

УДК 541.128

КОМПОЗИЦИЯ [ХЕЛАТЫ Ni(II) + ЦЕТИЛТРИМЕТИЛАММОНИЙ БРОМИД]: ОСОБЕННОСТИ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА ПРИМЕРЕ РЕАКЦИИ РАЗЛОЖЕНИЯ ГИДРОПЕРОКСИДА *трет*-БУТИЛА© 2021 г. Л. А. Смурова<sup>а,\*</sup>, З. С. Карташева<sup>а</sup><sup>а</sup> Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия

\*e-mail: smurova.lid@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.01.2020 г.

После доработки 20.11.2020 г.

Принята к публикации 21.11.2020 г.

Показано, что внутрикомплексные соединения Ni(II) в сочетании с цетилтриметиламмоний бромидом (СТАВ) проявляют высокую каталитическую активность в процессе разложения гидропероксида *трет*-бутила (ROOH); аналогичный эффект имеет место при использовании композиции свободного лиганда (основание Шиффа L(ON) и СТАВ). Установлено, что суммарная скорость распада  $W_{\Sigma}$  в случае присутствия в реакции одновременно Ni(II) или L(ON) + СТАВ превышает сумму скоростей в опытах, где данные компоненты присутствуют по отдельности:  $\beta = W_{\Sigma}/(W_{Ni,L(ON)} + W_{СТАВ}) > 1$ . Сделан вывод, что исследуемые бинарные системы являются эффективными композициями, обладающими каталитическими свойствами, отличными от свойств отдельно взятых компонентов, ее составляющих. Методом спектрофотометрии показано образование и расходование комплексов  $[Ni(II)_{исх} \cdots ROOH]$ . Исследовано влияние СТАВ на этот процесс.

**Ключевые слова:** комплексные соединения никеля, цетилтриметиламмоний бромид, основания Шиффа, гидропероксид *трет*-бутила

DOI: 10.31857/S0044453721060248

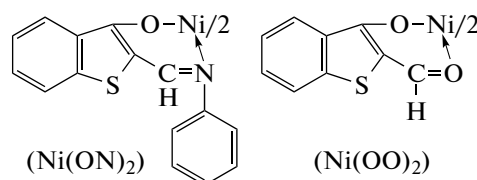
Общая проблема для каталитических процессов – обеспечение высокой скорости, селективности реакции и условий поддержания катализатора в активной форме. Известно, что эффективность гомогенных катализаторов (в основном используются *d*-металлы) уменьшается в ходе реакции вплоть до остановки в результате полной пассивации на небольших глубинах конверсии. Это – один из факторов, который делает применение таких катализаторов недостаточно эффективным. Каталитическая активность может быть увеличена при использовании активирующих добавок. Установлено значительное увеличение активности  $Ni(acac)_2$  посредством модификации добавками монодентатных лигандов в реакции селективного окисления этилбензола в гидропероксид [1]. Достаточно актуально исследование механизма активации комплексов никеля с помощью различных модификаторов.

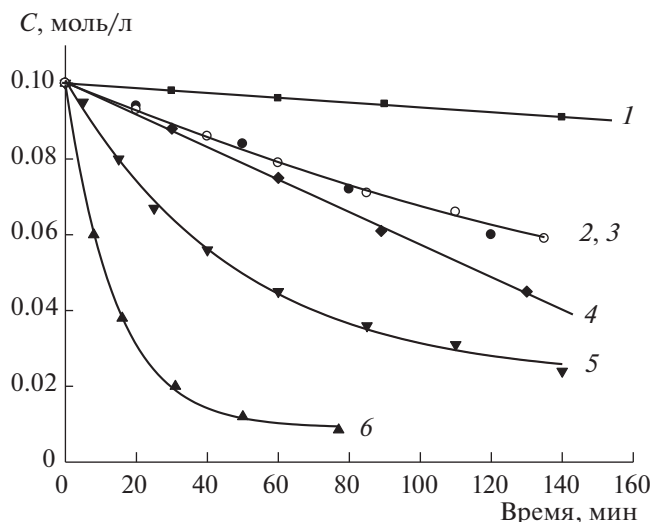
Известно, что добавки поверхностно-активных веществ (ПАВ) могут существенно влиять на скорость и механизм окисления углеводородов. Катионный ПАВ цетилтриметиламмоний бромид (СТАВ) служит эффективным катализатором окисления этилбензола, лимонена [2, 3].

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование каталитической активности композиции  $[Ni(II) + СТАВ]$ , каждый компонент которой проявляет каталитические свойства. В качестве модельной реакции использовали реакцию распада гидропероксида *трет*-бутила (ГПТБ) в хлорбензоле.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве катализаторов использовали внутрикомплексные соединения бис(2-фенилиминометил-3-оксибензо[b]тиофенаты) никеля с бидентатными лигандами –  $Ni(ON)_2$  и  $Ni(OO)_2$ , а также соответствующие им свободные лиганды – L(ON) и L(OO), предоставленные Институтом органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН. Структурные формулы хелатов никеля представлены ниже:





**Рис. 1.** Кинетические кривые распада ГПТБ без добавок (1) и в присутствии: 2 – Ni(NO)<sub>2</sub>, 3 – Ni(OO)<sub>2</sub>, 4 – СТАВ, 5 – Ni(OO)<sub>2</sub> + СТАВ, 6 – Ni(ON)<sub>2</sub> + СТАВ; [Ni(ON)<sub>2</sub>], [Ni(OO)<sub>2</sub>] = 10<sup>-4</sup> М, [СТАВ] = 10<sup>-2</sup> М, хлорбензол, 60°С.

Хлорбензол фирмы “Acros Organics” и цетилтриметиламмоний бромид (СТАВ) фирмы “Serva” использовали без предварительной очистки. ГПТБ экстрагировали хлорбензолом из 70%-го водного раствора, затем осушали безводным Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Разложение ГПТБ проводили в токе азота “0” (содержание кислорода 0.003%) в ячейке барботажного типа, которая представляет собой стеклянный сосуд с обратным холодильником, снабженный пробоотборником и капиллярной трубкой для ввода газа. В ячейку заливали раствор катализатора определенной концентрации продували в течение 10 мин азотом “0” для удаления следов кислорода. Затем ячейку погружали в термостат, вводили необходимое количество раствора (10–12 мл) гидропероксида определенной базовой концентрации и отбирали нулеваю пробу. Далее отбирали пробы (0.5 мл) через необходимые промежутки времени. Концентрацию (С) ГПТБ определяли йодометрическим методом. Электронные спектры поглощения исследуемых

**Таблица 1.** Начальные скорости разложения пероксида в различных каталитических системах

Каталитическая система	$W_0 \times 10^6$ , моль/(л с)
СТАВ	7.2
Ni(ON) <sub>2</sub>	6.1
Ni(ON) <sub>2</sub> + СТАВ	128
Ni(OO) <sub>2</sub>	6.1
Ni(OO) <sub>2</sub> + СТАВ	22

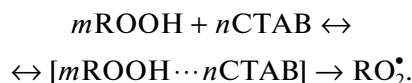
хелатов отдельно и в присутствии ROOH и СТАВ записывали на спектрофотометре Specord UV-VIS при комнатной температуре в кварцевой кювете толщиной 1 см. Коэффициенты экстинкции ( $\epsilon$ ) исследуемых комплексных соединений никеля определяли согласно закону Бугера–Ламберта–Бера по формуле  $D = \epsilon Cl$ , где  $D$  – оптическая плотность,  $l$  – толщина кюветы.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### Кинетика катализированного разложения ГПТБ

На рис. 1 представлены кинетические кривые термического распада ГПТБ в хлорбензоле при 60°С и в присутствии Ni(ON)<sub>2</sub> или Ni(OO)<sub>2</sub>, только СТАВ и с добавками катализаторов. Из рисунка видно, что термолиз ГПТБ происходит с небольшой скоростью ( $W_1 = 1.4 \times 10^{-6}$  моль/(л с)). Начальные скорости разложения пероксида с добавками комплексов никеля, СТАВ и их сочетаний представлены в табл. 1, из которой следует, что и СТАВ, и комплексные соединения Ni(II) ускоряют разложение ГПТБ.

Известно, что каталитическое действие катионных ПАВ, к которым относится СТАВ, заключается в ускоренном распаде гидропероксидов в мицеллярных микроагрегатах, образованных этими компонентами, с выходом в объем органического растворителя пероксильных радикалов RO<sub>2</sub><sup>•</sup> [3]:

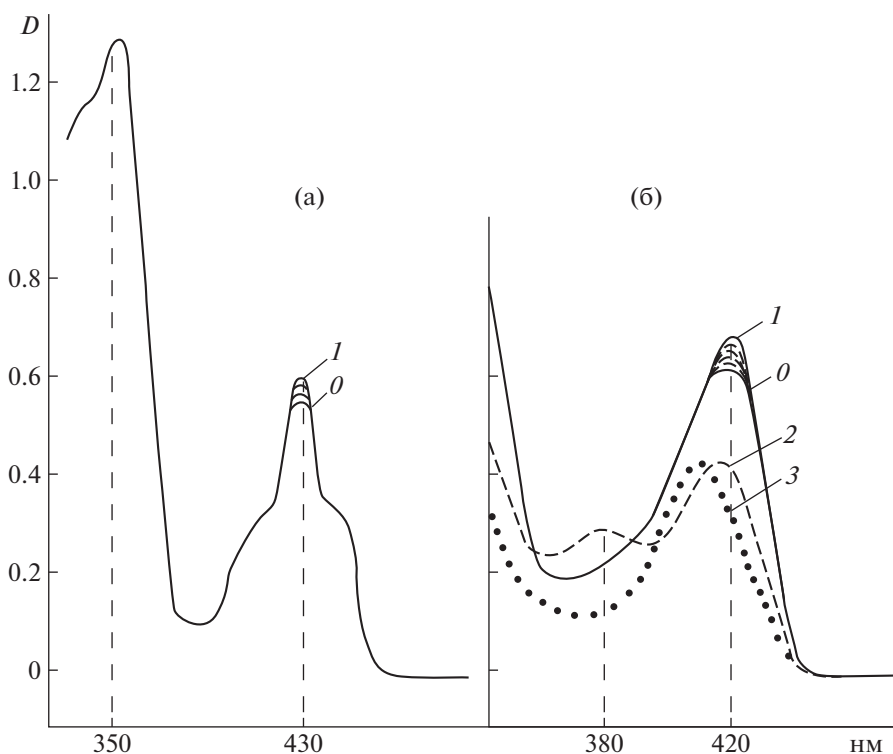


Энергия активации термолиза различных гидропероксидов варьируется в пределах 90–120 кДж/моль [4], каталитическое действие катионных ПАВ уменьшает эту величину до 40–60 кДж/моль [5].

Как видно из сравнения начальных скоростей распада в присутствии СТАВ и Ni(ON)<sub>2</sub> или Ni(OO)<sub>2</sub>, их каталитическая активность примерно одинакова. Отличительной особенностью каталитического распада ГПТБ при одновременном присутствии хелатов никеля и СТАВ (рис. 1, кривые 5, 6) является расходование гидропероксида с высокими начальными скоростями. Суммарная скорость распада ( $W_{\Sigma}$ ) в случае присутствия в реакции обоих соединений превышает сумму скоростей в опытах, где компоненты присутствуют по отдельности ( $W_{\text{Ni}}$  и  $W_{\text{СТАВ}}$ ):

$$\beta = W_{\Sigma} / (W_{\text{Ni}} + W_{\text{СТАВ}}) > 1.$$

Из анализа экспериментальных данных (рис. 1) следует, что двухкомпонентная система [Ni(II) + СТАВ] является эффективной каталитической композицией в реакции разложения ГПТБ. Наибольшая каталитическая активность наблюдается в случае Ni(ON)<sub>2</sub>.



**Рис. 2.** Электронные спектры поглощения  $\text{Ni}(\text{ON})_{2\text{исх}}$  – 0 (а),  $\text{Ni}(\text{OO})_{2\text{исх}}$  – 0 (б); то же в присутствии ГПТБ (1),  $\text{Ni}(\text{OO})_{2\text{мод}}$  (2) и  $\text{Ni}(\text{OO})_{2\text{мод}}$  + СТАВ (3);  $[\text{Ni}(\text{ON})_{2\text{исх}}] = 1.12 \times 10^{-4}$  М,  $[\text{Ni}(\text{OO})_{2\text{исх}}] = 9 \times 10^{-5}$  М,  $[\text{СТАВ}] = 10^{-2}$  М,  $[\text{ГПТБ}] = 10^{-1}$  М, хлорбензол, комнатная температура.

Можно предположить несколько механизмов каталитической активности двухкомпонентной системы  $[\text{Ni}(\text{II})\text{--}\text{СТАВ}]$ : 1) активация в среде интермедиатов реакционной смеси отдельно каждого из компонентов независимо друг от друга, 2) активация одного из компонентов в большей степени, чем другого и 3) в результате непосредственного взаимодействия между компонентами в реакционной среде образуется новая каталитическая частица, обладающая своими физико-химическими характеристиками и соответственно своей каталитической активностью [6]. Образование такой эффективной каталитической частицы наблюдалось в случае хелатов меди и цетилтриметиламмоний бромид в реакции распада ГПТБ [7].

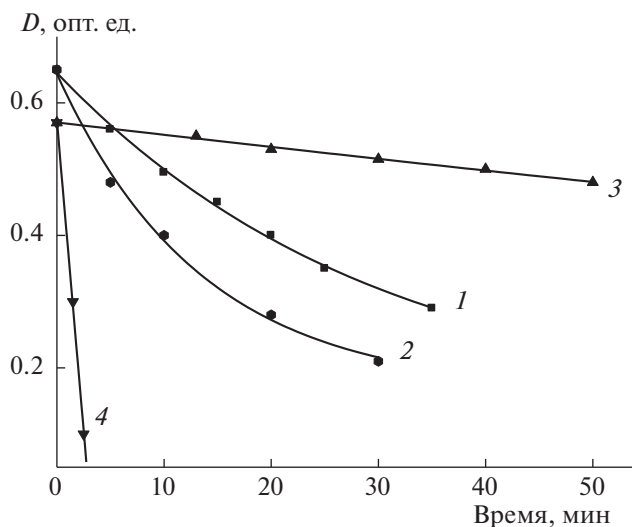
Для понимания каталитического эффекта бинарной системы  $\text{Ni}(\text{II}) + \text{СТАВ}$  представлялось целесообразным исследовать электронные спектры поглощения исходных хелатов  $\text{Ni}(\text{II})_{\text{исх}}$  и соответствующих им лигандов с добавками ГПТБ и цетилтриметиламмоний бромид отдельно и при их совместном присутствии.

Исходные хелаты  $\text{Ni}(\text{ON})_{2\text{исх}}$  и  $\text{Ni}(\text{OO})_{2\text{исх}}$  представляют собой координационно ненасыщенные внутримолекулные соединения с основанием Шиффа, принадлежащего к классу азоме-

тиновых красителей, и альдегида в качестве лигандов (см. структурные формулы), и имеют электронные полосы поглощения в видимой части спектра, обусловленные переходом металл–лиганд. Согласно [8], они относятся к поглощению хелатного узла (ПЗ) при  $\lambda_{\text{max}} = 350$  нм и внутримолекулярному переносу заряда (ВМПЗ) при  $\lambda_{\text{max}} = 430$  нм для  $\text{Ni}(\text{ON})_{2\text{исх}}$  ( $\epsilon = 4.28 \times 10^3$  л моль $^{-1}$  см $^{-1}$ ) и  $\lambda_{\text{max}} = 420$  нм для  $\text{Ni}(\text{OO})_{2\text{исх}}$  ( $\epsilon = 6.0 \times 10^3$  л моль $^{-1}$  см $^{-1}$ ) (рис. 2а, 2б, спектры 0).

Исходная форма катализатора претерпевает в процессе реакции дальнейшие превращения с образованием модифицированных каталитических частиц, обладающих различной активностью вплоть до полной дезактивации.

При добавлении ГПТБ (реакция в кювете спектрофотометра при комнатной температуре) наблюдается медленное увеличение поглощения для обоих хелатов (рис. 2, спектры 1) в течение нескольких минут до максимального значения, определяемого концентрацией  $\text{ROOH}$ . Кинетика спектральных изменений свидетельствует о непосредственном взаимодействии хелата никеля с продуктами распада пероксида (свободными радикалами). Скорость распада ГПТБ при комнатной настолько мала, что невозможно анализиро-



**Рис. 3.** Кинетические кривые изменения оптической плотности в присутствии ГПТБ: 1 –  $\text{Ni}(\text{ON})_{2\text{исх}}$ , 2 – с добавкой СТАВ; 3 –  $\text{L}(\text{ON})$ , 4 – с добавкой СТАВ;  $[\text{Ni}(\text{ON})_{2\text{исх}}] = 1.12 \times 10^{-4}$  М,  $[\text{L}(\text{ON})] = 4.3 \times 10^{-5}$  М,  $[\text{ГПТБ}] = 10^{-1}$  М,  $[\text{СТАВ}] = 10^{-2}$  М, хлорбензол, комнатная температура.

вать его концентрацию йодометрическим методом. Большой коэффициент экстинкции и достаточный временной интервал реакции позволяют контролировать реакцию непосредственно в кювете спектрофотометра с автоматической записью оптической плотности.

Наблюдаемые спектральные изменения могут свидетельствовать об образовании комплексов:  $[\text{Ni}(\text{ON})_{2\text{исх}}, \text{Ni}(\text{OO})_{2\text{исх}} \cdots \text{ROOH}]$ . Предел в изменении интенсивности при определенном соотношении концентраций компонентов может быть обусловлен полным связыванием хелатов в комплекс с соответствующими коэффициентами экстинкции:

$$\epsilon_{\text{Ni}(\text{ON})_2 + \text{ROOH}} = 4.64 \times 10^3 \text{ л моль}^{-1} \text{ см}^{-1},$$

$$\epsilon_{\text{Ni}(\text{OO})_2 + \text{ROOH}} = 6.66 \times 10^3 \text{ л моль}^{-1} \text{ см}^{-1}.$$

Существование промежуточных комплексов соединений металлов переменной валентности с гидропероксидами доказано различными физико-химическими методами [9, 10]. Характер спектральных изменений в случае используемых хелатов  $\text{Ni}(\text{II})$  – постепенное увеличение интенсивности поглощения в присутствии ГПТБ – может свидетельствовать об относительно медленной перестройке лигандного окружения иона  $\text{Ni}(\text{II})$  при вхождении молекул гидропероксида во внутреннюю координационную сферу иона никеля (рис. 2, спектры 1). Аналогичное соединение меди  $\text{Cu}(\text{ON})_2$  образует комплекс с различными гид-

ропероксидами мгновенно, практически в момент смешивания растворов [10].

### Система $\text{Ni}(\text{ON})_2$ –ГПТБ–СТАВ

Спектральные изменения связаны с относительно медленным взаимодействием компонентов реакции при комнатной температуре в кювете спектрофотометра, когда кинетика расходования гидропероксида недоступна измерению и можно проследить только за превращением исходных форм катализатора.

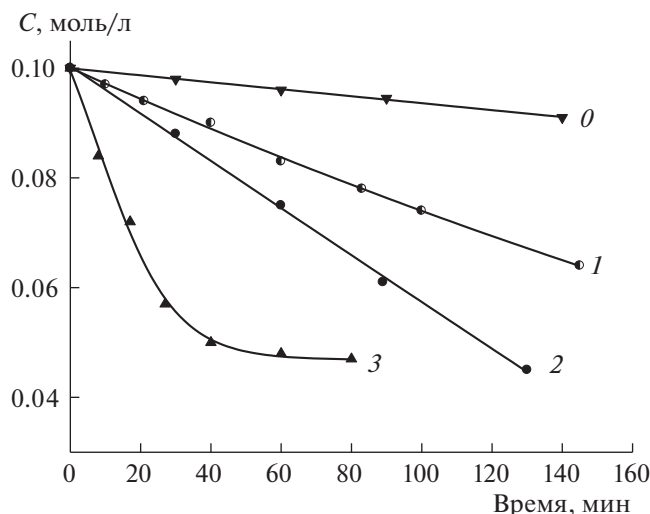
Кинетическая кривая изменения оптической плотности комплекса  $[\text{Ni}(\text{ON})_{2\text{исх}} \cdots \text{ГПТБ}]$  ( $\lambda_{\text{max}} = 430$  нм) представлена на рис. 3 (кривая 1). Наблюдается уменьшение интенсивности поглощения комплекса во времени без смещения максимума, что связано с реакцией каталитического распада ГПТБ. При этом меняется лигандное окружение иона  $\text{Ni}$  и образуется новая хромофорная система в молекуле катализатора.

Особенность используемых соединений металлов с шиффовыми основаниями в качестве лигандов (см. структурную формулу) состоит в том, что свободный  $\text{L}(\text{ON})$  обладает отчетливо выраженной активностью по отношению к пероксирадикалам [11]. Предположительно антиокислительное действие обусловлено альдиминовой группой  $-\text{CH}=\text{N}-$ . Было также установлено, что основания Шиффа служат ингибиторами при окислении полиолефинов. Предполагается, что продуктами превращения альдиминовой группы являются азиридины [12].

Исходя из изложенного выше, можно считать, что изменение лигандного окружения  $\text{Ni}(\text{ON})_{2\text{исх}}$  (образование новой хромофорной системы, поглощающей в ультрафиолетовой области спектра) происходит в результате взаимодействия альдиминовой группы лиганда с интермедиатами реакционной смеси, образовавшимися в результате каталитического распада ГПТБ.

В присутствии СТАВ наблюдается увеличение скорости спада оптической плотности комплекса  $[\text{Ni}(\text{ON})_{2\text{исх}} \cdots \text{ГПТБ}]$  в  $W_2/W_1 = (6.2 \times 10^{-4}/3.1 \times 10^{-4})$  опт. ед.  $\text{с}^{-1} = 2$  раза (ср. кривые 1, 2 рис. 3), что может свидетельствовать об увеличении каталитической активности  $\text{Ni}(\text{ON})_{2\text{исх}}$  в присутствии СТАВ.

Свободный лиганд (основание Шиффа –  $\text{L}(\text{ON})_{\text{исх}}$ ) также имеет характерный спектр поглощения при  $\lambda_{\text{max}} = 442$  нм (молярный коэффициент экстинкции  $\epsilon_{\text{L}(\text{ON})} = 1.6 \times 10^4$  л/(моль см)). В присутствии ГПТБ наблюдается постепенное уменьшение интенсивности поглощения на данной длине волны (кривая 3, рис. 3), что можно интерпретировать как непосредственное взаимо-



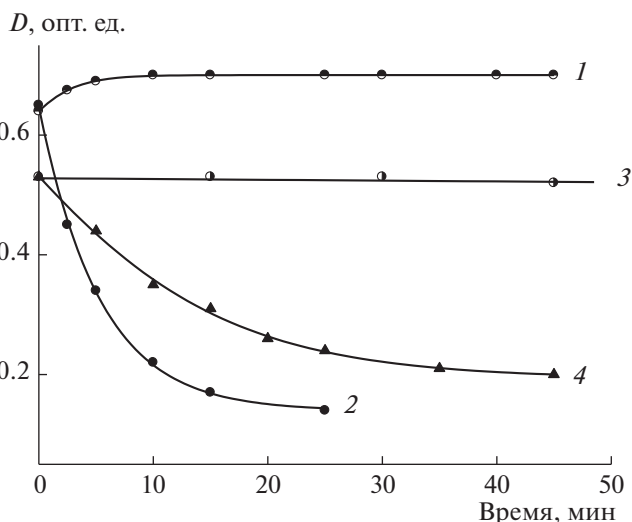
**Рис. 4.** Кинетические кривые распада ГПТБ без добавок (0) и присутствии L(ON) (1), СТАВ (2) и L(ON) + СТАВ (3);  $[L(ON)] = 2 \times 10^{-4} \text{ M}$ ,  $[СТАВ] = 10^{-2} \text{ M}$ , хлорбензол,  $60^\circ\text{C}$ .

действие  $L(ON)_{2исх}$  с продуктами распада гидропероксида.

Характерные свойства шиффовых оснований обусловлены полярностью альдиминовой группы, строение которой может быть описано резонансом структур:  $>C=N- \leftrightarrow >C^+-N^-$ . Электрофильные реагенты реагируют по атому "N", нуклеофильные — по атому "С". В присутствии СТАВ (кривая 4, рис. 3) скорость исчезновения полосы поглощения L(ON) происходит в 100 раз быстрее ( $W_4 = 3.2 \times 10^{-3} \text{ опт. ед. с}^{-1}$ ), чем в его отсутствие ( $W_3 = 3.0 \times 10^{-5} \text{ опт. ед. с}^{-1}$ ). Такой эффект увеличения скорости можно объяснить образованием активной каталитической частицы  $[L(ON)_{исх} - СТАВ]$ .

Каталитическое влияние основания Шиффа и активирующего действия СТАВ подтверждают также опыты по распаду ГПТБ при температуре  $60^\circ\text{C}$  с добавками этих компонентов отдельно и при совместном присутствии (рис. 4, кривые 0, 1, 2, 3). Из анализа кинетических кривых следует, что лиганд оказывает катализирующее действие на распад гидропероксида (кривые 1 и 4), увеличивая скорость в  $W_1/W_0 = (4.5 \times 10^{-6} \text{ моль/(л с)}) / (1.4 \times 10^{-6} \text{ моль/(л с)}) = 3.2$  раза.

Интересным оказался факт, что при одновременном присутствии L(ON) и СТАВ распад гидропероксида происходит с суммарной скоростью  $W_{\Sigma 3} = 4.5 \times 10^{-5} \text{ моль/(л с)}$  (кривая 3, рис. 4), которая превышает сумму начальных скоростей ( $W_1 + W_2$ ) в опытах, где компоненты присутствуют по отдельности:  $\beta = W_{\Sigma 3} / (W_1 + W_2) > 1$ . Из этого следует, что сочетание свободного лиганда с цетил-



**Рис. 5.** Кинетические кривые изменения оптической плотности  $Ni(OO)_{2исх}$  в присутствии ГПТБ (1), ГПТБ + СТАВ (2),  $Ni(OO)_{2мод}$  (3) и  $Ni(OO)_{мод} + СТАВ$  (4);  $[Ni(OO)_{2исх}] = 9 \times 10^{-5} \text{ M}$ ,  $[СТАВ] = 10^{-2} \text{ M}$ ,  $[ГПТБ] = 10^{-1} \text{ M}$  (1, 2) и  $4 \times 10^{-2} \text{ M}$  (3, 4), хлорбензол, комнатная температура.

триметиламмоний бромидом  $[L(ON) + СТАВ]$  является эффективной композицией в реакции разложения ГПТБ, обладающей каталитическими свойствами, отличными от свойств отдельно взятых ее составляющих. В связи с этим можно полагать, что в каталитическую активность данного хелата никеля, а также бинарной системы  $[Ni(ON)_2 + СТАВ]$  большой вклад вносит лиганд, хотя свободный лиганд и лиганд, находящийся в комплексе с металлом, могут обладать разной каталитической активностью.

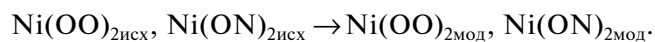
#### Система $Ni(OO)_2$ –ГПТБ–СТАВ

Для хелата  $Ni(OO)_{2исх}$  с альдегидом в качестве лиганда (см. структурную формулу) в спектрах поглощения в присутствии гидропероксида (реакция в кювете спектрофотометра при комнатной температуре) наблюдается участок медленного нарастания плотности, который связан с образованием комплекса  $[Ni(OO)_{2исх} \cdots ГПТБ]$ , без дальнейшего изменения интенсивности во времени (рис. 5, кривая 1). Несмотря на видимое отсутствие изменения поглощения комплекса  $[Ni(OO)_{2исх} \cdots ГПТБ]$  за время проведения реакции, каталитический процесс происходит и в этом случае, но очень медленно — небольшое изменение интенсивности спектра можно было наблюдать только через 24 ч после начала эксперимента.

В присутствии СТАВ спад интенсивности поглощения комплекса происходит с большей ско-

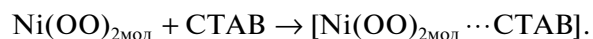
ростью  $W_2 = 1.5 \times 10^{-3}$  опт. ед.  $\text{с}^{-1}$  – (ср. кривые 1, 2, рис. 5). Образуется эффективная каталитическая композиция с исходной формой  $[\text{Ni}(\text{OO})_{\text{исх}} + \text{СТАВ}]$ .

Как известно, в результате каталитического цикла в реакционной среде катализатор модифицируется с образованием различных частиц, обладающих своими каталитическими свойствами:



Какое количество превращений с образованием различных частиц может претерпеть исходная форма катализатора в процессе реакции вплоть до полной дезактивации представить сложно, тем более определить их каталитическую активность. Однако в случае использования хелата  $\text{Ni}(\text{OO})_2$  одну из таких форм удалось идентифицировать спектрофотометрически. При разложении ГПТБ (рис. 1, кривая 3) наблюдалось обесцвечивание раствора, свидетельствующее о модификации катализатора и о поглощении превращенных форм в другой части спектра, предположительно, в УФ-области, где в реакционной среде (растворитель – хлорбензол) анализировать катализатор практически невозможно. На глубине превращения гидропероксида  $\approx 60\%$  (концентрации  $4 \times 10^{-2}$  моль/л) раствор приобретает снова желтое окрашивание –  $\text{Ni}(\text{OO})_{2\text{мод}}$ . Опыт остановлен, реакционная смесь охлаждена до комнатной температуры и помещена в кювету спектрофотометра. Спектр модифицированного  $\text{Ni}(\text{OO})_{2\text{мод}}$ , отличный от исходного, представлен на рис. 2б (спектр 2). Наблюдается новый максимум поглощения при  $\lambda_{\text{max}} = 380$  нм, а также уменьшение экстинкции по сравнению с исходным значением при  $\lambda_{\text{max}} = 420$  нм без дальнейших изменений поглощения в течение длительного времени, что свидетельствует об отсутствии каталитического распада гидропероксида с модифицированной формой никеля при комнатной температуре (рис. 5, кривая 3).

Добавка СТАВ в реакционную смесь приводит к изменению спектра  $\text{Ni}(\text{OO})_{2\text{мод}}$  (исчезает максимум поглощения при 380 нм, и наблюдается гипсохромный сдвиг полосы 420 нм, рис. 2, спектр 3). Такие спектральные изменения могут свидетельствовать о непосредственном взаимодействии компонентов с образованием новой частицы (комплекса):



Интенсивность поглощения модифицированной формы  $\text{Ni}(\text{OO})_{2\text{мод}}$  при добавке СТАВ уменьшается во времени даже при комнатной температуре (рис. 5, кривая 4), что свидетельствует о распаде ГПТБ с вновь образовавшейся каталитически активной частицей, обладающей своими физико-химическими свойствами. Можно с большой долей вероятности предположить, что образование подобного рода каталитически активных частиц в бинарных системах хелатов Ni(II) и СТАВ происходит со всеми формами катализатора, возникающими в процессе каталитического цикла. Цетилтриметиламмоний бромид можно рассматривать как активирующую добавку, усиливающую каталитические свойства хелатов никеля.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (0082-2018-0006, № АААА-А18-118020890097-1).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матиенко Л.И., Мосолова Л.А., Заиков Г.Е. // Успехи химии. 2009. Т. 78 (3). С. 227.
2. Максимова Т.В., Сирота Т.В., Коверзанова Е.В. и др. // Нефтехимия. Т. 42. № 1. С. 50.
3. Касаикина О.Т., Потапова Н.В., Круговов Д.А., Писаренко Л.М. // Кинетика и катализ. 2017. Т. 58. № 5. С. 567.
4. Frankel E.N. Lipid Oxidation – Second Edition. Scotland: The Oily Press, 2005.
5. Касаикина О.Т., Карташева З.С., Писаренко Л.М. // Журн. общ. химии. 2008. Т. 78. № 8 С. 1298.
6. Швец В.Ф. // Введение в химию каталитических реакций. Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 1996.
7. Смурова Л.А., Карташева З.С. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 75. С. 88.
8. Литвинов В.П., Гольдфарб Я.Л., Остапенко Э.Г. // Изв. АН СССР. Сер. хим. 1974. № 10. С. 2279.
9. Булгакова Г.М., Шупик А.Н., Скибида И.П. и др. // Докл. АН СССР. 1971. Т. 199. № 1. С. 376.
10. Гагарина А.Б., Смурова Л.А. // Кинетика и катализ. 1980. Т. 21. № 2. С. 371.
11. Смурова Л.А., Гагарина А.Б. // Изв. АН СССР. Сер.хим. 1985. № 1. С. 40.
12. Постников Л.М., Зарубин Н.Г., Вичутинская Е.В. и др. // Там же. 1968. С. 260.