



## СИНТЕЗ ЗАМЕЩЁННЫХ 2,2'- И 4,4'-БИФЕНИЛДИОЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕАКЦИИ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО СОЧЕТАНИЯ

**В. В. Бухалин, В. Л. Баклагин, И. Г. Абрамов**

Владимир Владимирович Бухалин, студент; Вячеслав Леонидович Баклагин, аспирант;  
Игорь Геннадьевич Абрамов, д-р хим. наук, профессор  
Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия, [abramovig@ystu.ru](mailto:abramovig@ystu.ru)

---

### Ключевые слова:

2,4-, и 2,6-дизамещенные фенолы,  
феррицианид калия, гексагидрат  
хлорида железа (III), бисфенолы,  
замещённые 2,2'- и 4,4'-бифенилдиолы

**Аннотация.** На основе реакции окислительного сочетания разработаны методы синтеза не описанных в литературе замещённых 2,2'- и 4,4'-бифенилдиолов. Показаны возможности применения и ограничения метода при использовании феррицианида калия и гексагидрата хлорида железа (III).

---

### Для цитирования:

Бухалин В.В., Баклагин В.Л., Абрамов И.Г. Синтез замещённых 2,2'- и 4,4'-бифенилдиолов с использованием реакции окислительного сочетания // *От химии к технологии шаг за шагом*. 2023. Т. 4, вып. 4. С 52-59. URL: <http://chemintech.ru/index.php/tor/2023-4-4>

### Введение

Бисфенолы находят широкое применение в качестве мономеров для полиимидов, полиамидов, полиэфиров, поликарбонатов, эпоксидных смол и покрытий [1, 2], в связи с чем разработка методов синтеза новых бисфенолов является актуальной задачей.

Одним из экономически целесообразных способов получения бисфенолов является реакция окислительной димеризации, известная специалистам уже длительное время. В литературе описаны различные варианты синтеза бисфенолов с использованием гипохлорита натрия [3], ди-*трет*-бутилпероксида [4], пероксида водорода в присутствии пероксидазы [5], кислорода в присутствии тетрафенилпорфирина кобальта (II) или его производных [6], комплексов меди с аминами [7] и т.д. Известно также, что  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  являются эффективными, дешевыми и широко используемыми реагентами для окислительной димеризации фенолов [8-10]. Использование данных одноэлектронных окислителей часто позволяет достичь высоких выходов целевых продуктов и может быть пригодным для крупнотоннажного синтеза [11,12].

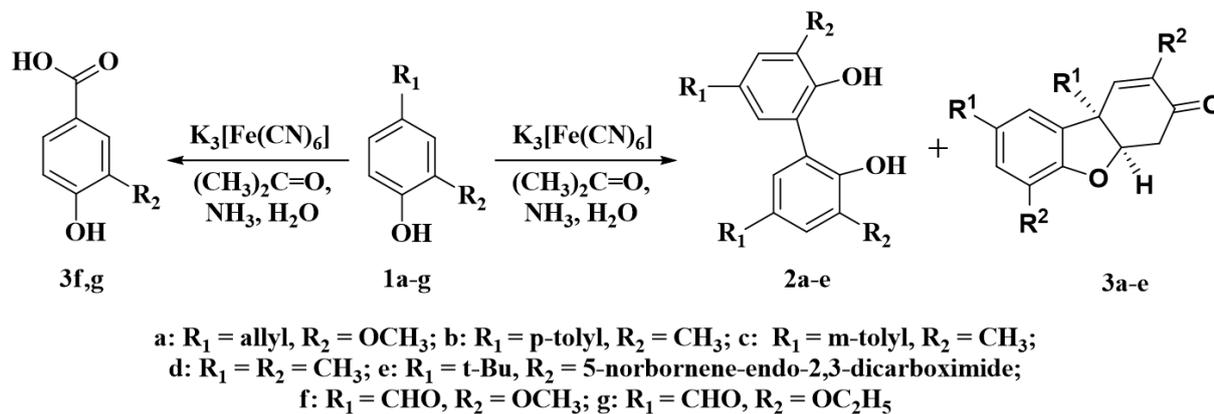
### Основная часть

С целью получения известных, но труднодоступных и новых, не описанных в литературе, бисфенолов нами предлагаются два варианта проведения реакции



окислительного сочетания фенолов с использованием феррицианида калия  $K_3[Fe(CN)_6]$  и гексагидрата хлорида железа (III)  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ .

В обоих вариантах в качестве субстратов были использованы фенолы **1a-g**, содержащие во 2 и 4 положениях бензольного кольца заместители, препятствующие протеканию реакции окислительного сочетания, и поэтому единственным доступным реакционным центром фактически являлся атом углерода в положении 6 бензольного кольца, что согласуется с результатами, опубликованными в работе [14]. Реакцию проводили при комнатной температуре по схеме, представленной на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема реакции окислительного сочетания 2,4-дизамещенных фенолов, протекавшая под действием феррицианида калия в щелочной среде

Ввиду малой растворимости в воде исходных фенолов и целевых продуктов реакцию проводили в смеси ацетон-вода в присутствии аммиака. Именно в этих условиях феррицианид калия ещё был растворим и проявлял максимальную активность, а добавление к реакционной смеси ацетона способствовало лучшей растворимости исходных субстратов и образующихся целевых соединений, а также протеканию указанной реакции в гомофазной среде без нагревания.

Поэтому, учитывая все вышеназванные ограничения, окислитель к реакционной смеси добавляли небольшими порциями, дожидаясь пока образовавшийся в ходе реакции ферроцианид  $K_4[Fe(CN)_6]$ , ввиду малой растворимости в водном ацетоне, не выпадет из реакционной массы.

За ходом реакции следили методом ТСХ. По окончании реакции выпавший осадок ферроцианида калия и побочных продуктов отфильтровывали, фильтрат подкисляли соляной кислотой до  $pH=1$ .

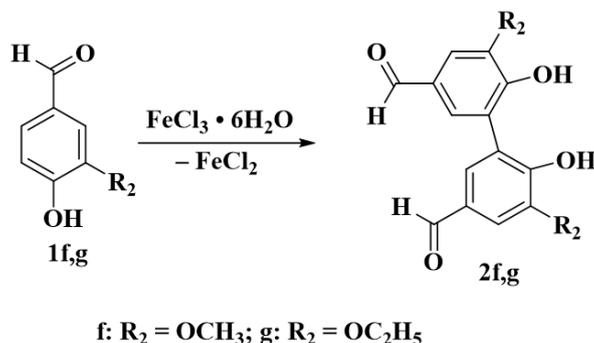
К сожалению, и в этом случае в результате протекания побочных реакций происходило образование воскообразной массы желтого цвета, полностью идентифицировать которую не удалось. По результатам наших исследований, согласующихся с литературными данными, эта воскообразная масса включает в себя побочные продукты окисления, преимущественно дигидродибензофураноны **3a-e**, а также незначительные количества исходных фенолов **1a-e** [15, 16].

Провести в указанных условиях окислительное сочетание ванилина **1f** и этилванилина **1g** с использованием феррицианида калия не удалось. Это объясняется тем, что феррицианид калия в щелочной среде способен окислять ароматические



альдегиды до соответствующих карбоновых кислот **3f-g**, что делает невозможным его использование для окислительного сочетания ванилина **1f** и этилванилина **1g**, содержащих формильную группу [13].

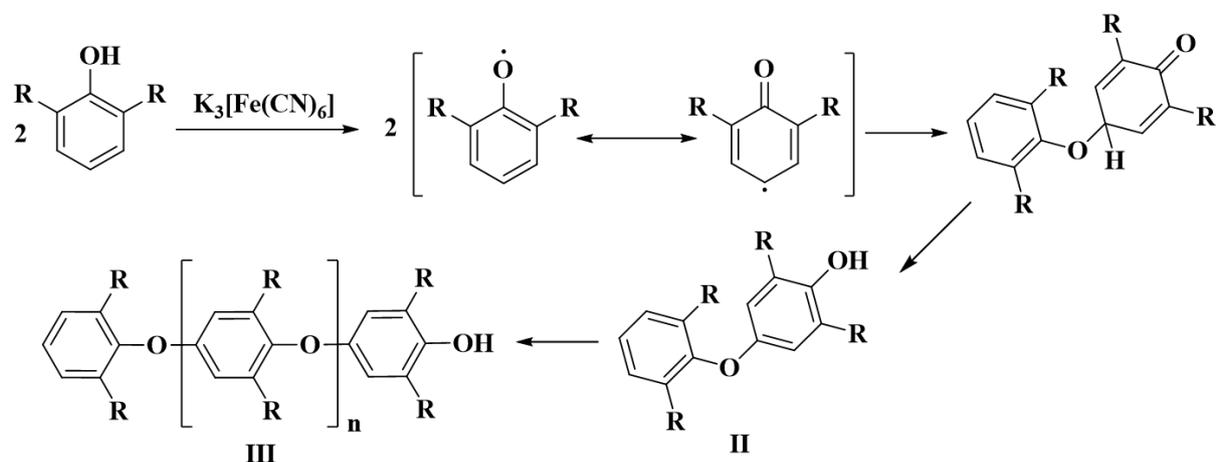
Окислительное сочетание ванилина **1f** и этилванилина **1g** до соответствующих бисфенолов **2f,g** удалось успешно осуществить при использовании в качестве окислителя гексагидрата хлорида железа (III)  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (рис. 2).



**Рис. 2.** Схема реакции окислительного сочетания 2,4-дизамещенных фенолов, протекавшая под действием хлорида железа (III) в водном растворе

Наилучшие результаты были достигнуты при нагревании исходных фенолов **1f,g** в водном растворе хлорида железа (III) при температуре 60–70 °С в течение нескольких часов. По окончании реакции выпавший из реакционной среды продукт отфильтровывали, промывали горячей водой для удаления непрореагировавшего фенола и затем растворяли в водном растворе щелочи. Выпавшие гидроксиды железа (II) и (III) отфильтровывали, а фильтрат подкисляли  $\text{HCl}$  до  $\text{pH}=1$ .

Провести окислительную димеризацию 2,6-дизамещенных фенолов **5a,b** в присутствии феррицианида калия нам также не удалось. По-видимому, в выбранных условиях происходило образование хиноловых эфиров **I**, которые далее быстро перегруппировывались в соответствующие 4-гидроксифенилоксины **II** и в ходе дальнейшего окисления получались соответствующие полифениленовые эфиры **III** [12] (рис. 3).



**Рис. 3.** Схема побочных реакций, протекавших при окислительном сочетании 2,6-дизамещенных фенолов в присутствии феррицианида калия



В связи с этим для синтеза бифенил-4,4'-диолов **5a,b** в качестве окислителя был использован гексагидрат хлорида железа (III)  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (рис. 4).

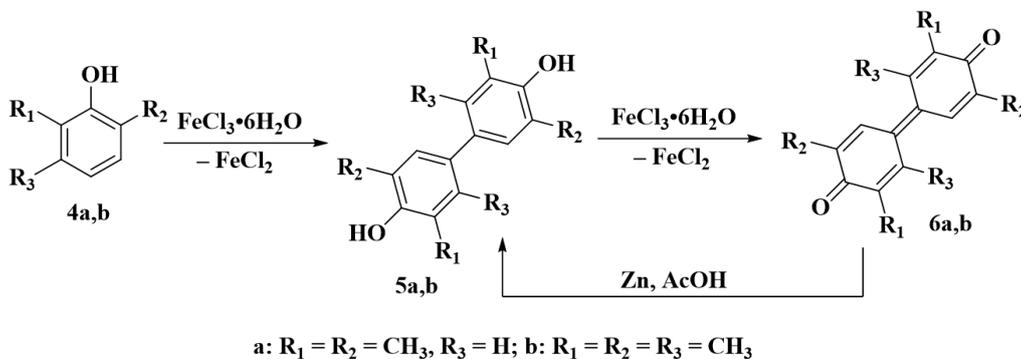


Рис. 4. Схема реакции окислительного сочетания 2,6-дизамещенных фенолов

Нами установлено, что проведение окислительного сочетания 2,6-дизамещенных фенолов **4a,b** в присутствии 3-кратного избытка хлорида железа (III) позволяет достичь значительно больших выходов побочных (в нашем случае промежуточных) дифенохинонов **6a,b**, чем при использовании 0,5 моль  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  на 1 моль фенола, как предложено в работе [14]. Это объясняется тем, что при избытке окислителя образовавшиеся в выбранных условиях бисфенолы **5a,b** окислялись дальше и переходили в термодинамически устойчивую хиноидную форму **6a,b**. Последующее восстановление карбонильной функции, протекавшее при обработке выделенных дифенохинонов **6a,b** цинком в уксусной кислоте с высоким выходом, приводило к получению целевых замещённых бифенил-4,4'-диолов **5a,b**.

Полученные замещённые 2,2'-бифенилдиолы перспективны для получения не описанных в литературе новых гетероциклических систем, а на основе замещённых 4,4'-бифенилдиолов возможно получение полиэфиримидов с новыми свойствами.

### Экспериментальная часть

ИК-спектры записывали на ИК-Фурье спектрометре «PerkinElmerRX-1» с длиной волны 700–4000  $\text{cm}^{-1}$  (KBr).

Спектры  $^1\text{H}$  ЯМР регистрировали на приборе «BrukerDRX-400» для растворов образцов в ДМСО- $d_6$  при 30 °С. В качестве эталона для отсчета химических сдвигов использовали сигналы остаточных протонов растворителя в протонных спектрах ( $\delta_{\text{H}} 2.50$ ).

Фенолы **1a-d,f,g** и окислители коммерчески доступные. Фенол **1e** был получен конденсацией эндикового ангидрида с коммерчески доступным 2-амино-4-*трет*-бутилфенолом по известной методике [17].

**Окислительная димеризация 2,4-замещенных фенолов в присутствии  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  (общая методика).** В колбу, снабженную мешалкой, загружали 0,012 моль фенола, 15 мл воды, 35 мл ацетона и 45 мл аммиака. После растворения при интенсивном перемешивании к реакционной смеси прибавляли эквимолярное количество феррицианида калия порциями в течение 40 минут. Реакцию проводили при комнатной



температуре в течение 15 часов. За ходом реакции следили методом ТСХ. По окончании реакции содержимое колбы (ферроцианид калия и нерастворимые в щелочных условиях осадки) отфильтровывали, фильтрат подкисляли до pH 1. Выпавший осадок отфильтровывали, промывали избытком воды и сушили на воздухе.

**3,3'-диметокси-5,5'-ди(проп-2-ен-1-ил)дифенил-2,2'-диол (2a):** Светло-бежевый порошок. Выход 50%,  $T_{пл} = 145-147$  °С. ИК ( $\nu_{max}$ , KBr): 3273 (ОН), 1637 (C=C), 1246 (ОСН<sub>3</sub>). Найдено, %: С, 73.63; Н, 6.83. C<sub>20</sub>H<sub>22</sub>O<sub>4</sub>. Рассчитано, %: С, 73.60; Н, 6.79. <sup>1</sup>Н ЯМР (400 МГц, ДМСО-d<sub>6</sub>)  $\delta$ , м.д.: 3.26 (д, J=6.59 Гц, 4 Н, С(5, 5')СН<sub>2</sub>), 3.67 (с, 6 Н, С(3, 3')ОСН<sub>3</sub>), 4.96-5.11 (м, 4 Н, С(5, 5')=СН<sub>2</sub>), 5.94 (ддт, J=16.98, 10.01, 6.78, 6.78 Гц, 2 Н, С(5, 5')=СН), 6.57 (с, 2Н, С(4, 4')Н), 6.61-6.63 (м, 2 Н, С(6, 6')Н).

**4,4'',5,5''-тетраметил-1,1':3',1''':3'',1''''-кватерфенил-4',6''-диол (2b):** Бежевый порошок с зеленоватым оттенком. Выход 74%. ИК ( $\nu_{max}$ , KBr): 3519 (ОН), 1177 (C<sub>Ar</sub>-ОН). Найдено, %: С, 86.04; Н, 6.83. C<sub>28</sub>H<sub>26</sub>O<sub>2</sub>. Рассчитано, %: С, 85.25; Н, 6.64. <sup>1</sup>Н ЯМР (400 МГц, ДМСО-d<sub>6</sub>)  $\delta$ , м.д.: 2.33 (с, 12 Н, С(4, 5', 4'', 5''')СН<sub>3</sub>), 7.37 (д, 4 Н, J=7.03 Гц, С(3', 5', 3'', 5''')Н), 7.49 – 7.62 (м, 8 Н, С(2, 6, 2', 6', 2'', 4'', 2''', 6''')Н), 8.02 (с, 2 Н, ОН).

**3,3''',5',5''-тетраметил-1,1':3',1''':3'',1''''-кватерфенил-4',6''-диол (2c):** Масло зеленого цвета. Выход 20%. ИК ( $\nu_{max}$ , KBr): 3515 (ОН), 1174 (C<sub>Ar</sub>-ОН). <sup>1</sup>Н ЯМР (400 МГц, ДМСО-d<sub>6</sub>)  $\delta$ , м.д.: 2.34 (с, 12 Н, С(3, 5', 3''', 5''')СН<sub>3</sub>), 7.15 (м, 2Н, С(4, 4''')Н), 7.31 (т, J = 7.65 Гц, 2 Н, С(5, 5''')Н), 7.54 (м, 2 Н, С(6, 6''')Н), 7.59 (с, 2 Н, С(2, 2''')Н), 7.68 (с, 2 Н, С(6', 4''')Н), 7.72 (с, 2 Н, С(2', 2''')Н).

**3,3',5,5'-тетраметилбифенил-2,2'-диол (2d):** Бежевый порошок. Выход 83%. ИК ( $\nu_{max}$ , KBr): 3280 (ОН), 1175 (C<sub>Ar</sub>-ОН). Найдено, %: С, 79.39; Н, 7.33. C<sub>16</sub>H<sub>18</sub>O<sub>2</sub>. Рассчитано, %: С, 79.31; Н, 7.49. <sup>1</sup>Н ЯМР (400 МГц, ДМСО-d<sub>6</sub>)  $\delta$ , м.д.: 2.19 (с, 6 Н, С(3, 3')СН<sub>3</sub>), 2.21 (с, 6 Н, С(5, 5')СН<sub>3</sub>), 6.79 (с, 2 Н, С(4, 4')Н), 6.90 (с, 2 Н, С(6, 6')Н), 8.13 (с, 2 Н, С(2, 2')ОН).

**2,2'-(5,5'-ди-трет-бутил-2,2'-дигидроксибифенил-3,3'-диил)бис(3а,4,7,7а-тетрагидро-1Н-4,7-метаноизоиндол-1,3-дион) (2e):** Светло-бежевый порошок. Выход 28%. ИК ( $\nu_{max}$ , KBr): 3472 (ОН), 1709 (C=O имид), 1181 (C<sub>Ar</sub>-ОН). Найдено, %: С, 74,23; Н, 5,53; N, 4,65. C<sub>38</sub>H<sub>40</sub>N<sub>2</sub>O<sub>6</sub>. Рассчитано, %: С, 73,53; Н, 6,50; N, 4,51. ЯМР <sup>1</sup>Н (400 МГц, ДМСО-d<sub>6</sub>)  $\delta$ , м.д.: 1.38 (уш. с., 18 Н, С(5,5')*t*-Bu), 1.60 (м., 4 Н, С(4\*, 7\*)СН<sub>2</sub>), 3,42 (м, 8 Н, С(3\*а, 4\*)Н), 6,20-6,30 (м, 4 Н, С(5\*, 6\*)Н), 6,95 (уш. с., 2 Н, С(1, 1')Н), 7,73 (уш. с., 2 Н, С(6, 6')Н), 8,24 (уш. с., 2 Н, С(6,9)Н).

**Окислительная димеризация 2,4-замещенных фенолов в присутствии гексагидрата хлорида железа (III) FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O (общая методика).** В колбу, снабженную мешалкой и обратным холодильником, загружали 0,024 моль фенола и 40 мл воды, нагревали реакционную массу до 60–70 °С и выдерживали её 15–20 минут до полного растворения фенола. После растворения при интенсивном перемешивании к реакционной смеси прибавляли 0,028 моль FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O в твердом виде или в виде водного раствора. Реакционную массу интенсивно перемешивали при температуре 90-100 °С в течение 2–4,5 часов в зависимости от природы исходного фенола. За ходом реакции следили методом ТСХ. По окончании реакции содержимое колбы охлаждали до комнатной температуры, осадок отфильтровывали. Полученный осадок промывали



избытком горячей воды с целью растворения непрореагировавшего фенола, после чего продукт растворяли в концентрированном растворе NaOH, отфильтровывали от гидроксидов железа, фильтрат аккуратно подкисляли концентрированной соляной кислотой. Выпавший осадок отфильтровывали и промывали избытком воды (3×50 см<sup>3</sup>). Выделенные целевые продукты **2f,g** сушили на воздухе.

**6,6'-дигидрокси-5,5'-диэтоксифенил-3,3'-дикарбальдегид (2f):** Коричневый порошок. Выход 52%.  $T_{пл} = >300$  °С. ИК ( $\nu_{max}$ , KBr): 3349 (ОН), 1680 (C=O), 1276, 1250, 1152 (C<sub>Ar</sub>-OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>). Найдено, %: С, 66.03; Н, 5.83. C<sub>18</sub>H<sub>18</sub>O<sub>6</sub>. Рассчитано, %: С, 65.45; Н, 5.49. ЯМР <sup>1</sup>H (400 МГц, ДМСО-d<sub>6</sub>, J/Гц)  $\delta$ , м.д.: 1.39 (т, J = 7.10 Гц, 6 Н, C(5, 5')CH<sub>3</sub>), 4.10-4.33 (м, 4 Н, C(5, 5')CH<sub>2</sub>), 7.79 (с, 2 Н, C(4, 4')H), 7.85 (с, 2 Н, C(2, 2')H), 10.00 (с, 2 Н, C(3, 3')CHO).

**6,6'-дигидрокси-5,5'-диметоксифенил-3,3'-дикарбальдегид(2g):** Коричневый порошок. Выход 54%.  $T_{пл} = >300$  °С. ИК ( $\nu_{max}$ , KBr): 3236 (ОН), 1670 (C=O), 1256, 1145 (C<sub>Ar</sub>-OCH<sub>3</sub>). Найдено, %: С, 63.89; Н, 4.83. C<sub>16</sub>H<sub>14</sub>O<sub>6</sub>. Рассчитано, %: С, 63.57; Н, 4.67. <sup>1</sup>H ЯМР (400 МГц, ДМСО-d<sub>6</sub>)  $\delta$ , м.д.: 3.88 (с, 6 Н, C(5, 5')OCH<sub>3</sub>), 7.61 (с, 2 Н, C(4, 4')H), 7.79 (с, 2 Н, C(4, 4')H), 7.91 (с, 2 Н, C(2, 2')H), 10.02 (с, 2 Н, C(3, 3')CHO).

**Окислительная димеризация 2,6-дизамещенных фенолов в присутствии гексагидрата хлорида железа (III) FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O (общая методика).** В колбу, снабженную мешалкой и обратным холодильником, загружали 0,024 моль тонко измельченного фенола, 40 мл воды и нагревали содержимое колбы до 40–80 °С в зависимости от природы фенола. Через 10–15 мин после частичного растворения фенола, при перемешивании к реакционной смеси приливали 0,065 моль FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O ( $\omega = 16\%$ ) и продолжали перемешивание при температуре 40–80 °С в течение 2,5 часов. За ходом реакции следили методом ТСХ. По окончании реакции содержимое колбы охлаждали до комнатной температуры, осадок отфильтровывали. Дифенохиноны **6a,b**, выделенные с выходами 77–84 %, сушили на воздухе.

Для получения целевых продуктов **5a,b** к суспендированным в горячей уксусной кислоте дифенохинонам добавляли трехкратный избыток цинковой пыли. Через час реакционную массу отфильтровывали от цинковой пыли, фильтрат выливали в 50 см<sup>3</sup> воды и оставляли кристаллизоваться. Выпавший осадок отфильтровывали и промывали водой (2×50 см<sup>3</sup>). Целевые продукты, полученные с выходами 26–39 % от теории, сушили на воздухе.

**3,3',5,5'-тетраметил-[1,1'-бифенил]-4,4'-диола (5a):** Выход: 39%. ИК ( $\nu_{max}$ ) см<sup>-1</sup>: 3368 (ОН), 1192 (Ar-ОН). Найдено, %: С, 80.10; Н, 8.33. C<sub>16</sub>H<sub>18</sub>O<sub>2</sub>. Рассчитано, %: С, 79.31; Н, 7.49. <sup>1</sup>H ЯМР (400 МГц, ДМСО-d<sub>6</sub>)  $\delta$ , м.д.: 2.18 (с., 12 Н, C(3, 5, 3', 5')CH<sub>3</sub>), 7.39 (с, 4 Н, C(2, 6, 2', 6')H).

**2,2',3,3',5,5'-гексаметил-[1,1'-бифенил]-4,4'-диола (5b):** Выход 26%. ИК ( $\nu_{max}$ ) см<sup>-1</sup>: 3516 (ОН). Найдено, %: С, 78.90; Н, 9.44. C<sub>18</sub>H<sub>22</sub>O<sub>2</sub>. Рассчитано, %: С, 79.96; Н, 8.20. <sup>1</sup>H ЯМР (400 МГц, ДМСО-d<sub>6</sub>)  $\delta$ , м.д.: 1.94 (с, 6 Н, C(2, 2')CH<sub>3</sub>), 2.02-2.10 (м, 12 Н, C(3, 5, 3', 5')CH<sub>3</sub>), 7.12 (с, 2 Н, C(6, 6')H).



**3,3',5,5'-тетраметил-1,1'-би(циклогекса-2,5-диен-1-илиден)-4,4'-дион (6a):** Выход 84%. ИК ( $\nu_{\max}$ )  $\text{cm}^{-1}$ : 1636 (C=O). Найдено, %: C, 78.98; H, 6.84.  $\text{C}_{16}\text{H}_{16}\text{O}_2$ . Рассчитано, %: C, 79.97; H, 6.71.  $^1\text{H}$  ЯМР (400 МГц, ДМСО- $d_6$ )  $\delta$ , м.д.: 1.90 (с, 12 H, C(3, 5, 3', 5') $\text{CH}_3$ ), 6.88 (с, 4 H, C(2, 2', 6, 6')H).

**2,2',3,3',5,5'-гексаметил-1,1'-би(циклогекса-2,5-диен-1-илиден)-4,4'-дион (6b):** Выход 77%. ИК ( $\nu_{\max}$ )  $\text{cm}^{-1}$ : 1633 (C=O). Найдено, %: C, 78.91; H, 6.98.  $\text{C}_{18}\text{H}_{20}\text{O}_2$ . Рассчитано, %: C, 80.56; H, 7.51.  $^1\text{H}$  ЯМР (400 МГц, ДМСО- $d_6$ )  $\delta$ , м.д.: 1.91 (с, 6 H, C(2,2') $\text{CH}_3$ ), 2.05-2.10 (м, 12 H, C(3, 5, 3', 5') $\text{CH}_3$ ), 6.78 (с, 2 H, C(6, 6')H).

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Noszczyńska M., Piotrowska-Seget Z.** Bisphenols: Application, occurrence, safety, and biodegradation mediated by bacterial communities in wastewater treatment plants and rivers // *Chemosphere*. 2018. Vol. 201. P. 214-223. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.02.179.
2. **Abramov I.G., Baklagin V.L., Bukhalin V.V., Maizlish V.E., Rassolova A.E.** Synthesis of substituted aryloxyphthalonitriles based on 4-chlorophthalonitrile and 4,5-dichlorophthalonitrile // *From Chemistry Towards Technology Step-By-Step*. 2022. Vol. 3, no. 4. P. 102-109. DOI: 10.52957/27821900\_2022\_04\_102. URL: <https://drive.google.com/file/d/15v8JMagCejF2eTqBXwPcRsW2GgtHGn4d/view>
3. **Neelamegam R., Palatnik M.T., Fraser-Rini J., Slifstein M., Abi-Dargham A., Easwaramoorthy B.** Dimerization of phenols and naphthols using an aqueous sodium hypochlorite // *Tetrahedron Lett.* 2010. Vol. 51, no 18. P. 2497-2499. DOI: 10.1016/j.tetlet.2010.02.173.
4. **Armstrong D.R., Cameron C., Nonhebel D.C., Perkins P.G.** Oxidative coupling of phenols. Part 10. The role of steric effects in the formation of C-O coupled products // *J. Chem. Soc., Perkin Trans. 2*. 1983. Iss. 5. P. 587-589. DOI: 10.1039/P29830000587.
5. **Yusnidar Y., Budi A., Cahyana H.** Syntheses via phenolic oxidative coupling using crude peroxidase from *Brassica juncea* (L) Czern leaves and antioxidant evaluation of dimeric thymol // *Mediterr. J. Chem.* 2015. Vol. 3, no. 6. P. 1100-1110. DOI: 10.13171/mjc.3.6.2015.01.06.12.36.yusuf.
6. **Jiang Q., Sheng W., Tian M., Tang J., Guo C.** Cobalt(II)-Porphyrin-Catalyzed Aerobic Oxidation: Oxidative Coupling of Phenols // *Eur. J. Org. Chem.* 2013. Vol. 2013. P.1861-1866. DOI: 10.1002/ejoc.201201595.
7. **Dekhici M., Villemin D., Bar N., Cheikh N.** Aerobic and Biomimetic Activation of C-H Bonds of Phenols Catalysed by Copper-Amine Complexes // *The 25th International Electronic Conference on Synthetic Organic Chemistry*. 2021. DOI: 10.3390/ecsoc-25-11710.
8. **Haemin G., Daewoo L., Kwon-Young Ch., Han-Na K., Hoon R., Dai-Soo L., Byung-Gee K.** Development of High Performance Polyurethane Elastomers Using Vanillin-Based Green Polyol Chain Extender Originating from Lignocellulosic Biomass // *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2017. Vol. 5, no. 6. P. 4582-4588. DOI: 10.1021/acssuschemeng.6b02960.
9. **Grzybowski M., Skonieczny K., Butenschön H., Gryko D.T.** Comparison of Oxidative Aromatic Coupling and the Scholl Reaction // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2013. Vol. 52. P. 9900-9930. DOI: 10.1002/anie.201210238.
10. **De Farias Dias A.** An improved high yield synthesis of dehydrodieugenol // *Phytochem.* 1988. Vol. 27, no. 9. P. 3008-3009. DOI: 10.1016/0031-9422(88)80715-5.
11. **Anita Y., Sundowo A., Dewi P.N.L., Filaila E., Mulyani H., Risdian Ch., Banjarnahor S., Hanafi M., Istyastono E.P.** Biotransformation of Eugenol to Dehydroeugenol Catalyzed by *Brassica juncea* Peroxidase and its Cytotoxicity Activities // *Procedia Chem.* 2015. Vol. 16. P. 265-271. DOI: 10.1016/j.proche.2015.12.049.
12. **Mihailović M.L., Čeković Ž.** Oxidation and reduction of phenols // *The Chemistry of The Hydroxyl Group*. 1971. Part 1, Chap.10. P. 505-592. DOI: 10.1002/9780470771259.ch10.
13. **Kalyani G.A., Jamunarani R., Pushparaj M.F.** Kinetics and Mechanistic Study of Oxidation of Ethyl Vanillin by Alkaline Hexacyanoferrate(III) // *Asian J. Chem.* 2015. Vol. 27, no. 7. P. 2583-2586. DOI: 10.14233/ajchem.2015.18366.



14. **Schmalzl K.J., Forsyth C.M., Evans P.D.** Evidence for the formation of chromium (III) diphenquinone complexes during oxidation of guaiacol and 2,6-dimethoxyphenol with chromic acid // *Polym. Degrad. Stab.* 2003. Vol. 82, no. 3. P. 399-407. DOI: 10.1016/S0141-3910(03)00192-7.
15. **Haynes C.G.; Turner A.H.; Waters W.A.** The oxidation of monohydric phenols by alkaline ferricyanide // *J. Chem. Soc.* 1956. P. 2823-2831. DOI: 10.1039/JR9560002823.
16. **Sarkar S., Ghosh M.K., Kalek M.** Synthesis of Pummerer's ketone and its analogs by iodosobenzene-promoted oxidative phenolic coupling // *Tetrahedron Lett.* 2020. Vol. 61, no. 43. 152459. DOI: 10.1016/j.tetlet.2020.152459.
17. **Kan Zh., Xinye Y., Yuting W., Yuqi L.** Thermally activated structural changes of a norbornene-benzoxazine-phthalonitrile thermosetting system: simple synthesis, self-catalyzed polymerization and outstanding flame retardancy // *ACS Appl. Polym. Mater.* 2019. Vol. 1, no. 10. P. 2713–2722. DOI: 10.1021/acsapm.9b00668.

Поступила в редакцию 13.10.2023

Одобрена после рецензирования 20.10.2023

Принята к опубликованию 31.10.2023