

К 90-ЛЕТИЮ ХИМИЧЕСКОГО  
ФАКУЛЬТЕТА МГУ

УДК 66.092-977 + 544.421.42 + 544.421.081.7 + 544.032.4

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ 4-трет-БУТИЛДИФЕНИЛОКСИДА

© 2019 г. В. А. Шакун<sup>a,\*</sup>, Т. Н. Нестерова<sup>a</sup>, С. В. Таразанов<sup>b</sup>, С. А. Спиридонов<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

<sup>b</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт по переработке нефти, Москва, 111116, Россия

\* e-mail: ShakyH@mail.ru

Поступила в редакцию 11.02.2019 г.

После доработки 11.02.2019 г.

Принята к публикации 14.05.2019 г.

В диапазоне температур 703–763 К изучена термическая стабильность 4-трет-бутилдифенилоксида (4-ТБДФО), произведена идентификация компонентов реакционной массы термолитиза, предложена кинетическая модель процесса, рассчитаны константы скорости и параметры уравнения Аррениуса для всех рассматриваемых реакций. Установлена преобладающая роль изомеризационных превращений 4-ТБДФО. Предложен механизм радикальной изомеризации трет-бутильного заместителя.

**Ключевые слова:** 4-трет-бутилдифенилоксид, термическая стабильность, термическая деструкция, изомеризация, кинетика

**DOI:** 10.1134/S0044453719110256

Дифенилоксид (ДФО) и его алкилпроизводные представляют научный интерес и имеют большое практическое значение в развитии современной промышленности.

Общеизвестно, что ДФО в смеси с бифенилом используется в качестве высокотемпературного теплоносителя [1, 2]. На основе производных ДФО создаются полимеры, обладающие уникальными механическими и оптическими свойствами [3], некоторые из алкилДФО, в том числе содержащие C<sub>4</sub>-заместитель, проявляют свойства жидких кристаллов [4].

Однако, информация о термической стабильности дифенилоксида и его производных ограничена. Наиболее обширные исследования [5, 6] посвящены определению начальных температур и минимальных энергий декомпозиции алкилароматических эфиров с целью определения перспективных гидравлических жидкостей и лубрикантов.

В последнее время возрос интерес к исследованию термической стабильности алкилбензолов в области производства перспективных топлив. Большое внимание уделяется, в том числе, бутилбензолам [7–10], как модельным структурам. Эти работы объединяет то, что в реакторах различного типа (золотые, стальные, стеклянные) в диапазоне температур 500–800 К распад н-бутилбензола (НББ) и трет-бутилбензола (ТББ) по радикальному механизму сопровождался образованием втор-

бутилбензола (ВББ) и изобутилбензола (ИББ), соответственно.

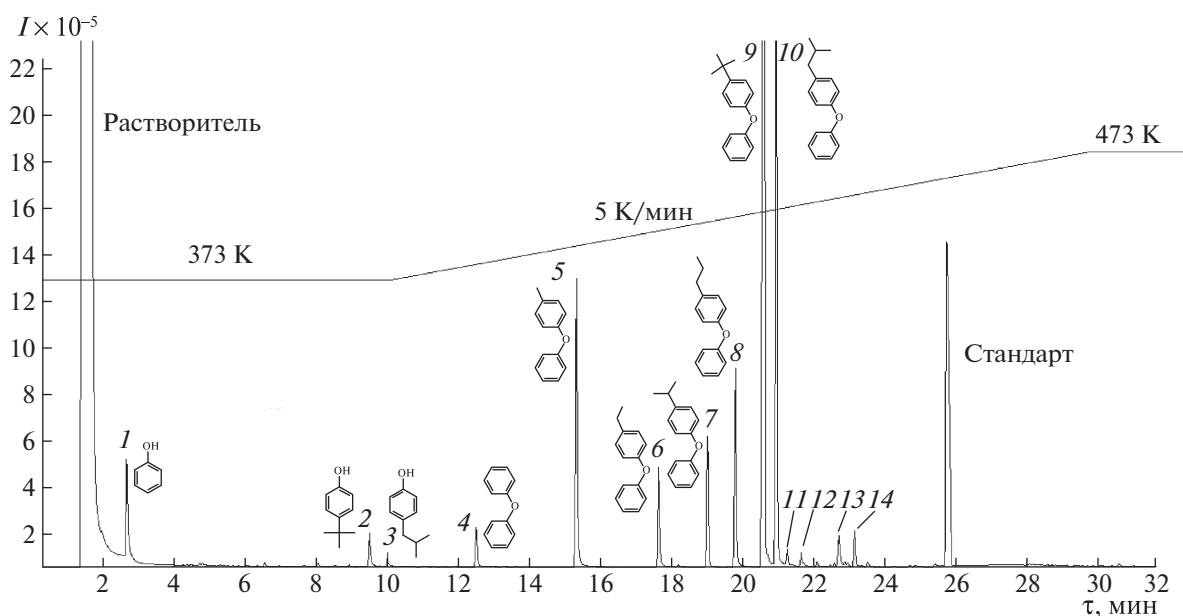
В данной работе в качестве объекта исследования избран 4-трет-бутилдифенилоксид (4-ТБДФО) как соединение, которое объединяет в себе свойства алкиларенов и простых ароматических эфиров. Нами произведен анализ взаимных превращений продуктов термолитиза, и показано, что изомеризация 4-ТБДФО играет определяющую роль в процессе распада.

Эта информация приобретает высокую значимость при исследовании и разработке термо- и теплостойких полимеров. Известно [11], что простые ароматические полиэферы обладают высокой тепло- и термостойкостью, а присутствие алкильного заместителя в ядре сообщает полимеру дополнительные свойства, например, повышает температуру стеклования. Полифениленоксиды и их алкилпроизводные используются при температурах вплоть до 623 К, поэтому полученные результаты актуальны для развития представления об их свойствах.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Исходные вещества

4-ТБДФО синтезирован, выделен и очищен нами [12], концентрация основного вещества составила 99.93 мас. % по данным ГЖХ.



**Рис. 1.** Хроматограмма смеси продуктов термического распада 4-ТБДФО ( $T = 728$  К,  $t_{\text{конт}} = 40$  мин): (1) фенол, (2) 4-трет-бутилфенол (4-ТБФ), (3) 4-изобутилфенол (4-ИБФ), (4) дифенилоксид (ДФО), (5) 4-метилдифенилоксид (4-МедФО), (6) 4-этилдифенилоксид (4-ЭДФО), (7) 4-изипропилдифенилоксид (4-ИПДФО), (8) 4-н-пропилдифенилоксид (4-НПДФО), (9) 4-трет-бутилдифенилоксид (4-ТБДФО), (10) 4-изобутилдифенилоксид (4-ИБДФО), (11–14) – не определенные компоненты  $X_1$ – $X_4$ .

#### Методика изучения термоллиза 4-ТБДФО

Исследование термоллиза проводили в газовой фазе в стеклянных капиллярах ( $l = 23$ – $25$  мм;  $d_n = 0.95$ – $1.05$  мм) из “Пирекса”, в которые помещалось исследуемое вещество, капилляр продувался гелием (чистота 99.999%) и запаивался. Степень заполнения составляла 25–27% объема, что соответствовало массе вещества в 0.8–1.0 мг. Взвешивания проводили на аналитических весах Shimadzu AUW 120D с точностью  $10^{-4}$  г. Термостатирование капилляра с веществом осуществлялось в лабораторной печи пиролиза, обеспечивающей точность поддержания температуры в изотермической зоне  $\pm 1$  К, устройство которой представлено в работе [13]. Время достижения изотермического режима после помещения капилляра в печь не превышало 60 с. Процесс пиролиза завершался процедурой закалки в охлажденной до  $-15^\circ\text{C}$  пробирке. Термическая стабильность 4-ТБДФО исследована в интервале температур 703–763 К с шагом в 5 К. Конверсия 4-ТБДФО не превышала 25%, число моль в процессе росло не более чем на 5%.

#### Анализ и идентификация компонентов реакционной смеси термоллиза

В качестве основного метода анализа реакционных смесей использовали ГЖХ. Анализ выполнялся на хроматографе “Кристалл 2000 М”, с

кварцевой капиллярной колонкой SE-30 ( $60$  м  $\times$   $250$  мкм  $\times$   $0.25$  мкм). Температурный профиль анализа приведен на хроматограмме (рис. 1). Температура испарителя –  $250^\circ\text{C}$ , детектора –  $280^\circ\text{C}$ .

Количественный анализ состава реакционной массы выполнен методом внутреннего стандарта, в качестве которого использовали  $n$ - $\text{C}_{20}\text{H}_{42}$  (98.0 мас. % по ГЖХ), величина калибровочного коэффициента по отношению к 4-ТБДФО составила  $0.9625 \pm 0.067$ .

Идентификация компонентов смесей включала направленный химический синтез и хромато-масс-спектрометрический анализ (70 эВ), выполненный на газовом хроматографе Agilent 6850, оснащенный капиллярной колонкой HP-5MS Agilent 19091S-433E ( $30$  м  $\times$   $250$  мкм  $\times$   $0.25$  мкм), и масс-селективным детектором Agilent 5975C VL MSD. Идентификацию продуктов реакции проводили с использованием правил и подходов, описанных Лебедевым [14], Претчем, Бюльманом и Аффольтером [15], а также данных библиотеки NIST 2017 [16].

Структура 4-ИБДФО (10) установлена в результате направленного синтеза. 4-ИБДФО получен по реакции Вюрца–Фиттига в результате взаимодействия смеси 4-бромДФО и изобутила бромистого на натриевой стружке в среде  $n$ -гексана при комнатной температуре. 4-БромДФО был получен в результате бромирования ДФО жид-

**Таблица 1.** Характеристика масс-спектров реакционной массы термоллиза 4-ТБДФО

Соединение	Масс-спектр 70 эВ ( $m/z$ , интенсивность отн. %)
Фенол	94 ( $M^+$ , 100), 66 (46), 39 (43)
4-ТБФ	150 ( $M^+$ , 23), 135 (100), 107 (42), 91 (10), 77 (10)
4-ИБФ	150 ( $M^+$ , 14), 107 (100), 91 (1), 77 (12)
ДФО	170 ( $M^+$ , 45), 141 (72), 115 (26), 94 (4), 77 (60)
4-МеДФО	184 ( $M^+$ , 100), 169 (4), 141 (15), 91 (100), 77 (50)
4-ЭДФО	198 ( $M^+$ , 58), 183 (100), 169 (5), 153 (10), 105 (16), 91 (15), 77 (57)
4-ИПДФО	212 ( $M^+$ , 37), 197 (100), 178 (4), 169 (2), 119 (6), 104 (14), 91 (36), 77 (38)
4-НПДФО	212 ( $M^+$ , 32), 183 (100), 165 (1), 153 (8), 107 (8), 91 (6), 77 (35)
4-ТБДФО	226 ( $M^+$ , 31), 211 (100), 183 (6), 171 (1), 165 (2), 91 (8), 77 (12)
4-ИБДФО	226 ( $M^+$ , 20), 183 (100), 165 (1), 115 (5), 107 (8), 91 (4), 77 (22)
X <sub>1</sub>	224 ( $M^+$ , 100), 209 (22), 194 (4), 181 (7), 169 (3), 153 (10), 147 (5), 131 (92), 116 (72), 115 (58), 107 (14), 91 (48), 77 (84), 65 (13), 51 (52)
X <sub>2</sub>	210 ( $M^+$ , 100), 195 (3), 184 (2), 181 (4), 165 (10), 152 (6), 141 (4), 133 (8), 117 (100), 115 (80), 103 (16), 91 (24), 77 (68), 65 (16), 51 (48)
X <sub>3</sub>	224 ( $M^+$ , 100), 209 (7), 194 (4), 183 (5), 181 (6), 165 (5), 153 (4), 147 (6), 131 (50), 116 (68), 115 (64), 107 (5), 91 (50), 77 (72), 65 (20), 51 (44)
X <sub>4</sub>	224 ( $M^+$ , 26), 209 (100), 194 (2), 181 (40), 169 (20), 152 (6), 139 (14), 126 (1), 115 (5), 104 (2), 98 (3), 90 (18), 76 (6), 63 (5), 51 (2)

ким бромом при комнатной температуре, соотношение ДФО/ $Br_2$  составило 20/1 моль/моль. Вре- мя выхода синтезированного 4-ИБДФО соответ- ствовало компоненту (10) на рис. 1. Наложение хроматограмм не приводится, так как снижает информативность.

АлкилДФО не имели позиционных изомеров и были идентифицированы в соответствии с пра- вилами определения алкилароматических струк- тур [14, 15]. 4-ТБФ идентифицирован посред- ством сравнения времени выхода со стандартным образцом. 4-ИБФ идентифицирован путем срав- нения времен выхода и масс-спектров компонен- та (3) и 4-*n*-бутилфенола (>98 мас. % по ГЖХ), ко- торый был добавлен к анализируемой смеси.

В реакционной массе, в условиях глубокой конверсии, также наблюдались следовые количе- ства (>0.1 мол. %) изопробилбензола и *трет*-бу- тилбензола. Концентрация не идентифициро- ванных компонентов X<sub>1</sub>–X<sub>4</sub> не превышала 0.5 мол. % в самых жестких условиях эксперимен- та. При построении кинетической модели распада ИПБ, ТББ и компоненты X<sub>1</sub>–X<sub>4</sub> не были вклю- чены в обработку.

Характеристики масс-спектров компонентов приведены в табл. 1.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### *Предположение о механизме радикальной изомеризации 4-ТБДФО*

В табл. 2 представлено изменение concentra- ций компонентов реакционной смеси при  $T=728$  К в зависимости от времени.

Анализ приведенных экспериментальных дан- ных показал, что при термоллизе 4-ТБДФО наибо- лее активно протекает изомеризация *трет*-бу- тильного заместителя с образованием 4-ИБДФО. Например, при 728 К и времени контакта 10 мин концентрация 4-ИБДФО составляет 3.45 мол. % при степени превращения 4-ТБДФО 4.40 мол. %, т.е. селективность образования 4-ИБДФО соста- вила 78%. В целом, в условиях эксперимента, при конверсии 4-ТБДФО 0–10% селективность обра- зования 4-ИБДФО составляет 70–80%. Деструк- ция 4-ТБДФО проявляется в существенно мень- шей степени и способствует образованию 4-ТБФ, фенола и ДФО в результате разрыва связей  $C_{Ar}-C_{четв.}$  и  $C_{Ar}-O$ . При этом распад практически не затрагивает алкильный заместитель, так как концентрация 4-МеДФО и 4-ИПДФО, напри- мер, имеет адекватную взаимосвязь только с 4-ИБДФО.

**Таблица 2.** Изменение концентраций компонентов реакционной массы термоллиза 4-ТБДФО при 728 К

Время, мин	Молярные концентрации компонентов, мол. %									
	Фенол	4-ТБФ	4-ИБФ	ДФО	4-МеДФО	4-ЭДФО	4-ИПДФО	4-НПДФО	4-ТБДФО	4-ИБДФО
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00
2.0	0.04	0.03	0.00	0.05	0.04	0.00	0.03	0.00	99.16	0.65
5.0	0.09	0.06	0.01	0.10	0.10	0.00	0.09	0.01	97.93	1.61
7.0	0.19	0.13	0.02	0.18	0.30	0.03	0.28	0.05	95.44	3.38
10.0	0.10	0.10	0.01	0.16	0.27	0.02	0.25	0.04	95.60	3.45
15.0	0.30	0.19	0.02	0.24	0.43	0.07	0.49	0.10	92.34	5.82
20.0	0.53	0.25	0.03	0.28	0.77	0.09	0.63	0.24	91.12	6.06
25.0	0.75	0.31	0.03	0.35	1.13	0.16	0.93	0.50	87.87	7.97
30.0	1.11	0.37	0.05	0.42	1.74	0.36	1.08	0.75	85.48	8.64
32.5	1.30	0.41	0.07	0.45	1.88	0.46	1.26	0.97	84.28	8.92
35.0	1.39	0.45	0.07	0.51	2.16	0.53	1.31	1.09	83.35	9.14
40.0	1.60	0.54	0.11	0.58	2.94	0.76	1.41	1.44	81.00	9.62
45.0	1.89	0.56	0.11	0.63	3.47	1.04	1.68	1.73	78.84	10.05
50.0	2.52	0.66	0.12	0.76	4.25	1.51	1.74	2.27	75.52	10.65

Такое направление распада выглядит довольно неожиданно. Особенно интересным оказывается то, что в продуктах термоллиза 4-ТБДФО независимо от температуры или времени контакта (в пределах условий исследования) не было обнаружено следов 4-*n*-бутилДФО и 4-*втор*-бутил ДФО. Очевидно, что причина заключается в механизме превращения *трет*-бутильного заместителя. Предположительно, изомеризация, способствующая превращению *трет*-бутильного заместителя исключительно в изобутильный, может происходить через образование трехчленного цикла между  $C_{перв}$  *трет*-бутильного заместителя и  $C_{Ar}$  ароматического ядра (рис. 2).

Приведенный механизм адекватно объясняет, почему в продуктах термоллиза 4-ТБДФО отсутствуют вторичные и нормальные бутиларены.

Аналогичный результат был получен нами при термоллизе 4-ТБФ [13]. Полученные для 4-ТБДФО и 4-ТБФ данные позволяют предположить об

общем характере радикальной изомеризации *трет*-бутильного заместителя, связанного с различными замещенными аренами.

*Формирование кинетической модели термоллиза 4-ТБДФО*

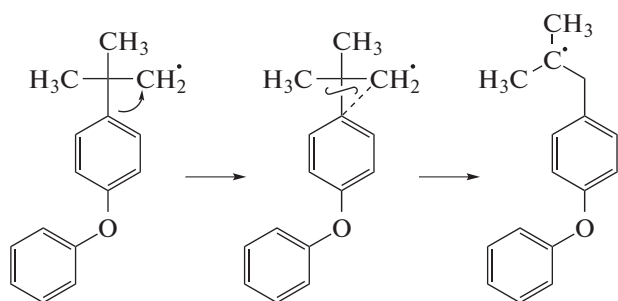
При разработке кинетической модели термоллиза 4-ТБДФО из всех теоретически возможных превращений в исследуемой системе был выделен ряд превращений, обладающих наибольшей значимостью (рис. 3).

Очевидно, что в процессе термоллиза представленные на схеме (рис. 3) реакции протекают в несколько стадий. Известно также, что в радикально-цепных процессах присутствие свободных радикалов не препятствует осуществлению мономолекулярных реакций [17]. Поэтому нами было принято допущение о том, что все реакции, избранные для кинетического анализа, мономолекулярные. Соответственно, константы скорости указанных на схеме реакций являются комбинацией констант скоростей всех стадий реакции. Значения констант скорости индивидуальных превращений были вычислены в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Для всех продуктов реакции вычислены фактические скорости изменения концентрации ( $r_{i, эксп}$ ), т. е. дифференциал от  $C_{i, эксп} = f(\tau)$ .

2. Вычислены расчетные скорости ( $r_{i, расч}$ ) накопления продуктов с учетом 38 наиболее вероятных реакций, уравнение:

$$r_{i, расч} = \sum (k_j C_j), \tag{1}$$



**Рис. 2.** Предположительный механизм изомеризации 4-ТБДФО.

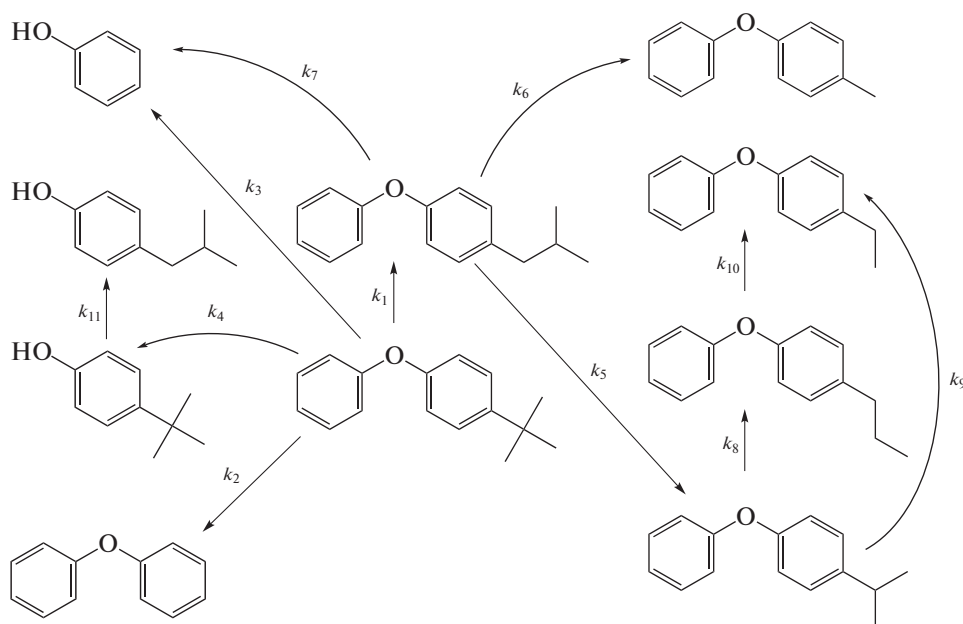


Рис. 3. Схема превращений, протекающих при термоллизе 4-ТБДФО.

3. Путем совместной обработки полученных в пункте 1 и 2 зависимостей с критерием оптимизации

$$\sum_n (r_{i,\text{эксп}} - r_{i,\text{расч}})^2, \quad (2)$$

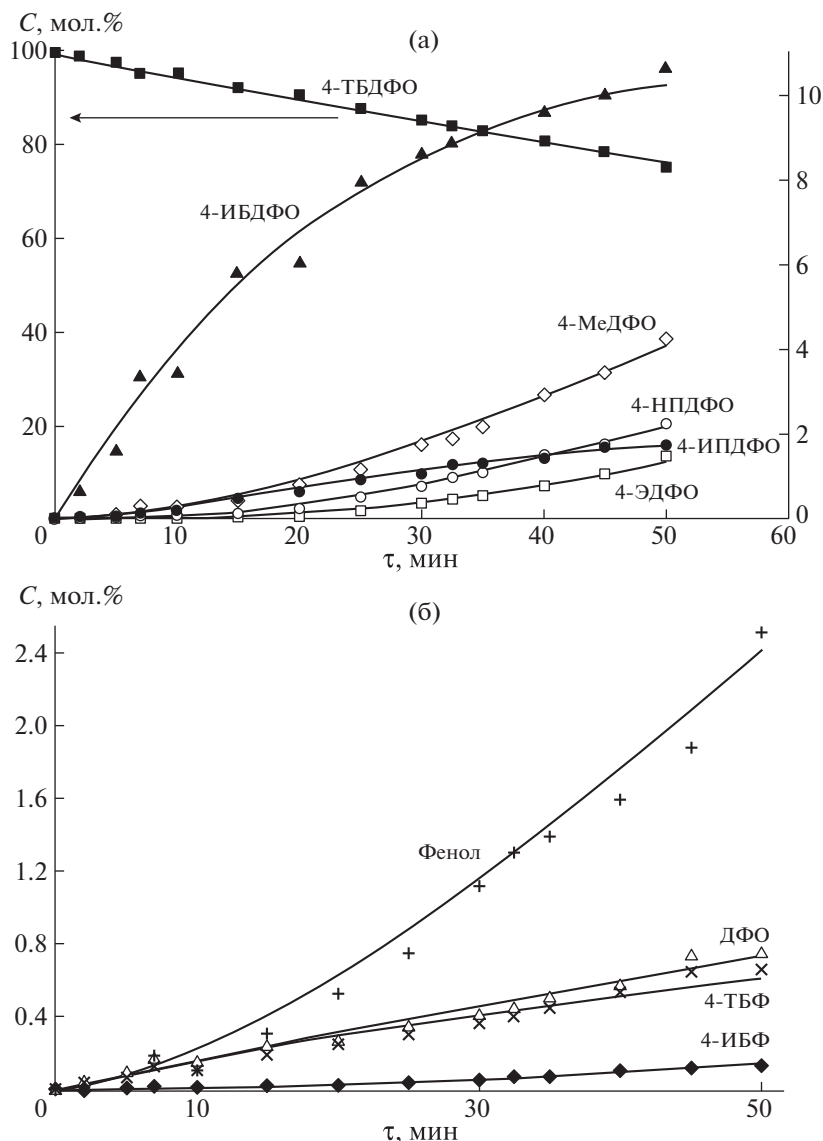
(где  $n$  – количество измерений)

исключены незначимые реакции и вычислены константы скорости  $k_j$  (табл. 3). Погрешность определения значений констант скорости составила  $<10\%$ .

4. С использованием констант скорости, приведенных в табл. 3, методом Рунге–Кутты получены расчетные значения концентраций продуктов термоллиза 4-ТБДФО.

Таблица 3. Значения констант скорости ( $k_i \times 10^5, \text{с}^{-1}$ ) для превращений, сопровождающих термоллиз 4-ТБДФО в диапазоне 703–763 К

$T, \text{К}$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$	$k_7$	$k_8$	$k_9$	$k_{10}$	$k_{11}$
703	2.16	0.07	0.04	0.06	8.54	6.12	2.32	27.37	4.85	8.01	3.82
708	3.26	0.11	0.06	0.10	10.44	8.02	3.51	37.59	7.36	10.44	5.29
713	3.92	0.15	0.09	0.13	13.90	11.08	5.02	43.98	8.57	11.68	6.82
718	5.21	0.21	0.11	0.18	19.56	14.68	6.59	62.38	13.67	18.65	8.99
723	5.52	0.21	0.12	0.20	20.90	16.02	7.82	72.56	17.68	20.19	9.92
728	8.19	0.28	0.16	0.28	25.20	19.76	9.66	104.18	24.88	30.73	13.18
733	13.63	0.56	0.30	0.46	48.55	35.27	16.39	129.98	33.48	43.24	19.42
738	17.02	0.77	0.42	0.63	65.20	46.86	22.02	164.91	44.76	56.79	24.92
743	19.83	0.89	0.47	0.67	75.85	52.11	25.35	179.88	55.18	76.26	27.18
748	29.84	1.44	0.78	1.15	116.20	81.80	39.30	278.71	84.85	103.73	40.65
753	32.25	1.81	0.95	1.35	167.55	101.32	48.39	291.40	89.68	108.56	42.18
758	49.47	2.64	1.43	2.06	203.96	140.71	69.07	437.01	146.91	173.64	70.70
763	62.39	3.25	1.97	2.80	277.93	205.26	93.66	537.93	175.68	208.72	93.18



**Рис. 4.** Сопоставление экспериментальных (маркеры) и расчетных (линии) концентраций продуктов термических превращений 4-ТБДФО при 728 К: а) (■) – 4-ТБДФО, (▲) – 4-ИБДФО, (●) – 4-ИПДФО, (○) – 4-НПДФО, (□) – 4-ЭДФО, (◇) – 4-МеДФО; б) (+) – Фенол, (△) – ДФО, (×) – 4-ТБФ, (◆) – 4-ИБФ.

5. Во всем диапазоне температур исследования адекватность предложенной модели тестирована методами математической статистики с применением критерия Пирсона, величина которого превышала 0.99, и критерия Фишера, расчетное значение которого при уровне значимости 0.05 многократно превышало табличную величину.

Из табл. 3 видно, что константа скорости изомеризации “4-ТБДФО → 4-ИБДФО”  $k_1$  на порядок выше констант скорости деструктивных процессов ( $k_2-k_4$ ), затрагивающих *трет*-бутильный заместитель и связи  $C_{ar}-O$  и  $C_{ar}-C_{четв}$ . Так, при 728 К суммарная величина констант скорости  $k_2-$

$k_4$  составляет  $7.20 \times 10^{-6} \text{ c}^{-1}$ , что в 11.4 раза меньше  $k_1 = 8.19 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ .

Также, необходимо отметить, что константа скорости превращения “4-ТБДФО → 4-ИПДФО” во всех вариантах расчета стремилась к нулю. Согласно полученной нами модели источником 4-ИПДФО, а также 4-МеДФО является 4-ИБДФО, претерпевающий активный распад алкильного заместителя (при 728 К,  $k_5 = 2.52 \times 10^{-4}$  и  $k_6 = 1.98 \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ ).

Результаты модельного описания состава реакционной массы термоллиза 4-ТБДФО при 728 К представлены на рис. 4.

**Таблица 4.** Значения констант скорости для реакции “4-ТБДФО → продукты”, протекающей при термоллизе 4-ТБДФО в диапазоне 703–763 К

$T, K$	$1000/T$	$k_p, c^{-1}$	$-\ln(k_i)$
703	1.42	$2.33 \times 10^{-5}$	10.665
708	1.41	$3.56 \times 10^{-5}$	10.243
713	1.40	$4.55 \times 10^{-5}$	9.998
718	1.39	$5.53 \times 10^{-5}$	9.803
723	1.38	$6.59 \times 10^{-5}$	9.627
728	1.37	$9.03 \times 10^{-5}$	9.312
733	1.36	$1.55 \times 10^{-4}$	8.770
738	1.36	$2.05 \times 10^{-4}$	8.493
743	1.35	$2.24 \times 10^{-4}$	8.402
748	1.34	$3.48 \times 10^{-4}$	7.962
753	1.33	$3.88 \times 10^{-4}$	7.855
758	1.32	$5.84 \times 10^{-4}$	7.445
763	1.31	$7.38 \times 10^{-4}$	7.211

#### Расчет параметров уравнения Аррениуса

Кинетический анализ экспериментальных данных в диапазоне 703–763 К был выполнен для реакции “4-ТБДФО → продукты” по уравнениям расчета константы скорости первого порядка. Путем линеаризации уравнения Аррениуса в координатах “ $\ln k_i - 1000/T$ ” установлено, что  $k_0 =$

$= 10^{14.3 \pm 0.5}$ ,  $E_a = 255.2 \pm 6.8$  кДж/моль. Значения констант скорости распада 4-ТБДФО приведены в табл. 4.

Для реакций, включенных в кинетическую модель процесса в диапазоне температур 703–763 К были вычислены константы скорости и параметры уравнения Аррениуса. Данные приведены в табл. 5.

Таким образом, установлено, что при термоллизе 4-трет-бутилдифенилоксида основным превращением является изомеризация в 4-изобутилдифенилоксид. Предложен механизм данной реакции.

В диапазоне температур 703–763 К для реакции “4-ТБДФО → продукты” вычислены параметры уравнения Аррениуса: предэкспоненциальный множитель  $k_0 = 10^{14.3 \pm 0.5}$ , энергия активации  $E_a = 255.2 \pm 6.8$  кДж/моль.

Предложена кинетическая модель процесса, согласно которой в диапазоне температур исследования основным источником продуктов распада – 4-МеДФО, фенола, 4-ИПДФО – является 4-ИБДФО. При этом 4-НПДФО образуется в результате изомеризации 4-ИПДФО, а 4-ЭДФО является продуктом деструкции этих двух компонентов. Деструкция исходного 4-ТБДФО протекает в незначительной степени и выражается в разрыве связей  $C_{ar}-O$  и  $C_{ar}-C_{четв}$  с образованием ДФО, 4-ТБФ и фенола.

Полученная информация может быть использована при разработке перспективных термо- и теплостойких полимерных композиций, так как позволяет предположить поведение их структуры в условиях повышенных температур. Выявлен-

**Таблица 5.** Значения параметров уравнения Аррениуса для превращений, сопровождающих термоллиз 4-ТБДФО в диапазоне 703–763 К

Реакция		$k_i$	$\lg(k_0)$	$E_a, \text{кДж/моль}$	$R$
4-ТБДФО	4-ИБДФО	$k_1$	$13.8 \pm 0.5$	$248.6 \pm 7.0$	0.99
4-ТБДФО	ДФО	$k_2$	$15.1 \pm 0.7$	$286.6 \pm 9.5$	0.98
4-ТБДФО	Фенол	$k_3$	$15.1 \pm 0.6$	$289.4 \pm 8.1$	0.99
4-ТБДФО	4-ТБФ	$k_4$	$14.3 \pm 0.5$	$276.6 \pm 7.3$	0.99
4-ИБДФО	4-ИПДФО	$k_5$	$15.7 \pm 0.6$	$267.3 \pm 9.0$	0.98
4-ИБДФО	4-МеДФО	$k_6$	$14.9 \pm 0.6$	$257.7 \pm 7.7$	0.99
4-ИБДФО	Фенол	$k_7$	$15.3 \pm 0.4$	$268.0 \pm 5.7$	0.99
4-ИПДФО	4-НПДФО	$k_8$	$12.6 \pm 0.3$	$218.0 \pm 4.7$	0.99
4-ИПДФО	4-ЭДФО	$k_9$	$15.3 \pm 0.4$	$264.0 \pm 5.5$	0.99
4-НПДФО	4-ЭДФО	$k_{10}$	$14.3 \pm 0.6$	$247.7 \pm 9.1$	0.99
4-ТБФ	4-ИБФ	$k_{11}$	$12.5 \pm 0.5$	$228.3 \pm 6.6$	0.99

ные закономерности, в целом, могут служить основой для дальнейшего исследования термической стабильности соединений класса алкилди-фенилоксидов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cabaleiro D., Pastoriza-Gallego M.J., Piñeiro M.M. et al.* // *J. Chem. Thermodynamics*. 2012. V. 50. P. 80.
2. *Cabaleiro D., Segovia J.J., Martín M.C. et al.* // *J. Chem. Thermodynamics*. 2016. V. 93. P. 86.
3. *Che J.C., Wu J.A., Li S.W. et al.* // *Reactive & Functional Polymers*. 2014. V. 78. P. 23.
4. *Hu W.Q., Cui Z.K., Jin J. et al.* // *Applied Surface Science*. 2011. V. 258. P. 507.
5. *Blake E.S., Hammann C.W., Edwards J.W. et al.* // *J. Chem. Eng. Data*. 1961. V. 6. № 1. P. 87.
6. *Jackson Jr. M.T., Walker J.Q.* // *J. Anal. Chem.* 1971. V. 43. № 1. P. 74.
7. *Laatikainen M., Vahteristo K., Saukkonen S. et al.* // *Ind. Eng. Chem. Res.* 1996. V. 35. P. 2103.
8. *Ederer H.J., Kruse A., Mas C. et al.* // *J. Supercrit. Fluids*. 1999. V. 15. P. 191.
9. *Yu J., Eser S.* // *Ind. Eng. Chem. Res.* 1998. V. 37. P. 4591.
10. *Guerra L.N.C., Huerta L.J.C., Lorgeoux C. et al.* // *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 2017. V. 133. P. 234.
11. *Бюллер К.-У.* Тепло- и термостойкие полимеры. Пер. с нем. / Под ред. Я.С. Выгодского. М.: Химия, 1984. 1056 с. // *Buhler K.-U. Spezialplaste*. В.: Akademie-Verlag, 1978. 1019 p.
12. *Druzhinina A.I., Pimenova S.M., Tarazanov S.V. et al.* // *J. Chem. Thermodynamics*. 2015. V. 87. P. 69.
13. *Шакун В.А., Нестерова Т.Н., Таразанов С.В.* // *Нефтехимия*. 2019. Т. 59(1). С. 113–120.
14. *Лебедев А.Т.* Масс-спектрометрия в органической химии. М.: Бинном, 2003. 493 с.
15. *Pretsch E., Buhlmann P., Affolter C.* *Structure Determination of Organic Compounds: Tables of Spectral Data*. Springer. 2000. 421 p.
16. Интернет-ресурс: <http://webbook.nist.gov/>
17. *Робинсон П., Холбрук К.* Мономолекулярные реакции: Пер. с англ. М.: Мир, 1975. 380 с.