

УДК 547.912+547.326

СИНТЕЗ, ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТЕРМООКСИЛИТЕЛЬНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ СЛОЖНЫХ ТРИЭФИРОВ 1,3,5-АДАМАНТАНТРИОЛА И 7-ЭТИЛ-1,3,5-АДАМАНТАНТРИОЛА

© 2019 г. Е. А. Ивлева¹, *, М. Р. Баймуратов¹, Ю. А. Малиновская¹, Ю. Н. Климович¹,
В. А. Тыщенко², И. А. Куликова², В. В. Поздняков^{3,1}, К. А. Овчинников³

¹Самарский государственный технический университет, Самара, 445000 Россия

²Средневолжский научно-исследовательский институт по нефтепереработке, Новокуйбышевск, 446200 Россия

³АО «ВНИИ НП», Москва, 121609 Россия

*E-mail: elena.a.ivleva@yandex.com

Поступила в редакцию 15.04.2018 г.

После доработки 30.06.2018 г.

Принята к публикации 02.07.2019 г.

Осуществлен синтез и изучены физико-химические и термоокислительные свойства ряда триэфиров на основе 1,3,5-адамантантриола и 7-этил-1,3,5-адамантантриола и алифатических кислот C₄–C₆. Проведено сравнение свойств полученных эфиров с эфирами пентаэритрита. Синтезированные эфиры имеют температуры застывания ниже минус 40 градусов, диапазон вязкостей при 100°C варьируется от 4.361 до 9.912 мм²/с, значения показателей термоокислительной стабильности составляют 221.6–240.3°C.

Ключевые слова: сложные эфиры, термоокислительная стабильность, адамантантриол, термостабильные основы масла

DOI: 10.1134/S002824211906008X

По мере развития техники с повышением механических, температурных нагрузок в агрегатах и увеличением сроков замены масел непрерывно повышаются требования к основам масел. В связи с этим все большее значение приобретают высокоиндексные базовые масла, имеющие высокую термостабильность, хорошую приемистость к пакетам многофункциональных присадок, хорошие пусковые свойства при низких температурах и необходимую вязкость в пределах рабочих температур.

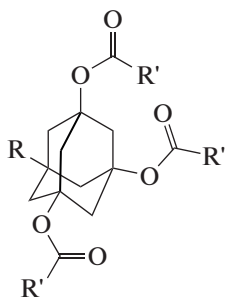
Анализ перспектив развития авиационных ГТД [1] показывает, что в двигателях V–VI поколений уровень рабочих температур масла может достигать 240–250°C. Поэтому одним из основных требований к качеству смазочных масел для авиационных ГТД (Б-3В, ЛЗ-240, ПТС-225 и др.), созданных на основе эфиров пентаэритрита и жирных кислот C₄–C₁₀ с использованием комплекса присадок, является их высокая термостабильность, характеризующая способность масла сохранять на необходимом уровне физико-химические и эксплуатационные свойства при длительной работе в двигателе.

Использование адамантана и его производных в качестве структурных субъединиц в современ-

ных материалах обусловлено их высокой термической и термоокислительной стабильностью [2–4]. Одним из перспективных направлений использования производных адамантана является создание высокотемпературных основ масел с повышенными эксплуатационными характеристиками. В качестве таких основ предлагаются адамантансодержащие сложные эфиры [5–17]. В развитии этого направления весьма перспективными представляются полиэфиры, полученные из многоатомных спиртов – 1,3,5-адамантантриола и 1,3,5,7-адамантантетраола. Эти соединения уже нашли свое применение в качестве исходных субстратов в синтезе широкого ряда новых полифункциональных производных с ценными свойствами [18–28]. Поэтому использование их в качестве платформы для создания новых термостабильных основ масел для теплонапряженных газотурбинных двигателей представляется весьма актуальным.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Авторами был синтезирован и исследован ряд сложных триэфиров 7-R-1,3,5-адамантантриолов:



R = H, R' = C₃H₇ (I); R = H, R' = C₄H₉ (II);

R = H, R' = C₅H₁₁ (III);

R = C₂H₅, R' = C₃H₇ (IV); R = C₂H₅, R' = C₄H₉ (V);

R = C₂H₅, R' = C₅H₁₁ (VI)

Качественные показатели и структуры синтезированных соединений подтверждали современными хроматографическими и спектральными методами (ГХ-МС, элементный анализ, ИК- и ЯМР-спектроскопия). Масс-спектры получены на хромато-масс-спектрометре ThermoFinnigan DSQ с использованием капиллярной колонки ВРХ-5 30 × 0.32 при энергии ионизирующих электронов 70 эВ. Элементный анализ выполнен на элементном анализаторе EuroVector 3000 EA с использованием в качестве стандарта L-цистина. ИК спектры записаны на спектрометре Shimadzu IRAffinity-1 на приставке НВПО. Спектры ЯМР ¹H, ¹³C регистрировали на спектрометре Jeol JNM EСХ-400 (рабочая частота 400 МГц) в CDCl₃.

1,3,5-Адамантантриол получен по методике [29]. Выход 51%, т. пл. 203–205°С (лит. т. пл. 202–204°С). Содержание основного вещества – 98.5%.

7-Этил-1,3,5-адамантантриол. Смесь 50 г (0.3 моль) 1-этиладамантана, 5 г (0.03 моль) N-гидроксифталимида, 0.9 г (0.003 моль) ацетилацетоната кобальта(II) нагревают при интенсивном перемешивании до 60°С в 350 мл ледяной уксусной кислоты. После этого в реакционный сосуд пропускают ток молекулярного кислорода со скоростью 3–5 пузырьков в секунду. Реакционную массу перемешивают при данных условиях в течение 40 ч. После этого добавляют еще 5 г (0.03 моль) N-гидроксифталимида, 0.9 г (0.003 моль) ацетилацетоната кобальта(II) и 1.32 г (0.015 моль) диоксида марганца и продолжают реакцию в заданных условиях еще 20 ч. Затем реакционную массу охлаждают, отфильтровывают диоксид марганца, уксусную кислоту упаривают в вакууме и перепаривают с толуолом 2–3 раза. К остатку добавляют 200 мл метил-*трет*-бутилового эфира, перемешивают при нагревании в течение 1.5 ч и, не охлаждая, фильтруют выпавший осадок 7-этил-1,3,5-адамантантриола, который загружают в аппарат Сокслета и экстрагируют этилацетатом в течение 60 ч. Чистый 7-этил-1,3,5-адамантантриол быстро кристаллизуется из этилацетата; осадок отфильтровывают и сушат. Выход 7-этил-

1,3,5-адамантантриола составляет 35.5 г (45%). Содержание основного вещества – 98.5%. Т. пл. 238–240°С. Спектр ЯМР ¹H, δ, м.д.: 0.72 т (3H, J = 7.32 Гц, CH₂CH₃), 1.08–1.18 м (8H, CH₂CH₃, CH₂Ad), 1.30–1.40 м (6H, CH₂Ad), 4.45 с (3H, OH). Спектр ЯМР ¹³C, δ, м.д.: 8.1 (CH₃), 34.6 (CH₂), 36.8 (C), 48.3 (CH₂), 52.5 (CH₂), 70.0 (C). Масс-спектр, m/z (I_{отн.}, %): 212 [M⁺] (10), 164 (12), 138 (36), 127 (54), 110 (20), 58 (74), 55 (78), 43 (100). Найдено, %: C 67.92; H 9.52; C₁₂H₂₀O₃. Вычислено, %: C 67.89; H 9.50.

Адамантан-1,3,5-триилтрибутоанат (I) Смесь 24 г (0.13 моль) 1,3,5-адамантантриола, 100 мл масляной кислоты, 30 мл петролейного эфира и 0.57 мл трифторметансульфокислоты нагревают при кипении при интенсивном перемешивании до окончания отделения воды (примерно 16 ч). Реакционную смесь охлаждают, разбавляют 200 мл толуола, промывают 5%-ным водным раствором КОН, затем водой до нейтральной среды, сушат над сульфатом натрия. Растворитель упаривают в вакууме, остаток очищают вакуумной перегонкой, собирая фракцию с т. кип. 155–156°С (0.0081 торр). Масса 26.7 г, выход 52%. ИК-спектр, ν, см⁻¹: 1730 (C=O). Спектр ЯМР ¹H, δ, м.д.: 0.89 т (9H, J = 7.56 Гц, CH₃), 1.56 секстет (6H, J = 7.36 Гц, CH₂), 2.00–2.01 м (6H, CH₂Ad), 2.14–2.18 м (6H, CH₂Ad), 2.36–2.39 м (1H, CHAd), 2.40–2.49 м (6H, CH₂). Спектр ЯМР ¹³C, δ, м.д.: 13.7 (CH₃), 18.5 (CH₂), 29.3 (CH), 37.4 (CH₂), 39.0 (CH₂), 44.2 (CH₂), 79.7 (C), 172.7 (C). Масс-спектр, m/z (I_{отн.}, %): 394 [M⁺] (<1), 305 (17), 246 (12), 219 (20), 176 (82), 147 (50), 105 (18), 71 (100), 43 (48). Найдено, %: C 67.05; H 8.77; C₂₂H₃₄O₆. Вычислено, %: C 66.98; H 8.69.

Адамантан-1,3,5-триилтрипентаноат (II) получен аналогично триэфиру (I) из 20 г (0.108 моль) 1,3,5-адамантантриола, 90 мл валериановой кислоты, 0.48 мл трифторметансульфокислоты и 25 мл петролейного эфира. Масса продукта после перегонки составляет 23 г, выход 49%. Т. кип. 200–202°С (0.030 торр). ИК-спектр, ν, см⁻¹: 1730 (C=O). Спектр ЯМР ¹H, δ, м.д.: 0.88 т (9H, J = 7.36 Гц, CH₃), 1.25–1.35 м (6H, CH₂), 1.48–1.54 м (6H, CH₂Ad), 2.00–2.01 м (6H, CH₂Ad), 2.09 с (1H, CHAd), 2.17–2.20 м (6H, CH₂), 2.37–2.49 м (6H, CH₂). Спектр ЯМР ¹³C, δ, м.д.: 13.8 (CH₃), 22.3 (CH₂), 27.1 (CH₂), 29.3 (CH), 35.2 (CH₂), 39.0 (CH₂), 44.3 (CH₂), 79.7 (C), 172.9 (C). Масс-спектр, m/z (I_{отн.}, %): 436 [M⁺] (<1), 334 (28), 333 (20), 275 (32), 274 (22), 233 (30), 232 (36), 190 (40), 189 (68), 148 (38), 147 (100), 106 (20), 84 (52), 56 (50). Найдено, %: C 68.83; H 9.30; C₂₅H₄₀O₆. Вычислено, %: C 68.78; H 9.24.

Адамантан-1,3,5-триилтригексаноат (III) получен аналогично триэфиру (I) из 18 г (0.098 моль)

1,3,5-адамтантриола, 90 мл капроновой кислоты, 0.43 мл трифторметансульфокислоты и 30 мл петролейного эфира. Масса продукта после перегонки составляет 20.8 г, выход 45%. Т. кип. 195–197°C (0.008 торр). ИК-спектр, ν , см⁻¹: 1730 (C=O). Спектр ЯМР ¹H, δ , м.д.: 0.84 т (9H, $J = 7.32$ Гц, CH₃), 1.21–1.27 м (6H, CH₂, CH₂Ad), 1.48–1.55 м (6H, CH₂Ad), 1.95–2.03 м (4H, CH₂Ad), 2.07 с (1H, CHAd), 2.12–2.17 м (6H, CH₂), 2.36–2.46 м (6H, CH₂). Спектр ЯМР ¹³C, δ , м.д.: 13.9 (CH₃), 22.4 (CH₂), 24.7 (CH₂), 29.3 (CH), 31.3 (CH₂), 35.4 (CH₂), 39.0 (CH₂), 44.2 (CH₂), 79.7 (C), 172.9 (C). Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 478 [M⁺] (<1), 362 (18), 303 (42), 247 (34), 246 (32), 204 (100), 148 (72), 99 (38), 71 (24), 43 (18). Найдено, %: C 70.32; H 9.73; C₂₈H₄₆O₆. Вычислено, %: C 70.26; H 9.69.

7-Этиладамтан-1,3,5-триилтрибутаноат (IV) получен аналогично триэфиру (I) из 14 г (0.066 моль) 7-этил-1,3,5-адамтантриола, 70 мл масляной кислоты, 0.29 мл трифторметансульфокислоты и 25 мл петролейного эфира. Масса продукта после перегонки составляет 19 г. Выход 68%. Т. кип. 159–160°C (0.0093 торр). ИК спектр, ν , см⁻¹: 1734 (C=O). Спектр ЯМР ¹H, δ , м.д.: 0.82 т (3H, $J = 7.56$ Гц, CH₃), 0.91 т (9H, $J = 7.32$ Гц, CH₃), 1.32 кв (2H, $J = 7.56$ Гц, CH₂), 1.52–1.62 м (6H, CH₂Ad), 1.79 с (6H, CH₂Ad), 2.11–2.20 м (6H, CH₂), 2.43–2.49 м (6H, CH₂). Спектр ЯМР ¹³C, δ , м.д.: 7.5 (CH₃), 13.7 (CH₃), 18.6 (CH₂), 34.4 (CH₂), 36.8 (C), 37.4 (CH₂), 43.7 (CH₂), 43.9 (CH₂), 79.9 (C), 172.8 (C). Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 422 [M⁺] (<1), 333 (8), 204 (36), 175 (60), 133 (54), 70 (100), 42 (98). Найдено, %: C 68.27; H 9.11; C₂₄H₃₈O₆. Вычислено, %: C 68.22; H 9.06.

7-Этиладамтан-1,3,5-триилтрипентаноат (V) получен аналогично триэфиру (I) из 26 г (0.122 моль) 7-этил-1,3,5-адамтантриола, 95 мл валериановой кислоты, 0.54 мл трифторметансульфокислоты и 30 мл петролейного эфира. Масса продукта после перегонки составляет 17 г. Выход 30%. Т. кип. 185–186°C (0.0081 торр). ИК-спектр, ν , см⁻¹: 1734 (C=O). Спектр ЯМР ¹H, δ , м.д.: 0.82 т (3H, $J = 7.56$ Гц, CH₃), 0.87 т (9H, $J = 7.32$ Гц, CH₃), 1.25–1.32 м (8H, CH₂), 1.48–1.55 м (6H, CH₂Ad), 1.78 с (6H, CH₂Ad), 2.18 т (6H, $J = 7.32$ Гц, CH₂), 2.39–2.47 м (6H, CH₂). Спектр ЯМР ¹³C, δ , м.д.: 7.5 (CH₃), 13.8 (CH₃), 22.3 (CH₂), 27.2 (CH₂), 34.4 (CH₂), 35.2 (CH₂), 36.7 (C), 43.7 (CH₂), 43.9 (CH₂), 79.9 (C), 173.0 (C). Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 464 [M⁺] (<1), 362 (10), 260 (32), 217 (70), 175 (78), 144 (30), 133 (52), 84 (100), 56 (80). Найдено, %: C 69.84; H 9.61; C₂₇H₄₄O₆. Вычислено, %: C 69.79; H 9.55.

7-Этиладамтан-1,3,5-триилтригексаноат (VI) получен аналогично триэфиру (I) из 12 г

(0.057 моль) 7-этил-1,3,5-адамтантриола, 60 мл капроновой кислоты, 0.18 мл трифторметансульфокислоты и 30 мл петролейного эфира. Масса продукта после перегонки составляет 15 г. Выход 52%. Т. кип. 208–209°C (0.0081 торр). ИК-спектр, ν , см⁻¹: 1736 (C=O). Спектр ЯМР ¹H, δ , м.д.: 0.83 т (3H, $J = 7.56$ Гц, CH₃), 0.88 т (9H, $J = 7.32$ Гц, CH₃), 1.24–1.34 м (14H, CH₂), 1.50–1.58 м (6H, CH₂Ad), 1.79 с (6H, CH₂Ad), 2.19 т (6H, $J = 7.32$ Гц, CH₂), 2.42–2.48 м (6H, CH₂). Спектр ЯМР ¹³C, δ , м.д.: 7.5 (CH₃), 13.9 (CH₃), 22.4 (CH₂), 24.8 (CH₂), 31.3 (CH₂), 34.4 (CH₂), 35.4 (CH₂), 36.8 (C), 43.7 (CH₂), 43.9 (CH₂), 79.9 (C), 173.0 (C). Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 506 [M⁺] (<1), 309 (8), 331 (5), 274 (32), 232 (66), 175 (74), 144 (30), 133 (78), 98 (100), 70 (70), 42 (60). Найдено, %: C 77.18; H 10.01; C₃₀H₅₀O₆. Вычислено, %: C 77.11; H 9.95.

Физико-химические свойства синтезированных диэфиров изучали методами ГОСТ и ASTM (кинематическая вязкость при положительных и отрицательных температурах по ASTM D7042, плотность при 20°C по ASTM D7042, температура вспышки в открытом тигле по ГОСТ 4333, температура застывания по ГОСТ 20287, кислотное число по ГОСТ 11362).

Термоокислительную стабильность образцов в тонком слое исследовали методом дифференциальной сканирующей калориметрии высокого давления (ДСК ВД) на приборе DSC 204 HP Phoenix фирмы NETZSCH-Gerätebau GmbH (Германия) по ASTM E2009 (testmethod B) на алюминиевых тиглях в среде кислорода (35 атм, поток 50 мл/мин) и динамическом режиме (от 70 до 300°C со скоростью 10°C/мин).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе были синтезированы два ряда сложных эфиров на основе 1,3,5-адамтантриола и 7-этил-1,3,5-адамтантриола и карбоновых кислот C₄, C₅, C₆ линейного строения (масляная, валериановая, капроновая). Выбор данных кислот определялся получением эфиров с необходимыми физико-химическими и термоокислительными свойствами. Синтез сложных эфиров I–VI осуществляли этерификацией в присутствии трифторметансульфокислоты. Выходы эфиров I–VI после очистки вакуумной перегонкой составляют 30–68%.

Данные по физико-химическим свойствам (кинематической вязкости при положительных и отрицательных температурах, температуре застывания, температуре вспышки, плотности) и термоокислительной стабильности по ASTM E2009 соединений I–VI и товарных эфиров пентаэритрита Synative ES2939 и NB5750 представлены в табл. 1.

Четко прослеживается зависимость между строением эфиров двух рядов и их физико-хими-

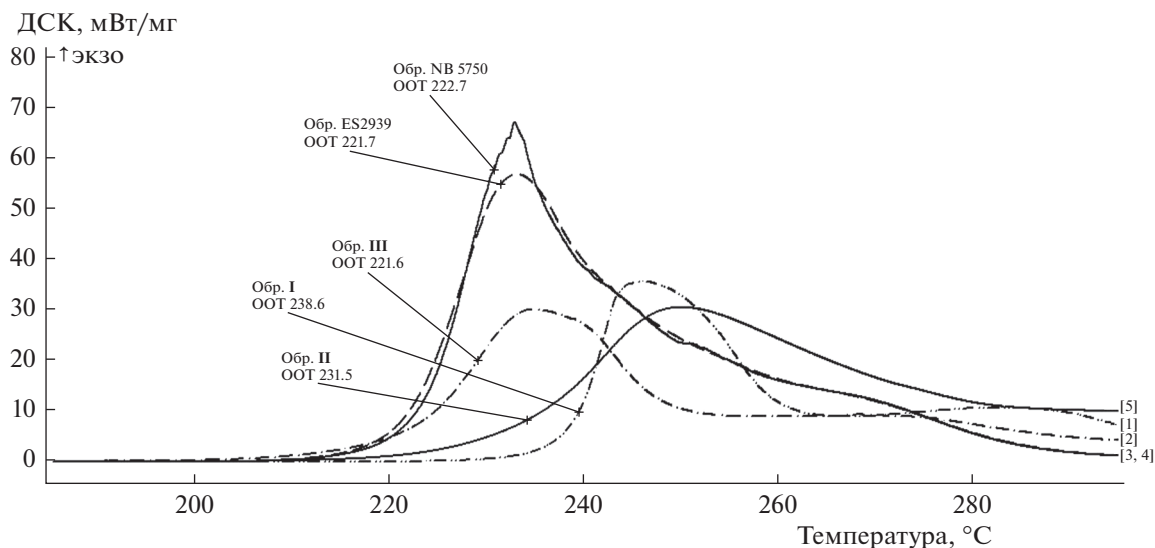


Рис. 1. Термоокислительная стабильность по ASTM E2009 триэфиров 1,3,5-адамantanтриолов (I–III) и эфиров пентаэритрита.

ческими свойствами — отсутствием или наличием алкильного заместителя у 7-ого атома углерода адамantanового каркаса. Так эфиры I–III имеют более высокую вязкость при положительной и отрицательной температурах, чем эфиры IV–VI. Если у эфиров IV–VI вязкости повышаются с увеличением длины R'-радикала, то у эфиров I–III наблюдается обратная зависимость, что, по-видимому, связано с объемом и пространственным расположением заместителей. Все синтезиро-

ванные эфиры имеют хорошие значения показателя кислотного числа (отсутствие) и температуры застывания ниже –40°C. Остальные показатели зависят от длины алкильного радикала в кислотном остатке — с увеличением количества атомов углерода плотность снижается, температура вспышки повышается, термоокислительные свойства ухудшаются.

На рис. 1–2 представлены результаты исследований термоокислительной стабильности эфиров

Таблица 1. Физико-химические свойства эфиров 7-R-1,3,5-адамantanтриолов (I–VI) и эфиров пентаэритрита

№ образца	I	II	III	IV	V	VI	Эфиры пентаэритрита	
	R =	–H	–H	–H	–C ₂ H ₅	–C ₂ H ₅	–C ₂ H ₅	Synative
R' =	–C ₃ H ₇	–C ₄ H ₉	–C ₅ H ₁₁	–C ₃ H ₇	–C ₄ H ₉	–C ₅ H ₁₁	ES 2939	
Брутто-формула	C ₂₂ H ₃₄ O ₆	C ₂₅ H ₄₀ O ₆	C ₂₈ H ₄₆ O ₆	C ₂₄ H ₃₈ O ₆	C ₂₇ H ₄₄ O ₆	C ₃₀ H ₅₀ O ₆	Смесь эфиров	Смесь эфиров
Мол. масса, г/моль	394	436	478	422	464	506		
Вязкость кинематическая, мм ² /с:								
при 100°C	9.912	9.461	9.426	4.361	4.713	4.965	4.910	5.013
при 40°C	118.1	91.35	82.57	27.45	32.33	35.82	23.33	23.91
при –30°C	>100000	41964	28447	3535	3625	4105	1947	2040
при –40°C	–	>100000	65500	11054	11406	13200	6411	6716
Температура застывания, °C	–40	–42	–47	–60	–60	–56	–60	–58
Температура вспышки в открытом тигле, °C	246	258	>270	248	262	268	264	262
Плотность при 20°C, кг/м ³	1093	1062	1038	1037	1021	1011	988.6	986.4
Кислотное число, мг KOH/г образца	Отс.	Отс.	Отс.	Отс.	Отс.	Отс.	Отс.	Отс.
Термоокислительная стабильность ASTM E2009, OOT, °C	238.6	231.5	221.6	240.3	233.8	224.9	221.7	222.7

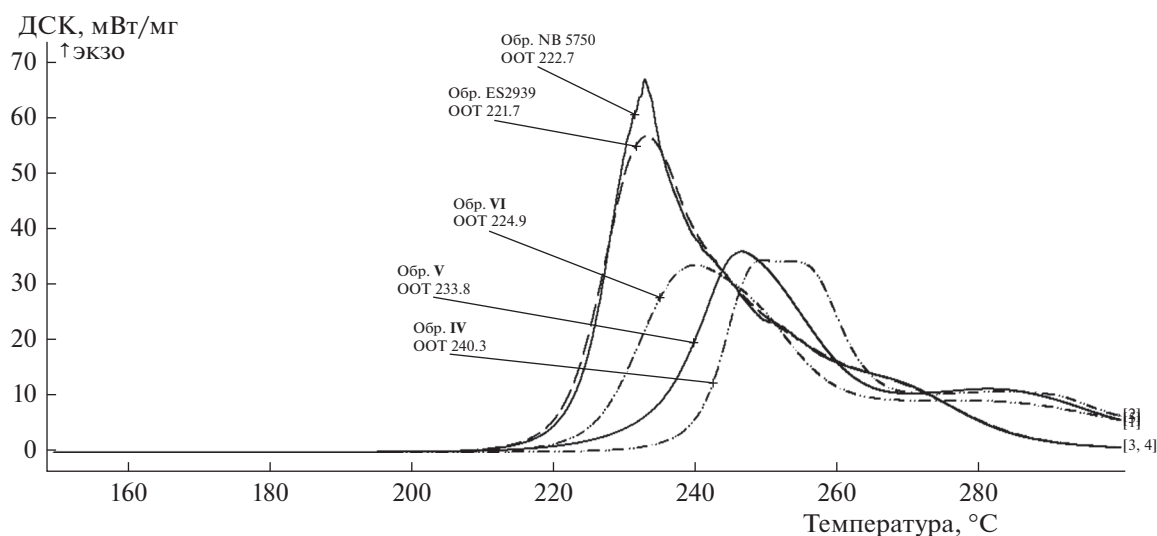


Рис. 2. Термоокислительная стабильность по ASTM E2009 триэфиров 7-этил-1,3,5-адамантантриолов (IV–VI) и эфиров пентаэритрита.

по ASTM E2009 в виде начальной температуры окисления (ООТ). Из представленных данных видно, что с увеличением длины углеводородного радикала от C3 до C5 у эфиров I–VI термоокислительная стабильность постепенно снижается. Эфиры I, II, IV, V, VI обладают более высокими значениями термоокислительной стабильности (ООТ 240.3–224.9°C), а эфир III (ООТ 221.6°C) находится на уровне товарных пентаэритритовых эфиров (ООТ 221.7–222.7°C). Интенсивность окисления эфиров адамантанового ряда (30–35 мВт/мг) примерно в два раза ниже, чем эфиров пентаэритрита (55–65 мВт/мг).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние длины углеводородного остатка и строения эфиров 7-R-1,3,5-адамантантриолов на физико-химические и термоокислительные свойства. Проведено сравнение адамантансодержащих эфиров с товарными пентаэритритовыми эфирами. По результатам исследования физико-химических свойств и термоокислительной стабильности синтезированные эфиры I–VI могут найти применение в качестве высокотемпературных основ смазочных материалов или их компонентов, особенно эфиры IV–VI.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение 14.577.21.0237, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57716X0237).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ивлева Елена Александровна, к.х.н., доцент, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5778-860X>

Баймуратов Марат Рамильевич, к.х.н., ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3326-5561>

Малиновская Юлия Александровна, д.т.н., ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4880-7041>

Климочкин Юрий Николаевич, д.х.н., профессор, зав. кафедрой, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7335-4040>

Тыщенко Владимир Александрович, д.т.н. генеральный директор

Куликова Ида Аркадьевна, к.т.н., ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7172-2559>

Поздняков Виктор Викторович, к.х.н., доцент, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8889-3162>

Овчинников Кирилл Александрович, к.х.н., ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9298-3475>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабкин В.И., Алексахин А.А., Яновский Л.С., Дунаев С.В., Хурумова А.Ф. // Двигатель. 2012. Т. 83. № 5. С. 6.
2. Tsai C.-W., Wu K.-H., Yang C.-C., Wang G.-P. // Reactive Functional Polymers. 2015. V. 91–92. P. 11.
3. Tsai C.-W., Wang J.-C., Li F.-N., Chang Y.-C., Wu K.-H. // Mater. Express. 2016. V. 6. № 3. P. 220.
4. Tanaka K., Hiraoka T., Ishiguro F., Jeon J.-H., Chujo Y. // RSC Adv. 2014. V. 4. P. 28107.
5. Ouchi T., Nishimura Y. // Patent US № 8912366. 2014.

6. *Huang M.-Y., Lin J.-C., Lin K.-H., Wu J.-C.* // Patent US № 7488859. 2009.
7. *Kojima A., Saito M.* // Patent US № 7145048. 2006.
8. *Ishii Y., Nakano T., Hirai N.* // Patent US № 6392104. 1998.
9. *Chen C.S. H., Schramm S.E., Wentzek S.E.* // Patent US № 5397488. 1995.
10. *Honna K., Seiki H.* // Patent US № 4990691. 1991.
11. *Honna K., Seiki H.* // Patent US № 4963292. 1990.
12. *Bäckvall J.-E.* Modern Oxidation Methods. 2nd ed. Wiley, 2010. 483 p.
13. *Багрий Е.И., Маравин Г.Б.* // Нефтехимия. 2013. Т. 53. № 6. С. 467 [Petrol. Chemistry. 2013. V. 53. № 6. P. 418].
14. *Багрий Е.И., Нехаев А.И., Максимов А.Л.* // Нефтехимия. 2017. Т. 57. № 2. С. 123 [Petrol. Chem. 2017. V. 57. № 3. P. 183].
15. *Ивлева Е.А., Баймуратов М.Р., Журавлева Ю.А., Klimochkin Ю.Н., Куликова И.А., Поздняков В.В., Шейкина Н.А., Тыщенко В.А., Рудяк К.Б.* // Нефтехимия. 2015. Т. 55. № 2. С. 140 [Petrol. Chemistry. 2015. V. 55. № 2. P. 133].
16. *Ивлева Е.А., Баймуратов М.Р., Журавлева Ю.А., Малиновская Ю.А., Klimochkin Ю.Н., Куликова И.А., Поздняков В.В., Шейкина Н.А., Тыщенко В.А.* // Нефтехимия. 2016. Т. 56. № 6. С. 655 [Petrol. Chemistry. 2016. V. 56. № 9. P. 873].
17. *Ивлева Е.А., Баймуратов М.Р., Гаврилова В.С., Журавлева Ю.А., Klimochkin Ю.Н., Куликова И.А., Поздняков В.В., Шейкина Н.А., Тыщенко В.А., Рудяк К.Б.* // Нефтехимия. 2015. Т. 55. № 8. С. 528 [Petrol. Chemistry. 2015. V. 55. № 8. P. 673].
18. *Klarçtke T. M., Krumm B., Widera A.* // ChemPlus-Chem. 2018. V. 83. P. 61.
19. *Fu S.-Q., Guo J.-W., Zhu D.-Y., Yang Z., Yang C.-F., Xian J.-X., Li X.* // RSC Adv. 2015. V. 5. P. 67054.
20. *Sayed S.M., Lin B.-P., Yang H.* // Soft Matter. 2016. V. 12. P. 6148.
21. *Menger F.M., Migulin V.A.* // J. Org. Chem. 1999. V. 64. P. 8916.
22. *Pannier N., Maison W.* // Eur. J. Org. Chem. 2008. P. 1278.
23. *Alexandre P.-E., Schwenger A., Frey W., Richert C.* // Chem. Eur. J. 2017. V. 23. P. 9018.
24. *Schwenger A., Frey W., Richert C.* // Chem. Eur. J. 2015. V. 21. P. 1.
25. *Schwenger A., Frey W., Richert C.* // Angew. Chem. Int. Ed. 2016. V. 55. P. 1.
26. *Tominaga M., Masu H., Azumaya I.* // J. Org. Chem. 2009. V. 74. P. 8754.
27. *Zhu H., Guo J., Yang C., Liu S., Cui Y., Zhong X.* // Synth. Commun. 2013. V. 43. P. 1161.
28. *Yang H., Guo J., Tong R., Yang C., Chen J.-K.* // Polymers. 2018. V. 10. P. 443.
29. *Ивлева Е.А., Платонов И.А., Klimochkin Ю.Н.* // ЖОХ. 2015. Т. 85. № 8. С. 1271 [Rus. J. Gen. Chem. 2015. V. 85. № 8. P. 1830].