

КИНЕТИКА И МЕХАНИЗМ  
ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ, КАТАЛИЗ

УДК 544.421.081.7:544.421.032.76

РЕАКЦИИ БЕНЗИЛ- И ГИДРОКСИЭТИЛ-РАДИКАЛОВ  
С ОКСИДОМ АЗОТА

© 2022 г. И. И. Морозов<sup>1\*</sup>, Е. С. Васильев<sup>1</sup>, Н. Д. Волков<sup>1</sup>, О. С. Морозова<sup>1</sup>,  
Д. Р. Нигматуллин<sup>1</sup>, А. Г. Сыромятников<sup>1,2</sup>, С. В. Савилов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: igormrzu@gmail.com

Поступила в редакцию 29.03.2022;

после доработки 18.04.2022;

принята в печать 20.04.2022

Бензил- и гидроксиэтил-радикалы играют важную роль в процессах горения и окисления толуола и этанола. В результате их реакций с оксидами азота образуется целый ряд токсикантов, в том числе частицы сажи. Установление механизма реакций бензил- и гидроксиэтил-радикалов с оксидами азота позволят объяснить многие важные химические процессы при горении и в атмосфере. В данной работе с помощью экспериментальной методики, использующей проточный реактор и время-пролетный масс-спектрометр, работающий в режиме многофотонной ионизации, исследованы реакции бензил- и гидроксиэтил-радикалов с оксидом азота в температурном диапазоне 250–360 К при давлении 1 мбар. Для разных типов красителей перестраиваемого лазера получены спектры многофотонной диссоциации гидроксиэтил-радикалов в диапазоне длин волн лазерного излучения от 425 до 590 нм. Экспериментально установлен вид температурной зависимости отношения констант скорости реакций оксида азота с бензил- и гидроксиэтил-радикалами. С использованием литературных данных методом конкурирующих реакций получено значение константы скорости реакции NO с C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>CH<sub>2</sub> при температуре T = 299 К.

*Ключевые слова:* бензил- и гидроксиэтил-радикалы, оксид азота, константа скорости реакции, масс-спектрометрия, многофотонная ионизация.

DOI: 10.31857/S0207401X22100089

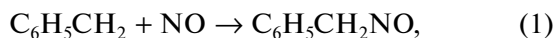
## 1. ВВЕДЕНИЕ

Процессы газофазных трансформаций толуола и этанола играют важную роль в горении и окислении углеводородных топлив, а также в химии атмосферы. Бензил – первичный продукт окисления толуола, образующийся при потере атома водорода Н метильной боковой цепи. Толуол является простейшим алкилированным ароматическим соединением и одной из самых крупных компонент дизельного топлива и бензина. Окисление толуола начинается с реакции с гидроксильным радикалом ОН. Далее образовавшиеся свободные радикалы вступают в реакции с молекулярным кислородом и другими малыми газовыми примесями атмосферы, включая оксиды азота. В свою очередь, этанол представляет собой наиболее распространенный органический реагент, который находит широкое практическое применение. В настоящее время во многих стра-

нах используется биотопливо, основу которого составляет этанол.

Бензил- и гидроксиэтил-радикалы являются ключевыми промежуточными звеньями в окислении ароматических углеводородных топлив и образовании токсичных полициклических ароматических углеводородов. Реакции бензильных радикалов с оксидами азота играют важную роль в химии атмосферы и процессах горения ароматических соединений, которые коагулируют с образованием частиц сажи. Наличие этих соединений в атмосфере является серьезной экологической проблемой из-за их токсичности [1] и потенциального участия в глобальном потеплении [2]. Для специалистов гидроксиэтильный радикал СН<sub>3</sub>СНОН представляет особый интерес ввиду его важной роли в процессах горения и трансформации в атмосфере, а также способности реагировать с NO<sub>x</sub>. В процессах горения и атмосферной трансформации образовавшиеся бен-

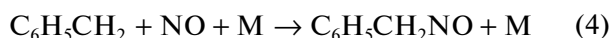
зил- и гидроксиэтил-радикалов реагируют с другими окружающими молекулами, в том числе и с монооксидом азота:



Процессы (1)–(3), в которых образуются токсианты, вплоть до настоящего времени недостаточно изучены.

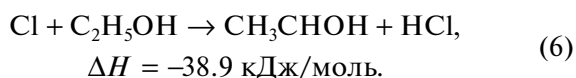
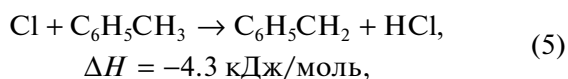
Авторы работы [3], применяя методы лазерного импульсного фотолиза и фотоионизационной масс-спектрометрии, исследовали реакцию радикала гидроксиэтила с оксидом азота (3) и привели значение константы скорости реакции  $k = (2.4 \pm 0.6) \cdot 10^{-11} \text{ см}^3 \cdot \text{молекул}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ . Теоретическое исследование реакции гидроксиэтил-радикалов с оксидом азота в диапазоне температур 200–1100 К и давлений от  $1.0 \cdot 10^{-5}$  до 10 бар было выполнено в работе [4]. В частности, было показано, как изменяются каналы и продукты реакции в зависимости от давления и температуры.

Впервые кинетика реакции



при избытке NO в реакторе исследовалась импульсным фотолизом в работе [5], где в качестве буферного газа M использовался молекулярный азот. В результате константа скорости оказалась равной  $k = (10 \pm 1) \cdot 10^{-12} \text{ см}^3 \cdot \text{молекула}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ . Авторами работы [6] рассматривалась равновесная кинетика обратимого процесса присоединения NO к бензил-радикалу  $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2$  при атмосферном давлении и в интервале температур  $400 < T < 520 \text{ К}$ . Полученное значение величины константы скорости реакции совпало с данными из работы [5].

В лабораторных экспериментах бензил- и гидроксиэтил-радикалы получают в результате реакции атомарного хлора с толуолом и этанолом, т.е.



Реакция (5) толуола с атомарным хлором исследовалась ранее методом импульсного радиолиза в сочетании с УФ-спектроскопией [7]. Авторы зарегистрировали УФ-спектр бензил радикала в диапазоне длин волн 210–340 нм. Абсолютные значения константы скорости реакции (5) были измерены в работе [8] с одновременным использованием методов лазерного фотолиза и инфракрасного поглощения непрерывного действия,

включающего многопроходную абсорбционную ячейку типа Херриотта.

Реакция атомов хлора с этанолом рассматривалась ранее в нескольких лабораториях. Так, в работе [9] реакция (6) в проточном реакторе при комнатной температуре и давлении в несколько мбар исследовалась методом конкурентных реакций с анализом продуктов и реагентов с помощью масс-спектрометра. В этих экспериментах отрыва атомов водорода от OH-группы не наблюдался, поскольку атом H отрывается от алкильной группы, что термодинамически более выгодно. Более детальная информация об атмосферных процессах с участием бензола и этанола приведена в работах [10, 11].

Метод многофотонной ионизации (МФИ) широко применяется в исследовании кинетики химических реакций [3]. Ионизация свободных радикалов протекает в несколько стадий. Сначала происходит поглощение фотона радикалом и переход последнего в возбужденное состояние. Затем следует поглощение следующего кванта, которое приводит к фотоионизации частицы. Образовавшиеся при этом ионы детектируются масс-спектрометром. Метод МФИ является достаточно высокочувствительным и селективным. Он лишен многих недостатков метода ионизации электронным ударом, которая приводит к диссоциативной ионизации молекул и сложностям интерпретации масс-спектров. Впервые спектр МФИ радикалов бензила был зарегистрирован в реакции атомов хлора с бензолом [12]. В дальнейшем этот метод успешно использовался при исследовании реакций атомарного кислорода с молекулярным бромом [13], в котором был зарегистрирован масс-спектр радикалов BrO.

Цель настоящего исследования заключалась в установлении кинетических закономерностей реакций бензил- и гидроксиэтил-радикалов с оксидом азота при давлении 1 мбар в температурном диапазоне от 250 до 360 К с использованием метода конкурирующих реакций.

## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Описание экспериментальной методики, использующей проточный реактор, времяпролетный масс-спектрометр (работающий в режиме многофотонной ионизации и ионизации электронным ударом) и систему напуска реагентов и продуктов реакции в виде молекулярного пучка, было приведено ранее в работах [14, 15]. Указанная методика применялась для детектирования радикалов  $\text{CH}_3$ ,  $\text{C}_3\text{H}_5$ ,  $\text{CH}_2\text{OH}$ ,  $\text{CH}_3\text{CHOH}$  и их дейтерированных аналогов при установлении кинетических закономерностей элементарных реакций в газовой фазе.

### Методика кинетических измерений

Эта же методика с небольшими модификациями была применена в настоящей работе для исследования реакций (1)–(3) бензил- и гидроксипропан-2-ил-радикалов с оксидом азота в проточном реакторе в температурном диапазоне 250–360 К и при давлении 1 мбар = 0.75 Торр.

Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Толуол и этанол в определенных концентрациях в смесях с газом-носителем гелием подавали в зону реакции через инжектор 1. На рис. 2 детально показан ввод толуола и этанола в проточный реактор через инжектор. Молекулярный хлор в смеси с гелием вводили в разрядную трубку, а оксид азота подавали в зону реакции через отдельную линию.

Атомы хлора получали в результате пропускания 5%-ной смеси хлора в гелии через высокочастотный разряд выше по потоку по отношению к реакционной зоне. Диссоциация хлора достигала 20–60%. Концентрации толуола, этанола,  $\text{Cl}_2$  и NO устанавливали по изменению давления в калиброванном объеме. Концентрацию атомов хлора определяли по степени диссоциации молекулярного хлора в разряде.

Концентрации реагентов и продуктов реакций, включая свободные радикалы, измеряли масс-спектрометрическими методами с применением ионизации электронным ударом и МФИ. В работе были задействованы два масс-спектрометра: в первом в качестве анализатора использовался масс-спектрометр с секторным магнитом, а во втором – времяпролетный масс-анализатор. Свободные радикалы детектировались методом МФИ, осуществляемой с помощью перестраиваемого лазера на красителях Lambda Physik FL 2002 (USA), накачка которого осуществлялась эксимерным лазером Lambda Physik LPX205 iCC (USA). Эксимерный лазер работал на длине волны  $\lambda = 308$  нм (рабочая смесь  $\text{XeCl}$ ) с энергией 400 мДж, длительностью импульса  $\tau = 28$  нс и частотой повторения импульсов 5 Гц. Для детектирования ионов использовались многоканальные пластины. Свет от перестраиваемого лазера фокусировался кварцевой линзой на молекулярный пучок в ионном источнике.

Концентрации реагентов в реакциях (1)–(3), определенные с помощью МФИ, составили  $[\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2]_0 = [\text{CH}_3\text{CHOH}]_0 = 2.4 \cdot 10^{14}$  молекул/см<sup>3</sup>. Концентрация  $[\text{NO}]_0$  изменялась в диапазоне  $(6 \div 54) \cdot 10^{13}$  молекул/см<sup>3</sup>. Нижний индекс “0” обозначает концентрации веществ до реакций с атомарным хлором.

Скорость потока составляла 40–50 м/с. Расстояние между инжектором и зоной отбора пробы было около 3 см. В реакторе поддерживалось давление в 1 мбар. Температуру устанавливали и

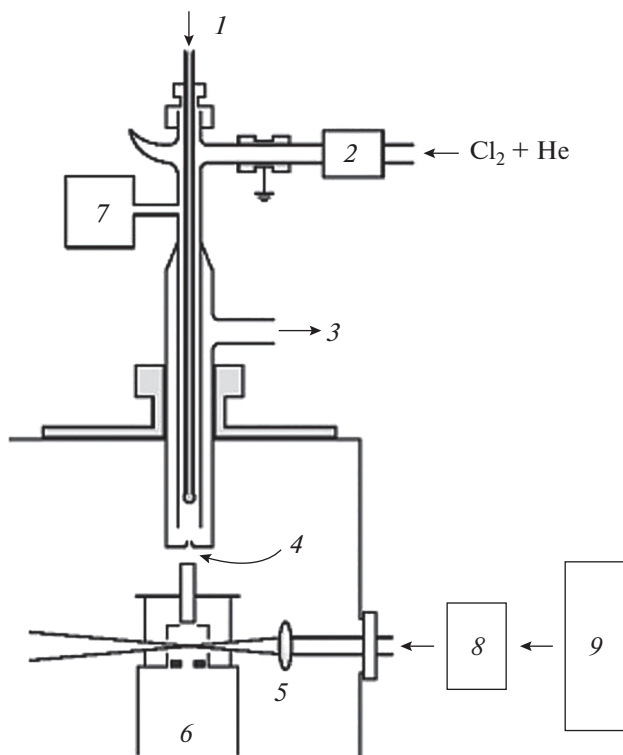


Рис. 1. Времяпролетный масс-спектрометр с многофотонной ионизацией: 1 – инжектор, 2 – высокочастотный разряд, 3 – откачка, 4 – отбор проб, 5 – линза, 6 – времяпролетный масс-спектрометр, 7 – манометр, 8 – лазер на красителях, 9 – эксимерный лазер.

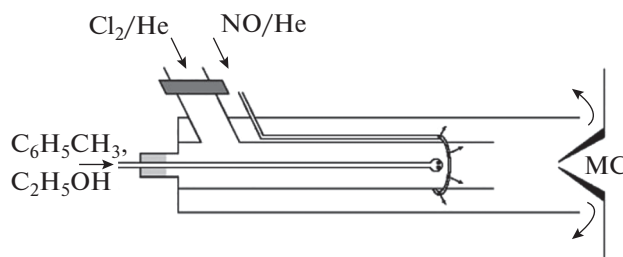


Рис. 2. Схема проточного реактора и ввода реагентов.

поддерживали путем циркуляции в рубашке термостатирующей жидкости термостатом F30 производства компании Julabo (Germany) с точностью  $\pm 1$  К. Температура измерялась термопарой, помещенной в жидкость. Ионный ток собирался и накапливался за  $N = 200$  лазерных импульсов.

### Реактивы и красители

В эксперименте использовали коммерческие реагенты: гелий высокой чистоты (99.996%, Messer-Griesheim), толуол (98.5%, Sigma-Aldrich), этанол (98.7%, Sigma-Aldrich), NO (98.7%, Linde), Ar (99.996%, Messer-Griesheim);  $\text{Cl}_2$  (98%, Messer-

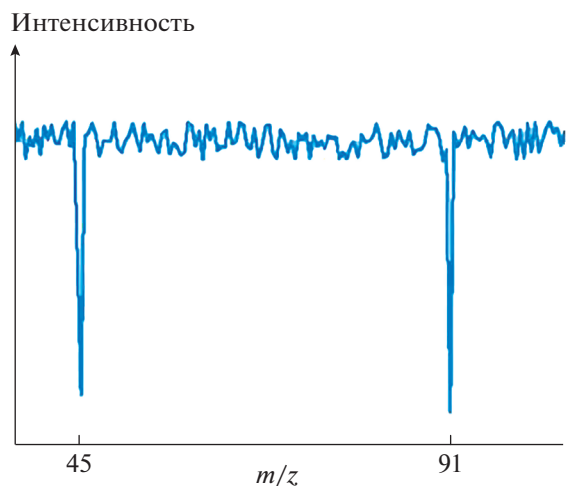


Рис. 3. Масс-спектр радикалов  $C_6H_5CH_2$  и  $CH_3CHOH$ , генерируемых реакциями (5) и (6) на длине волны 502.5 нм.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

#### Многофотонная ионизация бензил- и гидроксиэтил-радикалов

Как было сказано выше, бензил- и гидроксиэтил-радикалы получали в результате реакции (5) и (6) атомарного хлора с толуолом и этанолом. На рис. 3 приведен масс-спектр радикалов  $C_6H_5CH_2$  ( $m/z = 91$ ) и  $CH_3CHOH$  ( $m/z = 45$ ), полученный на длине волны  $\lambda = 502.5$  нм. В табл. 1 для разных типов красителей перестраиваемого лазера представлены характеристики спектров многофотонной диссоциации гидроксиэтил-радикалов в диапазоне длин волн лазерного излучения от 427 до 540 нм.

В верхней части рис. 4 для разных типов применяемых красителей изображена зависимость ионного тока молекулярной массы гидроксиэтил-радикала  $m/z = 45$  от длины волны лазерного излучения. В нижней части этого рисунка приведены соответствующие энергии ионизирующего лазера.

Эксперименты по определению зависимости ионного тока радикала гидроксиэтила от энергии лазера с длиной волны  $\lambda = 544$  нм были проведены при следующих отношениях массы к заряду:  $m/z = 45, 29$  и  $43$ . По результатам этих экспериментов сделан вывод, что молекулярный ион с  $m/z = 45$  образуется 2 + 1 фотонами, а ионы с  $m/z = 29$  и  $43$  образуются в процессе фрагментации, и для их ионизации требуется дополнительный, четвертый фотон.

Griesheim, 5%-ный раствор в He). Все реактивы использовали после очистки и обезгаживания.

В перестраиваемом лазере на красителях применяли следующие красители: Coumarin 153 (Dye 153) в области спектра 517–574 нм с максимумом при 535 нм; Coumarin 307 (Dye 307) в области спектра 480–540 нм с максимумом при 500 нм; Coumarin 47 (Dye 47) в области спектра 442–479 нм с максимумом при 460 нм; Coumarin 120 (Dye 120) в области спектра 429–460 нм с максимумом при 441 нм.

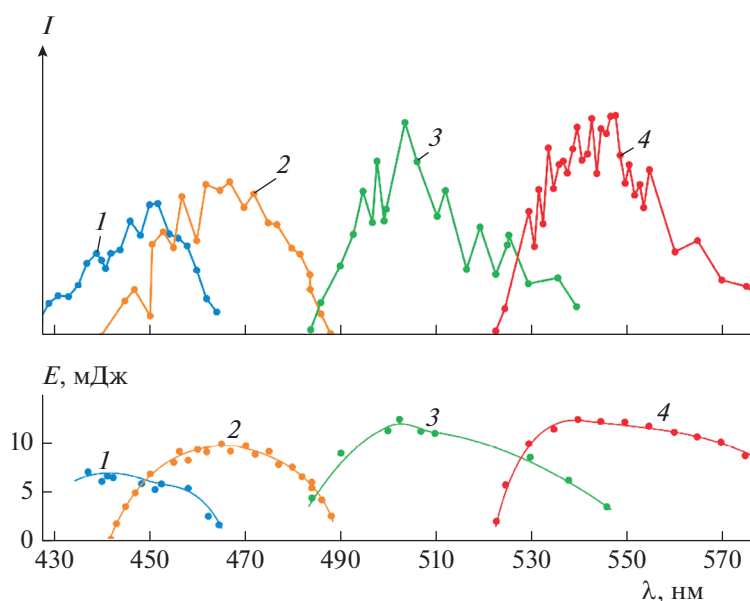


Рис. 4. Ионный ток гидроксиэтил-радикала, зарегистрированный при  $m/z = 45$  в диапазоне длин волн  $\lambda = 420$ –574 нм. Вверху – интенсивность ионного тока  $I$ , внизу – мощность лазерного излучения  $E$ . Синие кривые (1) соответствуют красителю Dye 120, желтые (2) – Dye 47, зеленые (3) – Dye 307, красные (4) – Dye 153.

**Кинетические измерения**

Измерение отношений  $k_1/k_2$  констант скорости реакций (1) и (2) оксида азота с бензил- и гидроксипропилом проводилось для семи различных значений температуры. На рис. 5 представлен результат определения  $k_1/k_2$  при  $T = 299$  К.

В табл. 2 собраны данные для отношения констант скорости в диапазоне температур от 250 до 360 К. Обработка этих данных в аррениусовских координатах (см. рис. 6) дает следующее значение:

$$k_1/k_2 = 0.043 \exp(6.9/RT). \quad (7)$$

Используя величину  $k_2$ , взятую из работы [3], для константы скорости  $k_1$  при температуре  $T = 299$  К получим

$$k_1(299 \text{ К}) = 1.67 \cdot 10^{-11} \text{ см}^3 \cdot \text{молекула}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (8)$$

Обратимая реакция (4) радикала бензила с оксидом азота в присутствии молекулярного азота изучалась ранее при различных давлениях и температурах [6]. Так, для прямой реакции (4) были установлены значения констант скорости для нескольких температур:

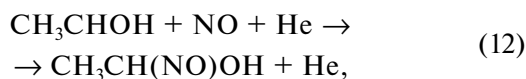
$$k_4(415 \text{ К}) = (9.1 \pm 0.8) \cdot 10^{-12} \text{ см}^3 \cdot \text{молекула}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (9)$$

$$k_4(443 \text{ К}) = (8.1 \pm 0.5) \cdot 10^{-12} \text{ см}^3 \cdot \text{молекула}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (10)$$

$$k_4(466 \text{ К}) = (6.2 \pm 0.9) \cdot 10^{-12} \text{ см}^3 \cdot \text{молекула}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (11)$$

Однако эти данные были получены в отличных от наших условиях экспериментов, и поэтому их нельзя сравнивать.

В то же время в работе [16] рассматривалась реакция



для которой были измерены константы скорости при различных значениях давления гелия:

$$k_{12} = (12.5 \pm 0.4) \cdot 10^{-12} \text{ см}^3 \cdot \text{молекула}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \quad (13)$$

при  $P = 0.55$  Торр,

$$k_{12} = (16.6 \pm 0.6) \cdot 10^{-12} \text{ см}^3 \cdot \text{молекула}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \quad (14)$$

при  $P = 1.00$  Торр,

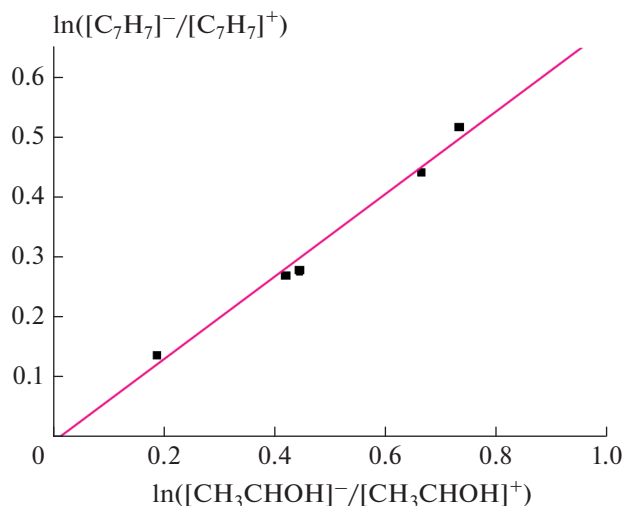
$$k_{12} = (18.1 \pm 0.6) \cdot 10^{-12} \text{ см}^3 \cdot \text{молекула}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \quad (15)$$

при  $P = 2.00$  Торр.

Эти значения оказались близки к результатам, полученным в работе [3] при более высоком давлении (2.0–4.0 Торр). Поэтому использованное на-

Таблица 1. Характеристики спектров многофотонной диссоциации радикалов гидроксипропила ( $\lambda$  — длина волны,  $I$  — интенсивность сигнала,  $E$  — энергия лазерного импульса)

Краситель	$\lambda$ , нм	$I$ , отн. ед.	$E$ , мДж
Dye 120	425	4	2.9
	430	10	4.5
	435	14	5.8
	440	20	6.4
	445	29	6.1
	450	23	5.9
	455	27	5.3
	460	15	4.0
Dye 47	465	5	1.6
	440	1	—
	443	7	—
	445	11	—
	450	5	6.9
	455	24	8.5
	460	20	9.3
	465	40	9.6
	470	34	9.8
	475	28	8.5
Dye 307	480	20	8.0
	485	12	5.6
	490	1	1.8
	485	6	4.5
	490	18	9.0
	492	30	—
	494	37	—
	494.5	30	—
	495	45	10.4
	496	30	—
	497	55	—
	500	31	12.0
	504	19	—
	505	29	12.0
	510	32	11.2
	512	16	—
	515	28	10.6
	520	30	10.1
525	17	9.3	
530	14	8.5	
535	15	6.9	
540	7	5.6	
545	—	4.2	
550	—	2.1	
Dye 153	525	—	4.0
	530	—	10.2
	535	40	12.3
	540	55	12.5
	545	42	12.3
	550	40	12.3
	555	36	11.7
	560	21	11.2
	565	25	10.9
	570	14	9.8
	575	12	9.1
	580	9	7.7
	585	6	6.1
	590	4	4.5



**Рис. 5.** Отношение констант скорости реакций оксида азота с бензил- и гидроксипропан-2-ил-радикалами при температуре  $T = 299$  К.

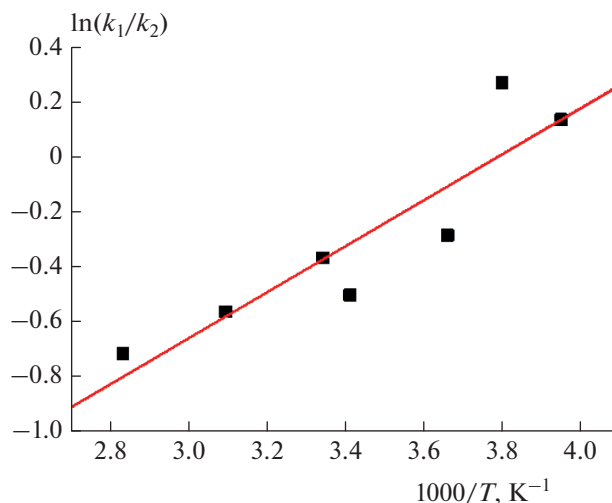
ми значение  $k_2$ , взятое из работы [3], для определения величины  $k_1$  (см. (8)) является правомерным.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее исследование является продолжением цикла работ [17–20] по применению масс-спектрометрии к исследованию атмосферных процессов. В данной работе с помощью экспериментальной методики, в которых используются проточный реактор и времяпролетный масс-спектрометр, работающий в режиме многофотонной ионизации, исследованы реакции бензил- и гидроксипропан-2-ил-радикалов с оксидом азота в температурном диапазоне 250–360 К и при давлении 1 мбар = 0.75 Торр. Бензил- и гидроксипропан-2-ил-радикалы генерировались получали в результате реакций атомарного хлора с толуолом и этанолом. Для разных типов красителей перестраиваемого лазера получены спектры многофотонной диссоциа-

**Таблица 2.** Температурная зависимость отношения констант скорости реакций бензила и гидроксипропан-2-ила с оксидом азота NO в диапазоне температур  $250 < T < 360$  К

$T$ , К	$k_1/k_2$
253	1.140
263	1.300
273	0.750
293	0.605
299	0.692
323	0.570
353	0.490



**Рис. 6.** Температурная зависимость отношения констант скорости реакции оксида азота с бензил- и гидроксипропан-2-ил-радикалами.

ции гидроксипропан-2-ил радикалов в диапазоне длин волн лазерного излучения от 425 до 590 нм.

Экспериментально установлено, что температурная зависимость отношения  $k_1/k_2$  констант скорости реакций оксида азота с бензил- и гидроксипропан-2-ил-радикалами имеет вид

$$k_1/k_2 = 0.043 \exp(6.9/RT).$$

С использованием литературных данных методом конкурирующих реакций получено следующее значение константы скорости реакции NO с  $C_6H_5CH_2$  при температуре  $T = 299$  К:

$$k_1(299 \text{ К}) = 1.67 \cdot 10^{-11} \text{ см}^3 \cdot \text{молекула}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Представленное исследование было частично выполнено в университете Гёттингена. Авторы выражают благодарность проф. К. Хоерманну за доброжелательную атмосферу, полезные советы и дискуссии, а также д-ру И. Сиба за помощь в совместной работе.

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (регистрационные номера тем 122040500060-4 и АААА-А21-121011990019-4) и при финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 19-05-50076 (Микромир)).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dockery D.W., Pope C.A., Xu X. et al. // New Engl. J. Med. 1993. V. 329. № 24. P. 1753.
2. Shindell D., Faluvegi G. // Nature Geosci. 2009. V. 2. № 4. P. 294.
3. Miyoshi A., Matsui H., Washida N. // Chem. Phys. Lett. 1989. V. 160. № 3. P. 291.

4. Wang X., Song J., Meng Z. // J. Phys. Chem. A. 2019. V. 123. № 35. P. 7544.
5. Ebata T., Obi K., Tanaka I. // Chem. Phys. Lett. 1981. V. 77. № 3. P. 480.
6. Boyd A.A., Noziere B., Lesclaux R. // J. Phys. Chem. 1995. V. 99. № 27. P. 10815.
7. Markert F., Pagsberg P. // Chem. Phys. Lett. 1993. V. 209. № 5–6. P. 445.
8. Smith J.D., DeSain J.D., Taatjes C.A. // Chem. Phys. Lett. 2002. V. 366. № 3–4. P. 417.
9. Khatoun T., Edelbüttel-Einhaus J., Hoyer mann K. et al. // Bericht. Bunseng. Phys. Chem. 1989. V. 93. № 5. P. 626.
10. Vereecken L. // Adv. Atmos. Chem. V. 2: Organic oxidation and multiphase chemistry / Eds. Barker J.R., Steiner A.L., Wallington T.J. New Jersey: World Scientific, 2019.
11. Taketani F., Takahashi K., Matsumi Y. et al. // J. Phys. Chem. A. 2005. V. 109. № 17. P. 3935.
12. Hoffbauer M.A., Hudgens J.W. // J. Phys. Chem. 1985. V. 89. № 24. P. 5152.
13. Морозов И.И., Хоерманн К. // Докл. АН. 1997. Т. 355. № 2. С. 203.
14. Heinemann-Fiedler P., Hoyer mann K. // Bericht. Bunseng. Phys. Chem. 1988. V. 92. № 12. P. 1472.
15. Edelbüttel-Einhaus J., Hoyer mann K., Rohde G. et al. // Sympos. (Intern.) Combust. 1992. V. 24. № 1. P. 661.
16. Daële V., Ray A., Vassalli I. et al. // Intern. J. Chem. Kinet. 1995. V. 27. № 11. P. 1121.
17. Васильев Е.С., Карпов Г.В., Волков Н.Д. и др. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 3. С. 17.
18. Дьяков Ю.А., Адамсон С.О., Ванг П.К. и др. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 5. С. 68.
19. Васильев Е.С., Волков Н.Д., Карпов Г.В. и др. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 10. С. 30.
20. Васильев Е.С., Карпов Г.В., Шартава Д.К. и др. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 5. С. 10.