

УДК 547.562+547.057

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ФЕНОЛОВ И ТИОФЕНОЛОВ С 2-МЕТИЛЕН-1,4-ДИОКСАСПИРО[4.5]ДЕКАНОМ И АНТИКОРРОЗИОННАЯ АКТИВНОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ СОЕДИНЕНИЙ

© 2024 г. Ю. Г. Борисова¹, * С. А. Соков¹, Г. З. Раскильдина¹, Р. М. Султанова¹,
С. С. Злотский¹, А. А. Голованов¹

¹ФГБОУ ВО „Уфимский государственный нефтяной технический университет“,
Уфа, 450064 Россия

*E-mail: yulianna_borisova@mail.ru

Поступила в редакцию 3 апреля 2024 г.

После доработки 29 августа 2024 г.

Принята к публикации 1 сентября 2024 г.

Катализируемое трифторуксусной кислотой в тетрагидрофуране присоединение фенола, *m*- и *n*-замещенных фенолов к 2-метилен-1,4-диоксаспиро[4.5]декану протекает хемо- и региоселективно по третичному атому углерода экзоциклической двойной связи. *o*-Замещенные изомеры фенолов и тиофенол в тех же самых условиях присоединяются к данному субстрату аналогично, но с меньшей скоростью и с меньшими выходами соответствующих аддуктов. При этом 4-нитрофенол практически не вступает в реакцию с 2-метилен-1,4-диоксаспиро[4.5]деканом. Методом конкурирующих реакций установлено, что гидроксильные группы фенольного типа обладают приблизительно в десять раз меньшей активностью, чем гидроксильные группы бензильного типа. Методом спектроскопии ЯМР ¹H показано, что салициловый спирт присоединяется к указанному субстрату с участием бензильной гидроксильной группы. На основании полученных результатов разработан атом-экономичный метод получения полифункциональных фенольных эфиров, содержащих спироциклический ацетальный фрагмент. Целевые продукты выделены с выходами 37–85%. Разработанный метод получения фенольных аддуктов характеризуется мягкостью условий (комнатная температура), простотой аппаратного оформления, а продукты реакций не требуют специальных методов очистки.

Ключевые слова: электрофильное присоединение, циклические ацетали, кислотный катализ, фенолы, реакционная способность

DOI: 10.31857/S0028242124030034, **EDN:** LHJRSA

В современном органическом синтезе широко используются замещенные 1,3-диоксациклоалканы [1–4], на основе которых описано получение экологически чистых растворителей [5], биологически-активных веществ [6], а также присадок к топливам и маслам [7, 8]. В работе А.Л. Максимова с соавт. показаны различные области применения ацеталей в нефтехимии [9]. Так, алкокси-1,3-диоксацикланы хорошо диспергируются в смазочных композициях, водно-органических средах и могут генерировать

соответствующие гидроксиарены или их аналоги [10], которые, как известно, обладают антиокислительным действием и тормозят кислотную коррозию металлов [11, 12]. Также циклические ацетали могут выступать в качестве активных компонентов противоизносных присадок в дизельном топливе и способны снижать скорректированный диаметр пятна износа [13].

В связи с этим в последние годы синтезу и исследованию полифункциональных циклических

и линейных ацеталей уделяется повышенное внимание [14–18].

Одним из методов их получения является реакция электрофильного присоединения спиртов и диолов к простым виниловым эфирам [19], протекающая в условиях кислотного катализа. Однако данная реакция практически не изучена для метиленовых производных 1,3-диоксоланов, хотя может послужить удобным атом-экономичным методом синтеза производных циклических ацеталей. В предыдущей работе [10] мы сообщили о присоединении спиртов различного строения к 2-метилен-1,3-диоксациклоалканам с получением соответствующих алкоксипроизводных. Продолжая изучение этой реакции мы поставили целью разработать хемо- и региоселективный метод присоединения фенолов и тиофенола к промышленно доступному 2-метилен-1,4-диоксаспиро [4.5]декану **1** (см. схему 1).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе были использованы коммерчески-доступные фенолы и трифторуксусная кислота (Sigma-Aldrich). Соединение **1** получено согласно методике [20]. Салигенин **2g** получили восстановлением салицилового альдегида NaBH_4 в 1%-ном водном растворе NaOH ; перед использованием соединение **2g** перекристаллизовано из бензола [21]. ТГФ перед использованием кипятили с обратным холодильником над KOH (6 ч) и перегоняли.

Спектры ЯМР ^1H и ^{13}C зарегистрированы на приборе Bruker Avance-III 500 (рабочие частоты 500.30 для протонов и 125.75 МГц для ядер ^{13}C) в CDCl_3 при 25°C. В качестве внутреннего эталона использовали остаточные сигналы растворителя (δ_{H} 7.66, δ_{C} 77.0 м.д. для спектров ^1H и ^{13}C соответственно). Анализ методом ГЖХ выполняли на хроматографе Кристаллюкс-4000М с пламенно-ионизационным детектором и капиллярной колонкой (длина 25 м, внутренний диаметр 0.33 мм, неподвижная фаза – полидиметилсилоксан, пленка толщиной 0.5 μm); температуры: инжектора 200°C, детектора 300°C, колонки 120°C (4 мин), затем подъем со скоростью 15°/мин до 195°C; газ-носитель – гелий. Анализ методом ТСХ выполняли на пластинах Sorbfil, элюентом служила смесь петролейный эфир – EtOAc (10 : 1). Количественный элементный микроанализ на углерод и водород выполнен ме-

тодом экспресс-гравиметрии; хлор и серу определяли методом Шенигера. Запись масс-спектров соединений осуществляли на аппаратно-программном комплексе Хроматэк-Кристалл 5000М (ЗАО СКБ „Хроматэк“, Россия) с базой NIST 2012 (National Institute of Standards and Technology, США). Условия анализа: порт ввода – 295°C, капиллярная кварцевая колонка длиной 30 м, термостат колонок – 80–290°C, длительность анализа – 20 мин, температура источника ионов – 260°C, температура переходной линии – 295°C, диапазон сканирования – 30–300 Да, давление – 37–43 мТорр, газ-носитель – гелий, скорость нагрева – 20 град/мин. Для получения масс-спектров соединений использовали метод ионизации электронным ударом.

Общая методика получения соединений 3 и 5. Раствор 0.05 моль соответствующего фенола **2** и 340–350 мг (~3 ммоль, 6 мол.%) $\text{CF}_3\text{CO}_2\text{H}$ в 25 мл сухого ТГФ охлаждали льдом и в течение 7–10 мин добавляли при перемешивании по каплям 7.71 г (0.05 моль) соединения **1**. Реакционную смесь выдерживали 2.5 ч при комнатной температуре, затем, в случае синтеза соединений **3**, добавляли при перемешивании 10 мл 10%-ного раствора NaOH и 30 мл Et_2O . Эфирный слой отделяли, а водный экстрагировали еще 30 мл Et_2O . Объединенные эфирные вытяжки промывали 20 мл 10%-ного раствора NaOH , а затем дважды водой и сушили над K_2CO_3 .

В случае синтеза соединения **5** после трехчасовой выдержки при комнатной температуре к реакционной смеси добавляли 1 мл Et_3N , 30 мл воды и извлекали продукт эфиром, как описано выше, опуская процедуру промывки щелочью. Эфир отгоняли из экстракта на роторном испарителе, а остаток перегоняли в вакууме.

2-Метил-2-феноксид-1,4-диоксаспиро[4.5]декан (3a). Бесцветная жидкость. Выход (80%). $T_{\text{кип}}$ 106–107°C (0.3 мм рт. ст.). Спектр ^1H ЯМР (CDCl_3 , δ , м. д.): 1.41–1.50 (м, 2H, CH_2CH_2), 1.57 (с, 3H, MeC), 1.61–1.71 (м, 6H, CH_2CH_2), 1.81–1.87 (м, 2H, CH_2CH_2), 3.96 (д, 1H, CH_aO , $J = 8.7$), 4.34 (д, 1H, CH_bO , $J = 8.7$), 7.06 (д, 1H, C_6H_4 , $J = 7.0$), 7.20–7.32 (м, 4H, C_6H_4). Спектр ^{13}C ЯМР (CDCl_3 , δ , м. д.): 21.9, 23.8, 23.9, 25.1, 35.9 (CH_2), 36.3 (CH_2), 75.9, 106.7, 112.6, 115.4, 120.9 (C_{Ph}), 122.6 (C_{Ph}), 129.1 (C_{Ph}). Масс-спектр ИЭ, m/z ($I_{\text{отн.}}$ %): 205 (11), 155 (100), 137 (36), 111 (15), 94 (16), 81 (38). Найдено, %: C 72.20; H 8.10. $\text{C}_{15}\text{H}_{20}\text{O}_3$. Вычислено, %: C 72.55; H 8.12.

2-Метил-2-(орто-толилокси)-1,4-диоксаспиро[4.5]декан (3b). Бесцветная жидкость. Выход (70%). $T_{\text{кип.}}$ 128–129°C (0.6 мм рт. ст.). Спектр ^1H ЯМР (CDCl_3 , δ , м. д.): 1.40–1.51 (м, 2H, CH_2CH_2), 1.55 (с, 3H, MeC), 1.59–1.78 (м, 6H, CH_2CH_2), 1.78–1.94 (м, 2H, CH_2CH_2), 2.22 (с, 3H), 3.99 (д, 1H, CH_aO , $J = 8.6$), 4.38 (д, 1H, CH_bO , $J = 8.6$), 6.97 (т, 1H, C_6H_4 , $J = 7.4$), 7.05–7.20 (м, 2H, C_6H_4), 7.49 (д, 1H, C_6H_4 , $J = 8.1$). Спектр ^{13}C ЯМР (CDCl_3 , δ , м. д.): 16.7 (Me), 21.9, 23.8, 23.9, 25.1, 36.0 (CH_2), 36.1 (CH_2), 36.2 (CH_2), 76.0, 106.8, 112.5, 119.9 (C_{Ph}), 122.40 (C_{Ph}), 126.4 (C_{Ph}), 129.9 (C_{Ph}), 130.7 (C_{Ph}). Масс-спектр ИЭ, m/z ($I_{\text{отн.}}$, %): 219 (6), 155 (100), 147 (8), 137 (35), 111 (30), 97 (18), 81 (45). Найдено, %: C 73.22; H 8.67. $\text{C}_{16}\text{H}_{22}\text{O}_3$. Вычислено, %: C 73.25; H 8.45.

2-Метил-2-(мета-толилокси)-1,4-диоксаспиро[4.5]декан (3c). Бесцветная жидкость. Выход (78%). $T_{\text{кип.}}$ 130–131°C (0.7 мм рт. ст.). Спектр ^1H ЯМР (CDCl_3 , δ , м. д.): 1.40–1.51 (м, 2H, CH_2CH_2), 1.58 (с, 3H, MeC), 1.62–1.73 (м, 6H, CH_2CH_2), 1.79–1.88 (м, 2H, CH_2CH_2), 2.36 (с, 3H), 3.96 (д, 1H, CH_aO , $J = 8.6$), 4.33 (д, 1H, CH_bO , $J = 8.6$), 6.88 (д, 1H, C_6H_4 , $J = 7.4$), 6.97–7.09 (м, 2H, C_6H_4), 7.17 (т, 1H, C_6H_4 , $J = 8.1$). Спектр ^{13}C ЯМР (CDCl_3 , δ , м. д.): 21.5 (Me), 21.9, 23.8 (CH_2), 23.9 (CH_2), 25.1 (CH_2), 35.9 (CH_2), 36.3, 75.9, 106.6, 112.6, 117.8, 121.6 (C_{Ph}), 123.4 (C_{Ph}), 128.8 (C_{Ph}), 139.0 (C_{Ph}). Масс-спектр ИЭ, m/z ($I_{\text{отн.}}$, %): 219 (8), 155 (100), 147 (8), 137 (28), 111 (20), 97 (15), 81 (38). Найдено, %: C 73.21; H 8.71. $\text{C}_{16}\text{H}_{22}\text{O}_3$. Вычислено, %: C 73.25; H 8.45.

2-(4-(трет-Бутил)фенокси)-2-метил-1,4-диоксаспиро[4.5]декан (3d). Бесцветная жидкость. Выход (85%). $T_{\text{кип.}}$ 143–144°C (0.6 мм рт. ст.). Спектр ^1H ЯМР (CDCl_3 , δ , м. д.): 1.35 (с, 9H, $\text{C}(\text{CH}_3)_3$), 1.42–1.51 (м, 2H, CH_2CH_2), 1.56 (с, 3H, MeC), 1.63–1.77 (м, 6H, CH_2CH_2), 1.84–1.90 (м, 2H, CH_2CH_2), 3.96 (д, 1H, CH_aO , $J = 8.6$), 4.34 (д, 1H, CH_bO , $J = 8.6$), 7.15 (д, 2H, C_6H_4 , $J = 8.7$), 7.31 (д, 2H, C_6H_4 , $J = 8.7$). Спектр ^{13}C ЯМР (CDCl_3 , δ , м. д.): 16.7 (Me), 21.9, 22.4, 23.8, 23.9, 25.1, 25.7, 34.2 (CH_2), 36.0 (CH_2), 36.3 (CH_2), 75.9, 106.6, 112.5, 120.5 (C_{Ph}), 125.8 (C_{Ph}), 145.3 (C_{Ph}). Масс-спектр ИЭ, m/z ($I_{\text{отн.}}$, %): 247 (3), 155 (100), 147 (10), 137 (25), 111 (21), 97 (10), 81 (25). Найдено, %: C 75.16; H 9.43. $\text{C}_{19}\text{H}_{28}\text{O}_3$. Вычислено, %: C 74.96; H 9.27.

2-(4-Хлорофенокси)-2-метил-1,4-диоксаспиро[4.5]декан (3e). Бесцветная жидкость. Выход (83%). $T_{\text{кип.}}$ 121–122°C (0.40 мм рт. ст.). Спектр ^1H ЯМР (CDCl_3 , δ , м. д.): 1.41–1.49 (м, 2H, CH_2CH_2),

1.55 (с, 3H, MeC), 1.61–1.71 (м, 6H, CH_2CH_2), 1.82–1.89 (м, 2H, CH_2CH_2), 3.95 (д, 1H, CH_aO , $J = 8.7$), 4.32 (д, 1H, CH_bO , $J = 8.7$), 7.07–7.13 (м, 4H, C_6H_4). Спектр ^{13}C ЯМР (CDCl_3 , δ , м. д.): 20.7, 21.9, 23.9, 23.9, 25.1, 35.9 (CH_2), 36.3 (CH_2), 75.8 (CH_2), 106.6, 112.5, 120.9 (C_{Ph}), 129.6 (C_{Ph}), 132.0 (C_{Ph}). Масс-спектр ИЭ, m/z ($I_{\text{отн.}}$, %): 239/241 (3/5), 155 (100), 147 (8), 137 (22), 111 (18), 97 (13), 81 (21). Найдено, %: C 63.63; H 6.91; Cl 12.22. $\text{C}_{15}\text{H}_{19}\text{ClO}_3$. Вычислено, %: C 63.71; H 6.77; Cl 12.54.

2-Метил-2-(фенилсульфанил)-1,4-диоксаспиро[4.5]декан (3f). Бесцветная жидкость. Выход (66%). $T_{\text{кип.}}$ 141–144°C (0.4 мм рт. ст.). Спектр ^1H ЯМР (CDCl_3 , δ , м. д.): 1.37–1.45 (м, 2H, CH_2CH_2), 1.49 (с, 3H, MeC), 1.61–1.75 (м, 6H, CH_2CH_2), 1.86–1.95 (м, 2H, CH_2CH_2), 3.97 (д, 1H, CH_aO , $J = 9.0$), 4.51 (д, 1H, CH_bO , $J = 9.0$), 7.19–7.27 (м, 1H, C_6H_5), 7.52–7.58 (м, 4H, C_6H_5). Спектр ^{13}C ЯМР (CDCl_3 , δ , м. д.): 23.8, 24.0, 25.1, 35.1, 35.6 (CH_2), 36.7 (CH_2), 37.4 (CH_2), 37.8, 68.4 (CH_2), 74.5, 110.8, 112.5, 129.0 (C_{Ph}), 129.8 (C_{Ph}), 131.7 (C_{Ph}). Масс-спектр ИЭ, m/z ($I_{\text{отн.}}$, %): 264 (78), 235 (32), 221 (96), 165 (15), 141 (87), 110 (148), 81 (36), 55 (100). Найдено, %: C 68.18; H 7.70; S 11.32. $\text{C}_{15}\text{H}_{20}\text{O}_2\text{S}$. Вычислено, %: C 68.14; H 7.62; S 12.13.

2-(((2-Метил-1,4-диоксаспиро[4.5]декан-2-ил)окси)метил)фенол (5). Бесцветная жидкость. Выход (37%). $T_{\text{кип.}}$ 142–143°C (0.6 мм рт. ст.). Спектр ^1H ЯМР (CDCl_3 , δ , м. д.): 1.37–1.45 (м, 2H, CH_2CH_2), 1.51 (с, 3H, MeC), 1.55–1.73 (м, 6H, CH_2CH_2), 1.76–1.85 (м, 2H, CH_2CH_2), 3.87 (д, 1H, CH_aO , $J = 8.8$), 4.21 (м, 1H, CH_bO), 4.51 (уш. с, 1H, OH), 4.77–4.81 (м, 2H, $\text{C}_6\text{H}_4\text{CH}_2$), 6.78–6.91 (м, 2H, C_6H_4), 7.01–7.13 (м, 2H, C_6H_4). Спектр ^{13}C ЯМР (CDCl_3 , δ , м. д.): 22.4, 23.6, 23.9, 25.0, 30.9, 35.0, 35.6 (CH_2), 36.1 (CH_2), 68.1 (CH_2), 74.4 (CH_2), 112.0, 115.4, 120.0 (C_{Ph}), 128.0 (C_{Ph}), 128.5 (C_{Ph}), 155.9 (C_{Ph}). Масс-спектр ИЭ, m/z ($I_{\text{отн.}}$, %): 188 (7), 160 (25), 144 (8), 91 (100), 69 (8). Найдено, %: C 69.26; H 7.78. $\text{C}_{15}\text{H}_{22}\text{O}_4$. Вычислено, %: C 69.04; H 7.97.

Методика определения относительной активности фенола и бензилового спирта. К охлажденному до 0°C раствору 5.41 г (0.05 моль) бензилового спирта **4**, 4.71 г (0.05 моль) фенола и 340 мг (2.98 ммоль, 6 мол. %) $\text{CF}_3\text{CO}_2\text{H}$ в 10 мл ТГФ при перемешивании добавляли 1.54 г (0.1 моль) соединения **1**. Через 1 ч к реакционной смеси добавляли 10 мл 10%-ного раствора NaOH и далее извлекали продукт так, как это описано выше.

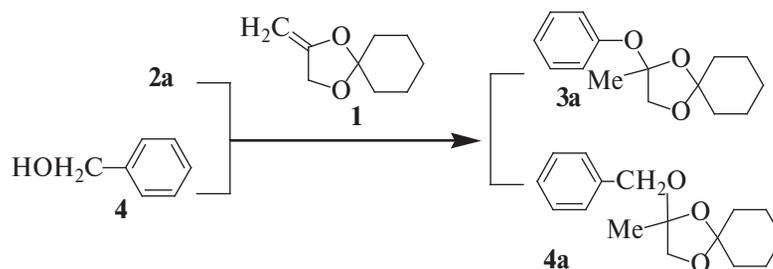


Схема 2

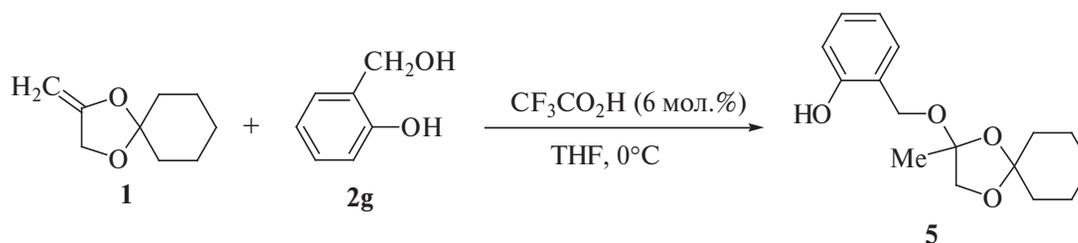


Схема 3

Ввиду наличия стерического эффекта в *o*-замещенном реагенте, как и в примерах с *o*-крезолом **2b** выход соединения **5** ожидаемо оказался низким (37%). В спектре ЯМР ¹H продукта сигнал протона гидроксильной группы находится при δ_H 4.51 м.д. — области, характерной для резонанса групп OH фенолов, что указывает на присоединение реагента по бензильному, а не фенольному гидроксилу.

Ранее было показано, что циклические ацетали и их аналоги проявляют антикоррозионные свойства в кислотных и сероводородсодержащих средах и могут быть эффективными ингибиторами коррозии низкоуглеродистых и низколегиро-

ванных сталей [1, 4, 12]. В продолжение работ в этой области нами была исследована антикоррозионная активность полученных веществ **3a–e** и **5** в сероводородсодержащей среде (табл. 1).

Наибольшую антикоррозионную активность проявило соединение **3c**, степень защиты которого составила 77% (коэффициент торможения 4.5). Производные фенола **3a**, *o*-крезола **3b**, *n*-трет-бутилфенола **3d**, *n*-хлорфенола **3e**, тиофенола **3f** и салицилового спирта **5** показали эффективность защиты в интервале от 13 до 60% (коэффициент торможения 1.2–2.5). Отметим, что антикоррозионная активность соединений зависит от способности веществ к хемосорбции

Таблица 1. Значения степени защиты и коэффициент торможения веществ **3a–e** и **5** в сероводородсодержащей среде

Номер соединения	Скорость коррозии, мм/год	Степень защиты, %	Коэффициент торможения
3a	0.84	17	1.2
3b	0.67	35	1.5
3c	0.23	77	4.5
3d	0.40	60	2.5
3e	0.77	25	1.3
3f	0.79	22	1.3
5	0.86	13	1.2

на поверхности металла. Так, наличие алкильных заместителей в молекулах **3a–e** способствует увеличению гидрофильности и растворимости в коррозионной среде, что, в свою очередь, согласно [22], повышает ингибирующий эффект органических соединений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика хемо- и стереоселективного присоединения фенолов и тиофенола к 2-метилен-1,4-диоксаспиро[4.5]декану с использованием в качестве катализа трифторуксусной кислоты в ТГФ при комнатной температуре. Показано, что активность фенолов существенно зависит от природы заместителей в ароматическом кольце и резко уменьшается в случае электронно-акцепторной *n*-нитрогруппы. Установлено, что фенольный гидроксил на порядок менее активен, чем бензильный. Определено, что 2-метил-2-(*m*-толилкси)-1,4-диоксаспиро[4.5]декан проявляет антикоррозионные свойства в сероводородной среде и проявляет степень защиты, равную 77%.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности, номер для публикаций FEUR – 2022-0007 „Нефтехимические реагенты, масла и материалы для теплоэнергетики“.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Борисова Юлианна Геннадьевна, к.х.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6452-9454>

Соков Сергей Александрович, к.х.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0639-0455>

Раскильдина Гульнара Зинуровна, д.х.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9770-5434>

Султанова Римма Марсельевна, д.х.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6719-2359>

Злотский Семен Соломонович, д.х.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6365-5010>

Голованов Александр Александрович, д.х.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7133-3070>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Raskil'dina G.Z., Sultanova R.M., Zlotskii S.S. gem-Dichlorocyclopropanes and 1,3-dioxacyclanes: synthesis based on petroleum products and use in low-tonnage chemistry // Rev. and Adv. in Chem. 2023. V. 13. P. 15–27. <https://doi.org/10.1134/s2634827623700150>*
2. *Küçük H.B., Yusufoglu A., Mataraci E., Döşler S. Synthesis and biological activity of new 1,3-dioxolanes as potential antibacterial and antifungal compounds // Molecules. 2011. V. 16. № 8. P. 6806–6815. <https://doi.org/10.3390/molecules16086806>*
3. *Mustafayev N., Novotorzhina N., Ramazanova Y., Musayeva B., Safarova M., Gakhramanova G., Ismayilov I., Sujayev A. Synthesis and study of novel derivatives of 1,3-dioxolane as anti-seizing additives to lubricating oils // Chem. Africa. 2022. V. 5. P. 821–826. <https://doi.org/10.1007/s42250-022-00399-0>*
4. *Латыпова Ф.Н., Вильданов Ф.Ш., Чанышев Р.Р., Злотский С.С. Химия циклических ацеталей и их аналогов в работах научной школы Д.Л. Рахманкулова // Изв. вузов. Хим. и хим. технология. 2015. Т. 58. Вып. 8. С. 3–21.*
5. *Moity L., Benazzouz A., Molinier V., Nardello-Rataj V., Elmekdem M.K., de Caro P., Thiébaud-Roux S., Gerbaud V., Marione P., Aubry J.-M. Glycerol acetals and ketals as bio-based solvents: positioning in hansen and COSMO-RS spaces, volatility and stability towards hydrolysis and autoxidation // Green. Chem. 2015. V. 17. № 3. P. 1779–1792. <https://doi.org/10.1039/C4GC02377C>*
6. *Кузьмина У.Ш., Раскильдина Г.З., Ишметова Д.В., Сахабутдинова Г.Н., Джумаев Ш.Ш., Борисова Ю.Г., Вахитова Ю.В., Злотский С.С. Цитотоксическая активность гетероциклических, содержащих gem-дихлорциклопропановый и/или 1,3-диоксациклоалкановый фрагменты, в отношении клеток линии CH-SY5Y // Хим.-фарм. журн. 2021. Т. 55. № 12. С. 27–32. [Kuz'mina U.Sh., Raskil'dina G.Z., Ishmetova D.V., Sakhabutdinova G.N., Dzhumayev Sh.Sh., Borisova Yu.G., Vakhitova Yu.V., Zlotskii S.S. Cytotoxic activity of heterocyclic compounds containing gem-dichlorocyclopropane and/or 1,3-dioxacycloalcanane fragments against CH-SY5Y neuroblastoma cells // Pharm. Chem. J. 2021. V. 55. № 2. P. 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11094-022-02574-6>]*
7. *Sudarsanam P., Malleshram B., Prasad A.N., Reddy P.S., Reddy B.M. Synthesis of bio-additive fuels from acetalization of glycerol with benzaldehyde over molybdenum promoted green solid acid catalysts // Fuel Process. Technol. 2013. V. 106. P. 539–545. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.09.025>*

8. Султанова Р.М., Борисова Ю.Г., Хуснутдинова Н.С., Раскильдина Г.З., Злотский С.С. 1,3-Диоксацикланы: синтез на основе продуктов нефтехимии, химические превращения и применение // Известия Академии наук. Серия химическая. 2023. Т. 72. № 10. С. 2297–2318. [Sultanova R.M., Borisova Yu.G., Khusnutdinova N.S., Raskil'dina G.Z., Zlotskii S.S. 1,3-Dioxacyclanes: synthesis based on petrochemicals, chemical transformations, and applications // Russian Chemical Bulletin. 2023. V. 72. № 10. P. 2297–2318. <https://doi.org/10.1007/s11172-023-4027-3>].
9. Maximov A.L., Nekhaev A.I., Ramazanov D.N. Ethers and acetals, promising petrochemicals from renewable sources // Petrol. Chemistry. 2015. V. 55. № 1. P. 1–21. <https://doi.org/10.1134/S0965544115010107>
10. Соков С.А., Борисова Ю.Г., Раскильдина Г.З., Злотский С.С., Голованов А.А. Присоединение спиртов к 4-метилен-1,3-диоксоланам // ЖОХ. 2023. Т. 93. № 10. С. 1557–1562. <https://doi.org/10.31857/S0044460X23100025> [Sokov S.S., Borisova Yu.G., Raskil'dina G.Z., Zlotskii S.S., Golovanov A.A. Addition of alcohols to 4-methylene-1,3-dioxolanes // Russ. J. Gen. Chem. 2023. V. 93. № 10. P. 2493–2497. <https://doi.org/10.1134/S107036322310002X>].
11. Опарина Л.А., Колыванов Н.А., Ганина А.А., Д'ячкова С.Г. Aryl butyl acetals as oxygenate octane-enhancing additives for motor fuels // Petrol. Chemistry. 2020. V. 60. № 1. P. 134–139. <https://doi.org/10.1134/S0965544120010107>
12. Mamlieva A.V., Mikhailova N.N., Shavshukova S.Yu. Corrosion inhibitors based on cyclic acetals and their derivatives // Oil & Gas Chemistry. 2020. № 1. P. 30–33. <https://doi.org/10.24411/2310-8266-2020-10103>
13. Джумаев Ш.Ш., Сахабутдинова Г.Н., Станкевич К.Е. Синтез некоторых гетероциклических соединений на основе спиртов и исследование их влияния на смазывающую способность дизельного топлива // Башкирский химический журнал. 2023. Т. 30. № 2. С. 85–88.
14. Li H., Wu C., Zhang Q., Li X., Gao X. Synthesis of 1,3-dioxolane from aqueous formaldehyde solution and ethylene glycol: kinetics and reactive distillation // Ind. Eng. Chem. Res. 2019. V. 58. № 17. P. 7025–7036. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b00331>
15. Злотский С.С., Раскильдина Г.З., Голованов А.А., Бормотин А.А., Бекин В.В. Синтез 1,3-диоксациклан-2-ил замещенных 1,2,3-триазолов // ДАН. 2017. Т. 472. № 1. С. 43–46. <https://doi.org/7868/S0869565217010121> [Zlotskii S.S., Raskil'dina G.Z., Golovanov A.A., Bormotin A.A., Bekin V.V. Synthesis of 1,3-dioxacyclan-2-yl-substituted 1,2,3-triazoles // Doklady Chem. 2017. V. 472. № 1. P. 3–6].
16. Лукичева С.А., Голованов А.А., Начкебия А.Я., Бекин В.В., Раскильдина Г.З., Злотский С.С. Синтез и некоторые превращения циклических ацеталей пропаргилового альдегида // ЖОХ. 2018. V. 88. № 2. С. 333–337 [Lukicheva S.A., Golovanov A.A., Nachkebia Y.A., Bekin V.V., Raskil'dina G.Z., Zlotskii S.S. Synthesis and some transformations of cyclic acetals of propargyl aldehyde // Russ. J. Gen. Chem. 2018. V. 88. № 2. P. 330–333. <https://doi.org/10.1134/S1070363218020226>].
17. Раскильдина Г.З., Ишметова Д.В., Соков С.А., Голованов А.А. Цитотоксическая и антиоксидантная активность ряда ацеталей 4-метилен-1,3-диоксоланов // Хим.-фарм. журн. 2024. Т. 58. № 4. С. 32–34 [Raskil'dina G.Z., Ishmetova D.V., Sokov S.S., Golovanov A.A. Cytotoxic and antioxidant activity of a number of acetals of 4-methylene-1,3-dioxolanes // Pharm. Chem. J. 2024. V. 58. № 4. P. 32–34. <https://doi.org/10.30906/0023-1134-2024-58-4-32-34>].
18. Karmakar G., Dey K., Ghosh P., Sharma B.K., Erhan S.Z. A short review on polymeric biomaterials as additives for lubricants // Polymers. 2021. V. 13. № 8. P. 1333. <https://doi.org/10.3390/polym13081333>
19. Опарина Л.А., Высоцкая О.В., Степанов А.В., Гусарова Н.К., Трофимов Б.А. Хемо- и региоселективная реакция винилфурфуроловых эфиров со спиртами // ЖОХ. 2012. Т. 48. № 9. С. 1166–1171. [Oparina L.A., Vysotskaya O.V., Stepanov A.V., Gusarova N.K., Trofimov B.A. Chemo- and regioselective reaction of vinyl furfuryl ethers with alcohols // Russ. J. Org. Chem. 2012. V. 48. № 9. P. 1162–1167. <https://doi.org/10.1134/S1070428012090023>].
20. Orth H. Zur Polymerisation ungesättigter dioxolane // Angew. Chem. 1952. V. 64. № 19–20. P. 544–553. <https://doi.org/10.1002/ange.19520641908>
21. Chaikin S.W., Brown W.G. Reduction of aldehydes, ketones and acid chlorides by sodium borohydride // J. Am. Chem. Soc. 1949. V. 71. № 1. P. 122–125. <https://doi.org/10.1021/ja01169a033>
22. Verma C., Ebenso E.E., Quraishi M.A., Hussain C.M. Recent developments in sustainable corrosion inhibitors: design, performance and industrial scale applications // Materials Advances. 2021. V. 2. № 12. P. 3806–3850. <https://doi.org/10.1039/d0ma00681e>