

УДК 547.421+662.75

АРИЛБУТИЛАЦЕТАЛИ – ОКТАНОПОВЫШАЮЩИЕ ОКСИГЕНАТНЫЕ ДОБАВКИ К МОТОРНЫМ ТОПЛИВАМ

© 2020 г. Л. А. Опарина^{1, *}, Н. А. Колыванов¹, А. А. Ганина², С. Г. Дьячкова²

¹Иркутский институт химии им. А.Е. Фаворского СО РАН, Иркутск, 664033 Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, 664074 Россия

*E-mail: oparina@iriokh.irk.ru

Поступила в редакцию 28.05.2019 г.

После доработки 21.08.2019 г.

Принята к публикации 16.09.2019 г.

Исследование посвящено поиску новых оксигенатных добавок, улучшающих качество моторных топлив. Впервые в качестве добавок использованы арилбутилацетали, полученные присоединением фенолов к бутилвиниловым эфирам. Реакция реализуется при комнатной температуре в присутствии каталитических (0.3–0.6 мол. %) количеств $\text{CF}_3\text{CO}_2\text{H}$ и приводит к образованию целевых продуктов с количественным выходом. Изучены антидетонационные свойства синтезированных соединений. Установлено, что синтезированные арилбутилацетали обладают достаточно высокими октановыми числами по исследовательскому методу (ОЧИ) (до 110 ед.) и могут являться перспективными добавками к автомобильному бензину для повышения детонационной устойчивости: добавки 3 мас. % арилбутилацетала повышают ОЧИ модельной топливной смеси *n*-гептан – изооктан на 1.0–1.2 ед., а базового топлива АИ-92-К5 – на 0.1–0.4 ед. Эффективность антидетонационной добавки зависит от строения алкоксильного радикала в молекуле арилбутилацетала: ОЧ смешения ацеталей с разветвленным изобутоксильным радикалом выше значений линейных бутоксипроизводных на 3.4–6.7 ед. Ацетали, содержащие метильный заместитель в феноксирадикале, имеют более высокие значения ОЧ.

Ключевые слова: арилбутилацетали, оксигенатные добавки, антидетонационные свойства, октановое число

DOI: 10.31857/S0028242120010104

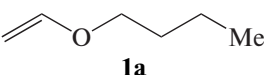
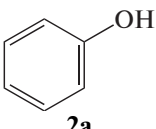
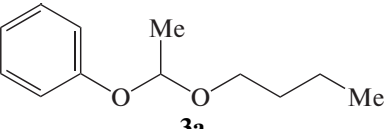
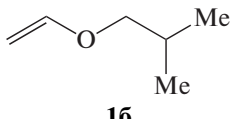
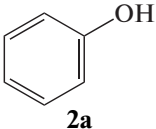
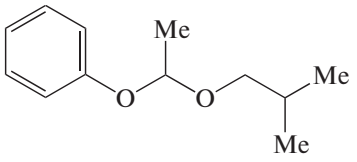
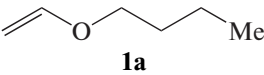
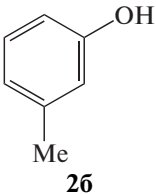
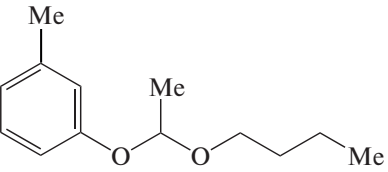
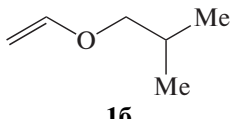
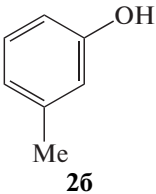
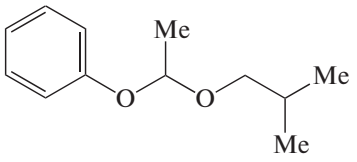
Основной мировой тенденцией улучшения экологических и эксплуатационных свойств автомобильных бензинов является использование многофункциональных добавок, главным образом, оксигенатов. Наличие кислорода в составе топлива позволяет снизить вредные выбросы по оксиду углерода на 30%, а по несгоревшим углеводородам – на 15% [1]. С целью повышения антидетонационных свойств в бензины добавляют компоненты, полученные с применением вторичных методов переработки нефтяных фракций (каталитический крекинг, изомеризация, алкилирование) или вводят в топливо специальные высокооктановые добавки.

Среди оксигенатов, используемых для повышения антидетонационных свойств топлив, наибольшее распространение получают спирты, простые и сложные эфиры, а также ацетали, в том числе циклические (1,3-диоксоцикланы) [2, 3]. Последние относят к категории малоопасных химических веществ, способных улучшать свойства топлив. Техническими результатами их использования в качестве оксигенатных добавок

является повышение фазовой стабильности автомобильных топлив при контакте с водой и детонационной стойкости [4–6]. При совместном использовании в топливных композициях спиртов и циклических кеталей отмечено снижение смолообразования [5, 6] и установлен синергетический эффект прироста ОЧ [7].

В последние годы особое внимание уделяется оксигенатным добавкам на основе возобновляемого сырья – целлюлозы, отходов лесной, деревообрабатывающей промышленности и сельского хозяйства, водорослей, лигнина. Использование таких оксигенатов расширяет ресурсы топлив и позволяет повысить их качество за счет снижения токсичности продуктов сгорания [2, 3]. При комплексной переработке растительного сырья получены органические продукты и жидкое топливо (“бионефть”) [8–11]. В частности, быстрый пиролиз растительной биомассы приводит к образованию смеси органических кислородсодержащих соединений (25–45% О), включающей углеводы, фенолы, спирты, сложные эфиры, фураны, альдегиды и т.д. [12]. Многие из этих ком-

Таблица 1. Синтез алкиларильных ацеталей

Виниловый эфир	Фенол	Алкиларилацеталь	Выход 3, %
 1a	 2a	 3a	98
 1b	 2a	 3b	99
 1a	 2b	 3в	99
 1b	 2b	 3г	97

понентов, в том числе и соединения фенольного ряда, также могут быть использованы как оксигенатные добавки как к бензину, так и дизельному топливу [13]. Например, добавка анизола (метилфенилового эфира) к бензину (5 мас. %) повышает октановое число топлива на 4 единицы [14].

Ранее нами было изучено применение в качестве оксигенатных добавок к моторным топливам синтетических бутиловых спиртов отечественного производства [15], а также установлена возможность использования арилвиниловых эфиров (модифицированных продуктов каталитической деструкции лигнина) в качестве добавок, повышающих детонационную стойкость бензинов [16]. Цель настоящей работы – поиск новых кислородсодержащих соединений, приемлемых в качестве антидетонационных добавок к моторному топливу. Для достижения поставленной цели синтезированы арилбутилацетали и проведена оценка их влияния на изменение ОЧ топлива.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Ниже представлены методы синтеза арилбутилацеталей различного строения. Формулы исходных веществ и конечных продуктов реакции приведены в табл. 1.

Синтез арилбутилацеталей 3а–г (общая методика). К фенолу **2** (0.25 моль) добавляли 0.10–0.18 г (0.3–0.6 мол. %) $\text{CF}_3\text{CO}_2\text{H}$ и к полученной смеси в течение 15–20 мин при интенсивном перемешивании по каплям прибавляли свежеперегнанный виниловый эфир **1** (0.25 моль). Реакция сопровождалась экзотермическим эффектом. Максимальную температуру 60–65°C регулировали скоростью добавления винилового эфира. По завершении реакции в ходе самопроизвольного снижения температуры до комнатной (~через 30 мин) кислотный катализатор нейтрализовали 0.1 г K_2CO_3 ; после удаления соли получали целевой арилбутилацеталь **3**.

1-(*n*-Бутокси-1-фенокс)этан (3а). Выход 47.55 г (98%), n_D^{24} 1.4805. ИК-спектр (ν , cm^{-1}): 3065, 3036,

2956, 2935, 2873, 1595, 1491, 1464, 1383, 1349, 1292, 1234, 1171, 1130, 1083, 1030, 971, 924, 813, 754, 694, 611, 510. Спектр ЯМР ^1H , δ , м. д.: 7.30 м (2H, Ph), 7.02 м (3H, Ph), 5.41 к (1H, $J = 5.3$ Гц, ОСНО), 3.75, 3.50 м (по 1H, ОСН₂), 1.58 м (2H, СН₂Et), 1.52 д (3H, $J = 5.3$ Гц, МеСН), 1.38 м (2H, СН₂Me), 0.92 т (3H, $J = 7.3$ Гц, Me). Спектр ЯМР ^{13}C , δ_{C} , м. д.: 13.7 (МеСН₂), 19.2 (СН₂Me), 20.1 (МеСН), 31.7 (СН₂Et), 65.5 (ОСН₂), 99.5 (ОСНО), 117.3 (С^{3,5}), 121.7 (С⁴), 129.3 (С^{2,6}), 157.0 (С¹). Найдено, %: С 74.02; Н 9.31. С₁₂Н₁₈О₂. Вычислено, %: С 74.19; Н 9.34.

1-(изо-Бутокси-1-фенокси)этан (3б). Выход 47.98 г (99%), n_{D}^{24} 1.4790. ИК-спектр (ν , см⁻¹): 3065, 3036, 2958, 2914, 2875, 1594, 1491, 1385, 1344, 1292, 1235, 1165, 1129, 1084, 1033, 1003, 922, 804, 754, 694, 610, 511. Спектр ЯМР ^1H , δ , м. д.: 7.30 м (2H, Ph), 7.03 м (3H, Ph), 5.40 к (1H, $J = 5.3$ Гц, ОСНО), 3.24 дд (2H, $J = 9.0$, 6.8 Гц, ОСН₂), 1.85 м (1H, СН), 1.51 д (3H, $J = 5.3$ Гц, МеСН), 0.89, 0.91 д (по 3H, $J = 7.0$ Гц, Ме₂СН). Спектр ЯМР ^{13}C , δ_{C} , м. д.: 19.3 (Ме₂СН), 20.0 (МеСН), 28.4 (СНМе₂), 72.3 (ОСН₂), 99.5 (ОСНО), 117.3 (С^{3,5}), 121.7 (С⁴), 129.3 (С^{2,6}), 157.0 (С¹). Найдено, %: С 74.08; Н 9.40. С₁₂Н₁₈О₂. Вычислено, %: С 74.19; Н 9.34.

1-(н-Бутокси)-1-(3-метилфенокси)этан (3в). Выход 51.50 г (99%), n_{D}^{24} 1.4819. ИК-спектр (ν , см⁻¹): 3035, 2986, 2955, 2933, 2872, 2735, 1595, 1488, 1456, 1382, 1348, 1283, 1258, 1160, 1126, 1085, 1029, 954, 912, 875, 854, 778, 743, 693, 618, 445. Спектр ЯМР ^1H , δ , м. д.: 7.17 м (1H, С₆Н₄), 6.82 м (3H, С₆Н₄), 5.38 к (1H, $J = 5.4$ Гц, ОСНО), 3.74, 3.49 м (по 1H, ОСН₂), 2.34 с (3H, МеС₆Н₄), 1.58 м (2H, СН₂Et), 1.50 д (3H, $J = 5.4$ Гц, МеСН), 1.38 м (2H, СН₂Me), 0.92 т (3H, $J = 7.0$ Гц, Me). Спектр ЯМР ^{13}C , δ_{C} , м. д.: 13.7 (Me), 19.2 (СНМе₂), 20.1 (МеСН), 21.3 (МеСН), 31.6 (СН₂Et), 65.3 (ОСН₂), 99.4 (ОСНО), 114.0 (С⁶), 118.0 (С²), 122.4 (С⁴), 129.0 (С⁵), 139.2 (С³), 157.0 (С¹). Найдено, %: С 75.00; Н 9.60. С₁₃Н₂₀О₂. Вычислено, %: С 74.96; Н 9.68.

1-(изо-Бутокси)-1-(3-метилфенокси)этан (3г). Выход 50.43 г (97%), n_{D}^{24} 1.4794. ИК-спектр (ν , см⁻¹): 3036, 2958, 2925, 2874, 2734, 1595, 1486, 1466, 1383, 1351, 1283, 1256, 1157, 1125, 1086, 1035, 1007, 953, 897, 777, 693, 617, 496, 444. Спектр ЯМР ^1H , δ , м. д.: 7.21 м (1H, С₆Н₄), 6.86 м (3H, С₆Н₄), 5.41 к (1H, $J = 5.3$ Гц, ОСНО), 3.27, 3.53 м (по 1H, ОСН₂), 2.36

с (3H, МеС₆Н₄), 1.89 м (1H, СНМе₂), 1.53 д (3H, $J = 5.3$ Гц, МеСН), 0.94, 0.95 д (6H, $J = 7.0$ Гц, Ме₂СН). Спектр ЯМР ^{13}C , δ_{C} , м. д.: 19.3 (Ме₂СН), 20.0 (МеСН), 21.3 (МеС₆Н₄), 28.4 (СНМе₂), 72.2 (ОСН₂), 99.4 (ОСНО), 114.1 (С⁶), 118.0 (С²), 122.4 (С⁴), 129.0 (С⁵), 139.2 (С³), 157.0 (С¹). Найдено, %: С 74.80; Н 9.73. С₁₃Н₂₀О₂. Вычислено, %: С 74.96; Н 9.68.

ОЧИ определяли на стандартной установке с одноцилиндровым двигателем по ГОСТ 8226-2015 "Топливо для двигателей. Исследовательский метод определения октанового числа". ОЧИ смешения рассчитывали по формуле:

$$\text{ОЧИ}_{\text{см}} = \frac{\text{ОЧИ}_{\text{база+добавка}} - \text{ОЧИ}_{\text{база}} \omega_{\text{база}}}{\omega_{\text{добавка}}},$$

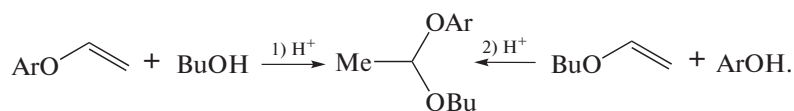
где $\text{ОЧИ}_{\text{см}}$ — октановое число смешения добавки; $\text{ОЧИ}_{\text{база+добавка}}$ — октановое число, определенное по исследовательскому методу базовой основы с добавлением добавки; $\text{ОЧИ}_{\text{база}}$ — октановое число базовой основы; $\omega_{\text{база}}$ — массовая доля базовой основы (0.97); $\omega_{\text{добавка}}$ — массовая доля добавки (0.03).

ИК-спектры синтезированных соединений сняты в тонком слое на спектрометре Bruker JFS-25 в области 400–4000 см⁻¹. Спектры ЯМР ^1H и ^{13}C записаны при комнатной температуре на приборе Bruker-DRX-400 с рабочей частотой 400.13 и 100.62 МГц, растворитель — CDCl₃. Химические сдвиги ЯМР ^1H и ^{13}C были зарегистрированы относительно CDCl₃ в качестве внутреннего стандарта (δ 7.27 и 77.0 м. д., соответственно). Элементный анализ выполняли на анализаторе Flash EA 1112 Series.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Среди известных методов получения ацеталей особого внимания заслуживает атом-экономная реакция электрофильного присоединения ОН-реагентов к виниловым эфирам [17]. Этот метод универсален. Варьируя заместители в виниловом эфире и протогенном реагенте, можно получать разнообразные и часто труднодоступные иными путями симметричные и несимметричные ацетали ацетальдегида.

Необходимые для исследования арилбутил-ацетали могут быть получены либо из бутиловых спиртов и арилвиниловых эфиров (реакция 1), либо из бутилвиниловых эфиров и фенолов (реакция 2).



Реакция 1 вследствие пониженной электронной плотности двойной связи арилвиниловых эфиров требует жестких условий. Эксперименты показали, что в присутствии катализатора 0.5 мол. % $\text{CF}_3\text{CO}_2\text{H}$ (60°C, 4 ч) *n*-BuOH не присоединяется к винил-*m*-крезиловому эфиру. В спектре ЯМР ^1H не было зафиксировано образование ацетала **3в** даже в следовых количествах. Более жесткие условия реакции (10 мол. % $\text{CF}_3\text{CO}_2\text{H}$, 60°C, 8 ч) приводят к побочным процессам, таким как диспропорционирование несимметричного ацетала **3в** и теломеризация арилвинилового эфира, что в итоге снижает выход целевого продукта. Вследствие этого, наработка образцов ацеталей **3** для исследования в качестве добавки к моторным топливам осуществлялась по реакции 2 – из бутилвиниловых эфиров **1а,б** и фенолов **2а,б**.

Наиболее универсальным методом получения алкилвиниловых (и в частности бутилвиниловых) эфиров является реакция присоединения спиртов к ацетилену в присутствии основных катализаторов, получившая научное и промышленное развитие в 30–70-е гг. прошлого века [18–20]. С открытием академиком Б.А. Трофимовым нового принципа повышения реакционной способности нуклеофильных реагентов за счет использования каталитических сред, состоящих из сильного основания и полярного негидроксильного комплексообразующего растворителя, удалось интенсифицировать классические реакции ацетилена, катализируемые основаниями, и проводить их при умеренных температурах и пониженных (вплоть до атмосферного) давлениях [21, 22].

Бутилвиниловые эфиры реагируют с фенолами значительно легче и селективнее. В стандартных условиях (комнатная температура, эквивалентное соотношение реагентов, 0.3–0.6 мол. % $\text{CF}_3\text{CO}_2\text{H}$) *n*-бутил- **1а** и изобутилвиниловый **1б** эфиры взаимодействуют с фенолом **2а** и *m*-крезолом **2б**, образуя соответствующие арилбутилацетали **3а–г** с количественным выходом (табл. 1).

Контроль за ходом реакции осуществляли методом ИК-спектроскопии по исчезновению полос поглощения ОН-группы фенолов **2** (в области 3400 cm^{-1}) и винилоксиогруппы эфиров **1** (3119, 1639, 1612, 1204 cm^{-1}) в реакционных смесях. Наличие только одного квартета протонов метиновой ($\delta \sim 5.4$ м. д.) и дублета метильной ($\delta \sim 1.5$ м. д.) групп ацетального фрагмента в спектрах ЯМР ^1H свидетельствует об отсутствии диспропорционирования аддуктов **3** в условиях синтеза.

Синтезированные арилбутилацетали **3а–г** – бесцветные подвижные жидкости с приятным запахом, хорошо растворяются в углеводородах и образуют с бензином гомогенные растворы. Плотность этих соединений (0.95–0.97 г/см^3) практически не зависит от строения алкильной и арильной части и близка к плотности арилвини-

ловых эфиров. Температура кипения составляет 250–270°C, что выше, чем для соответствующих арилвиниловых эфиров. Ожидается, что кислород 15.3–16.5% (в бутиловых спиртах 21.6%) будет способствовать уменьшению содержания оксидов и вредных веществ в выхлопных газах.

Оценка влияния синтезированных ацеталей **3а–г** на изменение ОЧ проводилась на модельной системе *n*-гептан–изооктан в соотношении 3 : 7 (ОЧ 70) и базовом топливе, в качестве которого был выбран бензин неэтилированный марки АИ-92-К5 производства АО “АНХК”. Данная марка топлива является наиболее распространенной в России [23].

Испытания на стандартной установке показали, что введение ацеталей **3а–г** (3.0 мас. %) в модельную топливную смесь обеспечивает прирост ОЧИ на 1.0–1.2 ед. (табл. 2).

Все ацетали обладают достаточно высокими ОЧИ смешения 103.3–110.0, близкими по значению ОЧИ этанола. Последний обладает хорошими эксплуатационными и экологическими показателями, однако его широкое применение ограничивается отсутствием фазовой стабильности и высокими акцизами на спиртосодержащую продукцию [23]. Широко применяемый в России при производстве высокооктановых бензинов метил-*трет*-бутиловый эфир имеет ОЧИ, равное 118, однако в настоящее время запрещен к использованию во многих странах из-за токсичности и экологической опасности [24].

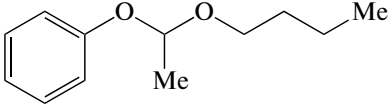
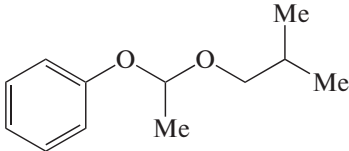
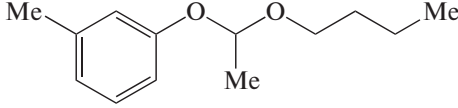
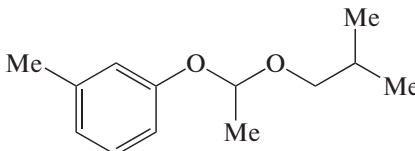
Антидетонационные свойства исследуемых добавок (по показателю повышения ОЧИ) убывают в ряду: **3г** > **3б** > **3а** = **3в**.

Как и для большинства антидетонаторов различных классов, эффективность добавок ацеталей **3а–г** к бензину с высоким ОЧИ (90.3) ниже, чем к низкооктановой базовой смеси: при добавке 3 мас. % прирост ОЧИ составил 0.1–0.3 ед. (табл. 3).

В процессе приготовления автобензинов компаундированием различных компонентов определяющая роль отводится октановым числам смешения, которые отличаются от взвешенной суммы октановых чисел отдельных компонентов [25]. ОЧИ смешения синтезированных ацеталей **3а–г** составляет 93.3–100.0 ед.

Наблюдаемые для модельной топливной смеси закономерности прироста ОЧИ в зависимости от строения вводимой добавки сохраняются и в бензине. Эффективность антидетонационной добавки зависит от алкоксильного радикала: ОЧ смешения ацеталей **3б,г** с разветвленным изобутоксильным радикалом выше значений линейных бутоксипроизводных **3а,в** на 3.4–6.7 ед. Как и ожидалось, ацетали, содержащие метильный заместитель в феноксирадикале, имеют более высокие значения ОЧ [26]. Для бутоксипроизводных

Таблица 2. ОЧИ смешения ацеталей **3** (3 мас. %) в модельной топливной смеси*

Добавка	ОЧИ, ед.	Прирост ОЧИ, ед.	ОЧИ смешения, ед.
Без добавки	70.0	—	70.0
 3а	71.0	1.0	103.3
 3б	71.1	1.1	106.7
 3в	71.0	1.0	103.3
 3г	71.2	1.2	110.0

* Представленные в табл. 2 значения ОЧ получены по результатам трех измерений.

детонационная стойкость практически не зависит от строения ароматического радикала.

Таким образом, исследованные оксигенаты – аддукты бутилвиниловых эфиров и фенолов – обладают достаточно высокими ОЧИ (до 110 ед.) и могут являться перспективными добавками к автомобильному бензину для повышения антидетонационной устойчивости и улучшения эксплуатационных характеристик.

Таблица 3. ОЧИ смешения ацеталей **3** (3 мас. %) в базовом бензине АИ-92-К5*

Добавка	ОЧИ, ед.	Прирост ОЧИ, ед.	ОЧИ смешения, ед.
Без добавки	90.3	—	—
3а	90.4	0.1	93.3
3б	90.5	0.2	96.7
3в	90.4	0.1	93.3
3г	90.6	0.3	100.0

* Представленные в табл. 3 значения ОЧ получены по результатам трех измерений.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена с использованием материально-технической базы Байкальского аналитического центра коллективного пользования СО РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Опарина Людмила Андреевна – к.х.н., с.н.с., ORCID – <http://orcid.org/0000-0003-1286-2866>

Колыванов Никита Александрович – к.х.н., с.н.с., ORCID – <http://orcid.org/0000-0002-2548-123X>

Ганина Анна Александровна – аспирант, ORCID – <http://orcid.org/0000-0001-9140-9431>

Дьячкова Светлана Георгиевна, д.х.н., профессор, ORCID – <http://orcid.org/0000-0002-6091-3077>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Брагинский О.Б.* // Российский химический журн. 2008. Т. 52. № 6. С. 137.

2. Максимов А.Л., Нехаев А.И., Рамазанов Д.Н. // Нефтехимия. 2015. Т. 55. № 1. С. 3.
3. Опарина Л.А., Колыванов Н.А., Гусарова Н.К., Сапрыгина В.Н. // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2018. Т. 8. № 1. С. 19.
4. Mota C.J.A., da Silv, C.X.A., Rosenbach N., Costa J., da Silva F. // Energy Fuels. 2010. V. 24. P. 2733.
5. Alptekin E., Canakci M. // Appl. Thermal Eng. 2017. V. 124. P. 504.
6. Samoilov V.O., Maximov A.L., Stolonogova T.I., Chernysheva E.A., Kapustin V.M., Karpunina A.O. // Fuel. 2019. V. 249. P. 486.
7. Варфоломеев С.Д., Никифоров Г.А., Вольева В.В., Макаров Г.Г., Трусов Л.И. // Патент РФ № 2365617 / Б.И. 2009. № 24.
8. Alonso D.M., Bond J.Q., Dumesic J.A. // Green Chemistry. 2010. V. 12. № 9. P. 1493.
9. Pandey M.P., Kim C.S. // Chemical Engineering & Technology. 2011. V. 34. № 1. P. 29.
10. Roberts V.M., Stein V., Reiner T., Lemonidou A., Li X., Lercher J.A. // Chemistry. 2011. V. 17. № 21. P. 5939.
11. Zakzeski J., Bruijninx P.C.A., Jongorius A.L., Weckhuysen B.M. // Chemical Review. 2010. V. 110. № 6. P. 3552.
12. Zacher A.H., Loarte M.V., Santosa D.M., Elliott D.C., Jones S.B. // Green Chemistry. 2014. V. 16. P. 491.
13. McCormick R.L., Ratcliff M.A., Christensen E.D., Fouts L., Luecke J., Chupka G.M., Yanowitz J., Tian M., Boot M.D. // Energy Fuels. 2015. V. 29. № 4. P. 2453.
14. Хамидуллин Р.Ф., Харлампиди Х.Э., Пучкова Т.Л., Мельник А.Ю., Бадрутдинова А.Р., Галиулина М.М. // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 21. С. 295.
15. Кузора И.Е., Дубровский Д.А., Марушенко И.Ю., Артемьева Ж.Н., Забродина С.В., Ганина А.А., Дьячкова С.Г. // Мир нефтепродуктов. 2016. № 10. С. 25.
16. Опарина Л.А., Высоцкая О.В., Колыванов Н.А., Сапрыгина В.Н., Носова Е.В., Трофимов Б.А. // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2016. Т. 6. № 3. С. 7.
17. Яновская Л.А., Юфит С.С., Кучеров В.Ф. Химия ацеталей. М.: Наука, 1975. 275 с.
18. Шостаковский М.Ф. Простые виниловые эфиры. М.: Изд. Академии наук СССР, 1952. 280 с.
19. Reppe W. // Liebigs Ann. Chem. 1956. Bd 601. S. 81.
20. Miller S.A. Acetylene, Its Properties, Manufacture and Uses. London: E. Benn, 1966. V. 2. P. 198.
21. Трофимов Б.А. // Ж. орг. химии. 1986. Т. 22. С. 1991.
22. Опарина Л.А., Шайхудинова С.И., Паршина Л.Н., Высоцкая О.В., Preiss Th., Henkelmann J., Трофимов Б.А. // Ж. орг. химии. 2005. Т. 41. С. 672.
23. Емельянов В.Е., Климова Т.А. // Нефтепереработка и нефтехимия. 2013. № 5. С. 7.
24. Weinberg M., Schulte-Korne E., Peters U., Nierlich F. Methyl-Tert-Butyl Ether. In: Ulmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Weinheim: Wiley-VCH, 2010. 12 p.
25. Иванчина Э.Д., Ивашкина Е.Н., Храпов Д.В., Короткова Н.В., Клейменов А.В., Головачев В.А. // Химия и технология топлив и масел. 2017. № 2. С. 24.
26. Boot M.D., Tian M., Hensen E.J.M., Sarathy M.N. // Progress Energy Combust. Sci. 2017. V. 60. P. 1.