol. 10, no. 1. 39. <https://doi.org/10.3390/pr10010039>.
14. Patent Application 20160237313 (US). Methods of making rosin esters / P.A. Williams, L.A. Nelson, R.C. Severance. – 2016.
15. Patent 11111411 (US). Light color rosin ester compositions and methods of making same / M. Shaapman. – 2021.
16. Patent 10011740 (US). Rosin esters and compositions thereof / L.A. Nelson, P.A. Williams, H.J. Miller, M. de Pater, L. Phun. – 2018.

17. Mahrous E.A., Farag M.A. Trends and applications of molecular distillation in pharmaceutical and food industries // Sep. Purif. Rev. 2021. Vol. 51, no. 3. Pp. 300–317. <https://doi.org/10.1080/15422119.2021.1924205>.
18. Папков В.Н., Ривин Э.М., Блинов Е.В. Бутадиен-стирольные каучуки. Синтез и свойства. Воронеж, 2015. 313 с.
19. Папков В.Н., Гусев Ю.К., Ривин Э.М., Блинов Е.В. Бутадиен-нитрильные каучуки. Синтез и свойства. Воронеж, 2014. 218 с.
20. ГОСТ 17823.1-72. Продукты лесохимические. Метод определения кислотного числа. М., 1999. 3 с.
21. ISO 4630:2015. Clear liquids. Estimation of colour by the Gardner colour scale. Geneva, 2015. 6 p.
22. ASTM E28-18(2022). Standard test methods for softening point of resins derived from pine chemicals and hydrocarbons, by ring-and-ball apparatus. West Conshohocken, 2022. 6 p. <https://doi.org/10.1520/E0028-18R22>.
23. Patent 9828526 (US). Method for purification of rosin / A.N. Evdokimov, L.M. Popova, A.V. Kurzin, A.D. Trifonova, G. Buisman. – 2017.
24. Толстиков Г.А., Толстикова Т.Г., Шульц Э.Э., Толстиков С.Е., Хвостов М.В. Смоляные кислоты хвойных России. Химия, фармакология. Новосибирск, 2011. 395 с.

Поступила в редакцию 8 октября 2024 г.

После переработки 24 декабря 2024 г.

Принята к публикации 13 мая 2025 г.

Evdokimov A.N.^{1*}, Kurzin A.V.¹, Piskounov K.A.^{2,3} PENTAERYTHRITOL ESTERS OF DISPROPORTIONATED TALL OIL ROSIN

¹ Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, st. Ivana Chernykh, 4, St. Petersburg, 198095, Russia, eanchem@mail.ru

² Amber Stream LLC, st. Dybtsyna, 42, Koryazhma, 165650, Russia

³ Ilim Group JSC, st. Marata, 17, St. Petersburg, 191025, Russia

In order to obtain high-quality pentaerythritol rosin esters (with a color on the Gardner scale of no more than 3 and a softening point of no less than 101 °C), which are mainly used as adhesives in road marking compositions, the possibility of using disproportionated tall oil rosin as a source of resin acids with Gardner scale color no more than 2. The application of disproportionated rosin as a raw material made it possible to carry out the esterification in the temperature range of 260–270 °C which traditionally used in the synthesis of rosin esters without catalysts, technological additives, protective inert atmosphere and vacuum distillation. As a result, pentaerythritol rosin esters with high quality characteristics were obtained: color on the Gardner scale 2.5, acid number no more than 10 mg KOH·g⁻¹, softening point no less than 103.1 °C. Similar esters of disproportionated tall oil rosin can also be obtained from other alcohols (methanol, ethanol, ethylene glycol and glycerol) and used as the basis for adhesive compositions and additives for various purposes, in which their color and its stability are important.

Keywords: pentaerythritol esters, disproportionated tall oil rosin, esterification, Gardner color.

For citing: Evdokimov A.N., Kurzin A.V., Piskounov K.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2025, no. 4, pp. 359–366. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250415951>.

References

1. Zhuravlev P.I. *Kanifol', skipidar i produkty ikh pererabotki*. [Rosin, turpentine, and their processed products]. Moscow, 1988, 69 p. (in Russ.).
2. Golovin A.I., Trofimov A.N., Uzlov G.A., Zhukova I.P., Kiprianov A.I., Prokhorchuk T.I., Kovalev V.Ye. *Lesokhimicheskiye produkty sulfatselluloznogo proizvodstva*. [Wood chemical products of the sulfate pulp production]. Moscow, 1988, 288 p. (in Russ.).
3. Rowe J.W. *Natural products of woody plants*. Berlin; Heidelberg, 1989, 1243 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-74075-6>.
4. Fiebach K., Grimm D. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim, 2012, vol. 31, pp. 485–490. https://doi.org/10.1002/14356007.a23_073.
5. Bronnikova G.V., Kireyev R.I. *Lesokhimiya i podsochka: obzor. inform.*, 1984, no. 2, pp. 12–32. (in Russ.).
6. Popova L.M., Ivanova V.A., Vershilov S.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2019, no. 2, pp. 205–211. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2019023999>. (in Russ.).
7. Zinkel D.F., Russell J. *Naval stores: production, chemistry, utilization*. New York, 1989, 1060 p.
8. Mahendra V. *Appl. Mech. Mater.*, 2019, vol. 890, pp. 77–91. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.890.77>.

* Corresponding author.

9. Mardiah M., Samadhi T.W., Wulandari W., Aqsha A., Situmorang Y.A., Indarto A. *AgriEngineering*, 2023, vol. 5, no. 4, pp. 2155–2169. <https://doi.org/10.3390/agriengineering5040132>.
10. Hiscock K., Krajca K. *Rosin ester handbook*. Almere, 2007, 175 p.
11. de la Rosa-Ramírez H., Dominici F., Ferri J.M., Luzi F., Puglia D., Torre L., López-Martínez J., Samper M.D. *J. Polym. Environ.*, 2023, vol. 31, no. 12, pp. 5446–5461. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02949-0>.
12. Xu Z., Lou W., Zhao G., Zhang M., Hao J., Wang X. *Tribol. Int.*, 2019, vol. 135, pp. 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.038>.
13. Hardhianti M.P.W., Rochmadi, Azis M.M. *Processes*, 2022, vol. 10, no. 1, 39. <https://doi.org/10.3390/pr10010039>.
14. Patent Application 20160237313 (US). 2016.
15. Patent 11111411 (US). 2021.
16. Patent 10011740 (US). 2018.
17. Mahrous E.A., Farag M.A. *Sep. Purif. Rev.*, 2021, vol. 51, no. 3, pp. 300–317. <https://doi.org/10.1080/15422119.2021.1924205>.
18. Papkov V.N., Rivin E.M., Blinov Ye.V. *Butadien-stirol'nyye kauchuki. Sintez i svoystva*. [Butadiene-styrene rubbers. Synthesis and properties]. Voronezh, 2015, 313 p. (in Russ.).
19. Papkov V.N., Gusev Yu.K., Rivin E.M., Blinov Ye.V. *Butadien-nitril'nyye kauchuki. Sintez i svoystva*. [Butadiene-nitrile rubbers. Synthesis and properties]. Voronezh, 2014, 218 p. (in Russ.).
20. *GOST 17823.1-72. Produkty lesokhimicheskoye. Metod opredeleniya kislotnogo chisla*. [GOST 17823.1-72. Wood chemical products. Method of acid number determination]. Moscow, 1999. 3 p. (in Russ.).
21. *ISO 4630:2015. Clear liquids. Estimation of colour by the Gardner colour scale*. Geneva, 2015, 6 p.
22. *ASTM E28-18(2022). Standard test methods for softening point of resins derived from pine chemicals and hydrocarbons, by ring-and-ball apparatus*. West Conshohocken, 2022, 6 p. <https://doi.org/10.1520/E0028-18R22>.
23. Patent 9828526 (US). 2017.
24. Tolstikov G.A., Tolstikova T.G., Shul'ts E.E., Tolstikov S.Ye., Khvostov M.V. *Smolyanyye kisloty khvoynykh Rossii. Khimiya, farmakologiya*. [Resin acids from Russian forest conifers. Chemistry and pharmacology]. Novosibirsk, 2011, 395 p. (in Russ.).

Received October 8, 2024

Revised December 24, 2024

Accepted May 13, 2025

Сведения об авторах

Евдокимов Андрей Николаевич – кандидат химических наук, заведующий кафедрой материаловедения и технологии машиностроения, eanchem@mail.ru

Курзин Александр Вячеславович – кандидат химических наук, доцент кафедры органической химии, zakora@mail.ru

Пискунов Кирилл Александрович – генеральный директор ООО «Янтарный поток», директор по эффективности и развитию лесохимии АО «Группа «Илим», kir_us@mail.ru

Information about authors

Evdokimov Andrey Nikolaevich – Candidate of Chemical Sciences, Head of the Department of Materials Science and Mechanical Engineering, eanchem@mail.ru

Kurzin Aleksandr Vyacheslavovich – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Organic Chemistry, zakora@mail.ru

Piskounov Kirill Aleksandrovich – General Director Amber Stream LLC; Excellence and Development Director, Forest Chemicals, Ilim Group JSC, kir_us@mail.ru