

УДК 544.522;544.431.2;547.442

## ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ РАСТВОРИТЕЛЯ НА КИНЕТИКУ ФОТОВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗАМЕЩЕННЫХ БЕНЗОХИНОНОВ

© 2016 г. М. П. Шурыгина, С. А. Чесноков, Г. А. Абакумов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева Российской академии наук, 603950, Нижний Новгород, ул. Троицкая, 49

E-mail: shurygina\_mp@mail.ru, sch@iomc.ras.ru

Поступила в редакцию 10.07.2015 г.

В окончательном виде 25.08.2015 г.

Исследовано влияние природы растворителя на кинетику реакции фотовосстановления замещенных бензохинонов в присутствии доноров водорода. Установлено, что с увеличением полярности растворителя наблюдаемая константа скорости фотовосстановления ( $k_H$ ) хинонов уменьшается. Для пары 3,6-ди-*мет*-бутилбензохинон-1,2-*N,N*-диметиланилин зависимость  $\ln k_H$  от разности обратных величин оптической и статической диэлектрических проницаемостей ( $1/\epsilon_\infty - 1/\epsilon_0$ ) растворителя является ступенчатой с точкой “излома” соответствующей  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ . Тот же характер имеет зависимость  $\ln k_H = f(1/\epsilon_\infty - 1/\epsilon_0)$  для пары *n*-хлоранил–мезитилен. При изучении кинетики фотовосстановления серии из 7 *о*-бензохинонов в присутствии *n*-производных *N,N*-диметиланилина в  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  установлено, что зависимость  $k_H$  от свободной энергии переноса электрона ( $\Delta G_e$ ) является экстремальной с максимумом для пары 3,6-ди-*мет*-бутилбензохинон-1,2-*N,N*-диметиланилин при  $\Delta G_e = 0.11$  эВ.

**Ключевые слова:** *о*-бензохиноны, *n*-хлоранил, *N,N*-диметиланилины, мезитилен, диэлектрические характеристики растворителя, фотоперенос водорода, свободная энергия переноса электрона.

**DOI:** 10.7868/S0023119316030141

Замещенные *о*-бензохиноны в комбинации с *H*-донорными соединениями входят в состав ряда систем, фотоиницирующих радикальную полимеризацию [1, 2]. В основе их работы лежит реакция фотовосстановления хинонов, в ходе которой фотовозбужденная молекула хинона *Q* отрывает атом водорода от молекулы донора (*DH*) с образованием радикалов семихинона  $\text{QH}^\cdot$  и  $\text{D}^\cdot$ . Последний может инициировать радикальные процессы [3, 4]. (По аналогичному механизму происходит инициирование фотополимеризации другими карбонилсодержащими соединениями: бензофенонами, флуоренонами, тиоксантонами, камфорхиноном [5–8].) Введение органических растворителей в фотополимеризующиеся композиции на основе *о*-хиноновых фотоинициаторов позволяет получать пористые полимерные монолиты [9], модулировать светом градиентные по показателю преломления структуры [10], регулировать вязкость полимеризующейся среды. При этом природа и концентрация растворителя влияют и на процесс формирования полимера, и на кинетику фотогенерации инициирующих радикалов, которая определяется кинетикой фотовосстановления *о*-бензохинонов. Необходимость прогнозирования действия растворителя на каждый из процессов и, в частности, на фотоиницирование полимеризации предопределяет ак-

туальность исследования зависимости кинетики фотовосстановления *о*-бензохинонов от природы растворителя. Данная работа посвящена изучению влияния диэлектрических характеристик реакционной среды на кинетику фотовосстановления пространственно затрудненных *о*-бензохинонов. Для сравнения исследовалась также кинетика фотовосстановления *n*-бензохинона (*n*-хлоранила).

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Электронные спектры поглощения измерялись на спектрофотометрах “Specord M-40” и СФ-56. В качестве источника света использовалась лампа КГМ-24-150 с фокусирующим устройством. При изучении кинетики фотовосстановления хинонов в случае *о*-бензохинонов в присутствии *n*-замещенных *N,N*-диметиланилинов из светового потока лампы с помощью светофильтра ЖС-16 выделялось излучение с  $\lambda \geq 500$  нм, а в случае пары *n*-хлоранил–мезитилен использовался светофильтр СС-4 для выделения излучения с  $300 \text{ нм} < \lambda < 420 \text{ нм}$ . Мольное соотношение реагентов: хинон – *H*-донор составляло 1 : 50. Органические растворы реагентов деаэрировали, насыщали  $\text{Ag}$ , заливали в спектрофотометрическую кювету и регистрировали динамику измене-

ния спектров поглощения хинонов при облучении. Текущие концентрации хинонов фиксировались по изменению интенсивности полосы поглощения хинона, соответствующей  $S(\pi \rightarrow \pi^*)$  электронному переходу. В условиях эксперимента на начальной стадии реакции до степени превращения хинона  $\approx 30\%$  фотовосстановление подчиняется кинетическому уравнению реакции первого порядка. Наблюдаемая константа скорости фотовосстановления хинона определялась графически по тангенсу угла наклона прямолинейного участка зависимости  $\ln([A_0]/[A_t]) - \tau$ .

*o*-Бензохиноны синтезировали по описанным ранее методикам [11–14]. 2,3,5,6-Тетра-хлор-1,4-бензохинон (*n*-хлоранил) очищали перекристаллизацией из гексана. *N,N*-Диметиланилины (*N,N*-диметиланилин (“Aldrich”), *N,N*-диметил-*n*-толуидин (“Aldrich”), 4-(*N,N*-диметиламино)бензальдегид (“Fluka”) и *N,N*-диметил-*n*-метоксианилин, синтезированный по методике [15]), мезитилен и растворители очищали по стандартным методикам [16].

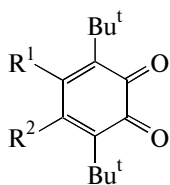
#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ.

В качестве фотоакцепторов исследовались: 3,6-ди-*трет*-бутил-4-нитро-1,2-бензохинон (**1a**), 3,6-ди-*трет*-бутил-4,5-ди-фтор-1,2-бензохинон (**1b**), 3,6-ди-*трет*-бутил-4-фтор-1,2-бензохинон (**1c**), 3,6-ди-*трет*-бутил-4-хлор-1,2-бензохинон (**1d**), 3,6-ди-*трет*-бутил-1,2-бензохинон (**1e**),

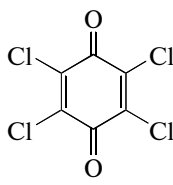
**Таблица 1.** Наблюдаемые константы скорости фотовосстановления  $k_H$  3,6-ди-*трет*-бутил-1,2-бензохинона (**1e**) в присутствии *N,N*-диметиланилина (**3c**) и *n*-хлоранила (**2**) в присутствии мезитилена (**4**) в различных растворителях

Растворитель	$\varepsilon$	1e–3c	2–4
		$k_H \times 10^3 \text{ (с}^{-1}\text{)}$	$k_H \times 10^4 \text{ (с}^{-1}\text{)}$
CCl <sub>4</sub>	2.23	—	3.20
PhH	2.28	5.16	—
PhCH <sub>3</sub>	2.38	5.20	—
Et <sub>2</sub> O	4.34	3.70	—
CHCl <sub>3</sub>	4.70	4.53	1.48
PhCl	5.62	4.45	—
THF	7.32	4.28	—
CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	8.90	4.61	0.12
CH <sub>2</sub> ClCH <sub>2</sub> Cl	10.4	—	1.45
CH <sub>3</sub> CN	36.2	1.76	—
DMF	36.7	2.27	—
DMSO	49.0	1.43	0.16

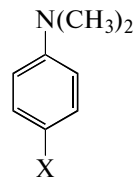
3,6-ди-*трет*-бутил-4-метил-1,2-бензохинон (**1f**), 3,6-ди-*трет*-бутил-4-*n*-пропил-бензохинон-1,2 (**1g**) и 2,3,5,6-тетра-хлор-1,4-бензохинон (*n*-хлоранил) (**2**). В качестве доноров водорода были взяты *n*-замещенные *N,N*-диметиланилины (**3**) и мезитилен (**4**).



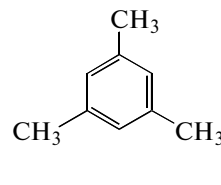
(1)



(2)



(3)



(4)

$R^1 = \text{H}$ ,  $R^2 = \text{NO}_2$  (**1a**);  $R^1 = \text{F}$  (**1b**);  $R^1 = \text{H}$ ,  $R^2 = \text{F}$  (**1c**); Cl (**1d**); H (**1e**); CH<sub>3</sub> (**1f**); Pr<sup>n</sup> (**1g**).

X = CH<sub>3</sub>O (**3a**); CH<sub>3</sub> (**3b**); H (**3c**); C(O)H (**3d**).

Влияние природы растворителя на константу скорости фотовосстановления ( $k_H$ ) исследовалось на примере двух пар реагентов: 3,6-ди-*трет*-бутил-1,2-бензохинон (**1e**)—*N,N*-диметиланилин (**3c**) и *n*-хлоранил (**2**)—мезитилен (**4**). Полученные результаты приведены в Таблице 1. Ограниченность набора растворителей для пары **2–4** вызвана тем, что такие растворители, как бензол, толуол, диэтиловый эфир, хлорбензол, ТГФ сами выступают в роли H-донора в реакции фотовосстановления *n*-хлоранила.

Как следует из данных приведенных в Таблице 1, с увеличением полярности растворителей величина  $k_H$  выбранных бензохинонов монотонно уменьшается. При этом чувствительность  $k_H$  к полярности растворителя значительно выше у пары *n*-хлоранил—мезитилен: при переходе от CCl<sub>4</sub> к DMSO величина  $k_H$  уменьшается в 12 раз. В то же время величина  $k_H$  *o*-хинона **1e** в присутствии **3c** при переходе от бензола к DMSO уменьшается только в 3 раза. Схожие результаты были получены ранее при исследовании влияния природы

растворителя на скорость фотовосстановления 3,5-ди-*трет*-бутил-1,2-бензохинона в присутствии *n*-бром-*N,N*-диметиланилина [17].

Реакция фотовосстановления карбонилсодержащих соединений и, в частности, *о*- и *n*-бензохинонов хорошо известна [18], однако в основном кинетические исследования посвящены изучению элементарных стадий реакции — образование комплекса столкновения [19], перенос электрона [20], перенос протона [21] — и влиянию на кинетику этих процессов природы реагентов и растворителя [19, 22, 23]. Рассмотрим, как соотносятся полученные экспериментальные данные с зависимостью  $k_H$  от природы растворителя, прогнозируемой в рамках модели фотопереноса водорода при фотовосстановлении карбонилсодержащих соединений, предложенной в [24–26]. Суть модели состоит в следующем. Процесс фотопереноса водорода включает последовательные стадии образования комплекса столкновения (КС), переноса электрона и образования ион-радикальной пары (ИРП), переноса протона и образования радикальной пары (РП). Каждая пара реагентов (А–ДН) характеризуется энергиями КС, ИРП и РП. В узкой серии однотипных реагентов (когда А или ДН = const) при переходе от одной пары реагентов к другой положение энергетического уровня ИРП изменяется относительно неизменных энергетических уровней КС и РП. Отсюда, в зависимости от *red/ox* характеристик А и ДН, энергия активации всего процесса равна либо энергии активации стадии переноса электрона, либо энергии активации стадии переноса протона. В соответствии с природой скорости лимитирующей стадии,  $k_H$  приравнивается константе скорости переноса электрона  $k_e$  или протона  $k_{H^+}$ . Природа скорости определяющей стадии процесса изменяется при равенстве энергий активации переноса электрона и протона. Зависимость  $k_H$  от свободной энергии переноса электрона ( $\Delta G_e$ ) является экстремальной, что связано с изменением положения энергетического уровня промежуточного состояния системы (ИРП) относительно фиксированных энергетических уровней начального и конечного состояний системы (КС и РП). Кривая  $k_H = f(\Delta G_e)$  включает в себя две ветви: правая ветвь определяется зависимостью константы скорости переноса электрона  $k_e$  от  $\Delta G_e$ ; левая ветвь кривой  $k_H = f(\Delta G_e)$  определяется зависимостью константы скорости переноса протона  $k_{H^+}$  от  $\Delta G_e$ . Положение максимума функции  $k_H = f(\Delta G_e)$  на шкале  $\Delta G_e$  определяется разностью  $\Delta$  энергий конечного состояния системы (РП) и исходного (КС). Выражение для  $k_H$  записывается в виде функции  $\Delta G_e$ , энергии переноса атома водорода  $\Delta$  и энергии реорганизации  $\lambda$  (1):

$$k_H = k_0 \exp\left(-(\lambda + |\Delta G_e - \Delta|)^2 / 4\lambda RT\right). \quad (1)$$

Из уравнения (1) следует, что с ростом  $\lambda$  величина  $k_H$  должна уменьшаться. При  $\Delta G_e \rightarrow \Delta$  уравнение (1) упрощается до уравнения (2), в соответствии с которым величина  $k_H$  является функцией только  $\lambda$ :

$$\ln k_{H(\Delta G_e \rightarrow 0)} = A - \lambda / 4RT. \quad (2)$$

Энергия реорганизации при переносе электрона величина аддитивная и состоит из двух частей  $\lambda_{in}$  и  $\lambda_{out}$ . Первая относится к внутренним колебаниям двух реагентов (“внутрисферное” взаимодействие), вторая к переполаризации растворителя, вызывающей перенос электрона (“внешнесферный” вклад). В пределах одной пары реагентов величина  $\lambda_{in}$  должна оставаться постоянной и не зависеть от растворителя. Энергия, необходимая для реорганизации сольватной оболочки вне координационной сферы реагентов  $\lambda_{out}$ , связана с изменением атомной и ориентационной поляризации среды и задается уравнением (3):

$$\lambda_{out} = e^2 (1/\epsilon_\infty - 1/\epsilon_0) (1/2a_A + 1/2a_{DH} - 1/d), \quad (3)$$

где:  $e$  — заряд электрона;  $\epsilon_\infty$  — оптическая (высокочастотная) диэлектрическая проницаемость равная квадрату коэффициента преломления света в среде  $n_D^2$ ;  $\epsilon_0$  — статическая диэлектрическая проницаемость (диэлектрическая проницаемость в постоянном поле);  $a_A$  и  $a_{DH}$  — радиусы акцептора и донора соответственно;  $d$  — расстояние между центрами в комплексе в момент столкновения при переносе электрона. Из (3) следует, что величина  $\lambda_{out}$  должна увеличиваться с ростом полярности растворителя. Чтобы определить зависимость  $k_{H(\Delta G_e \rightarrow 0)}$  от диэлектрических параметров растворителя подставим выражение (3) в (2). Получим уравнения (4) и (5), которые задают  $\ln k_{H(\Delta G_e \rightarrow 0)}$  как линейную функцию  $(1/\epsilon_\infty - 1/\epsilon_0)$  при значениях  $\Delta G_e$  близких к  $\Delta$ :

$$\ln k_{H(\Delta G_e \rightarrow 0)} = A - \lambda_{in} / 4RT - e^2 (1/\epsilon_\infty - 1/\epsilon_0) \times (1/2a_A + 1/2a_{DH} - 1/d) / 4RT \quad (4)$$

$$\text{или } \ln k_{H(\Delta G_e \rightarrow 0)} = A - B (1/\epsilon_\infty - 1/\epsilon_0). \quad (5)$$

Из уравнения (5) следует, что для одной и той же пары реагентов, для которой  $\Delta G_e \rightarrow \Delta$  уменьшение величины  $\ln k_{H(\Delta G_e \rightarrow 0)}$  должно быть прямо пропорционально увеличению  $(1/\epsilon_\infty - 1/\epsilon_0)$ . В соответствии с [26] расчетное значение  $\Delta$  для исследуемой системы 3,6-ди-*трет*-бутилбензохинон — *N,N*-диметиланилин равно +0.12 эВ. Для пары реагентов **1e–3c** величина  $\Delta G_e$  равна +0.11 эВ. Экспериментальные зависимости  $\ln k_H = f(1/\epsilon_\infty - 1/\epsilon_0)$  для **1e–3c** приведены на рис. 1. Для пары **1e–3c** (рис. 1, зависимость I) в интервале значений  $(1/\epsilon_\infty - 1/\epsilon_0)$

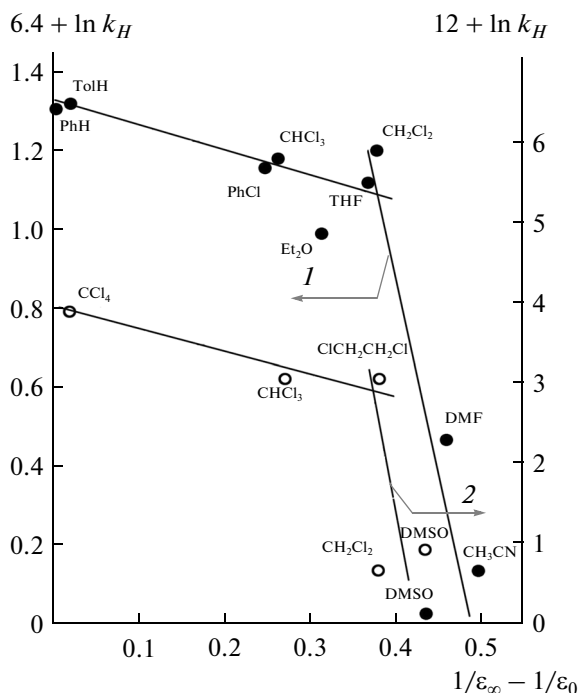


Рис. 1. Влияние диэлектрических характеристик среды на наблюдаемую константу скорости фотовосстановления: 3,6-ди-*трет*-бутил-1,2-бензохинона (**1e**) в присутствии *N,N*-диметиланилина (**3e**) (зависимость 1) и *n*-хлоранила (**2**) в присутствии мезитилена (**4**) (зависимость 2) (298 K).

от 0.005 (бензол) до 0.381 (дихлорметан) величина  $\ln k_H$  уменьшается прямо пропорционально  $(1/\epsilon_\infty - 1/\epsilon_0)$ . При  $(1/\epsilon_\infty - 1/\epsilon_0) > 0.38$  (ацетонитрил, DMF, DMSO) происходит резкое падение значений  $\ln k_H$ . Аналогичный характер носит зависимость и для пары *n*-хлоранил–мезитилен (рис. 1, зависимость 2).

Для определения причины нарушения линейности в экспериментальной зависимости  $\ln k_H = f(1/\epsilon_\infty - 1/\epsilon_0)$  необходимо сравнить кривые  $k_H = f(\Delta G_e)$  системы *o*-бензохиноны–*n*-замещенные *N,N*-диметиланилины в трех областях функции  $\ln k_H = f(1/\epsilon_\infty - 1/\epsilon_0)$ , а именно, в точке “излома” при  $(1/\epsilon_\infty - 1/\epsilon_0) \approx 0.38$  и по обе стороны от нее. Зависимости  $k_H = f(\Delta G_e)$  в толуоле и ацетонитриле, для которых параметр  $(1/\epsilon_\infty - 1/\epsilon_0)$  равен 0.02 и 0.49 соответственно были получены нами ранее [27]. Результаты исследования кинетики фотовосстановления *o*-бензохинонов в присутствии **3a–d** в дихлорметане приведены в таблице 2. Величины потенциалов восстановления *o*-бензохинонов взяты из [28]. Расчет величины  $\Delta G_e$  для каждой пары реагентов проводился по уравнению (6) [29].

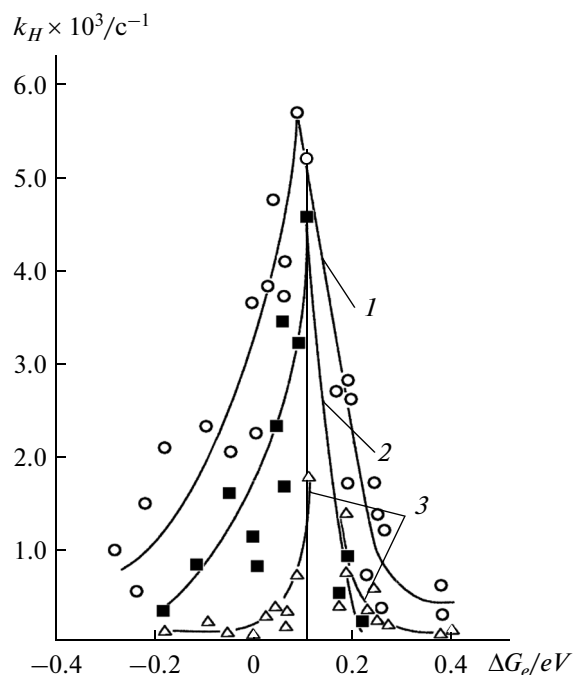


Рис. 2. Изменение наблюдаемой константы скорости фотовосстановления  $k_H$  *o*-бензохинонов (**1a–g**) в присутствии *n*-замещенных диметиланилинов (**3a–d**) от  $\Delta G_e$  в толуоле (кривая 1, по данным [27]), дихлорметане (кривая 2) и ацетонитриле (кривая 3, по данным [27]) (298 K).

$$\Delta G_e = -\Delta E_{00} - E(A^{\cdot-}/A) + E(DH/DH^{\cdot+}) - T\Delta S_e + 0.13 \text{ эВ}, \quad (6)$$

где:  $\Delta E_{00}$  – энергия триплетного  $0 \rightarrow 0$  перехода низшего возбужденного состояния карбонилсодержащего соединения;  $E(A^{\cdot-}/A)$  и  $E(DH/DH^{\cdot+})$  – окислительно-восстановительные потенциалы акцептора и донора, соответственно;  $\Delta S_e$  – изменение энтропии при образовании комплекса с переносом заряда. Для расчетов использовали значение  $T\Delta S_e \approx -0.23$  эВ [30].

На рис. 2 приведены зависимости  $k_H = f(\Delta G_e)$  *o*-бензохинонов в толуоле (1), (максимум  $k_H$  при  $\Delta G_e = 0.09$  эВ), дихлорметане (2) (максимум  $k_H$  при  $\Delta G_e = 0.11$  эВ) и ацетонитриле (3) (максимум  $k_H$  при  $\Delta G_e \sim 0.15$  эВ). Экспериментальные точки образуют три схожие по форме пикообразные кривые, располагающиеся одна внутри другой. “Интенсивность” пиков уменьшается с увеличением полярности растворителя. Характерно, что при переходе от одного растворителя к другому правая и левая ветви кривых  $k_H = f(\Delta G_e)$  ведут себя по разному. Левая ветвь последовательно сдвигается вправо при переходе от толуола к дихлорметану и далее ацетонитрилу. В противоположность этому, правая ветвь кривой ощутимо сдвигается

**Таблица 2.** Наблюдаемые константы скорости фотовосстановления  $k_H$  *o*-бензохинонов (**1a–g**) в присутствии *n*-замещенных *N,N*-диметиланилинов (**3a–d**) и соответствующие каждой паре реагентов расчетные значения  $\Delta G_e$

Хинон-амин	$\Delta G_e$ , eB	$k_H \propto 10^3$ , c <sup>-1</sup>
<b>1a–3c</b>	–0.18	0.35
<b>1e–3a</b>	–0.11	0.89
<b>1a–3d</b>	–0.05	1.60
<b>1g–3a</b>	0.01	0.82
<b>1e–3b</b>	0.05	2.30
<b>1b–3c</b>	0.06	1.69
<b>1c–3c</b>	0.06	3.46
<b>1c–3b</b>	0.09	1.10
<b>1d–3c</b>	0.09	3.17
<b>1e–3c</b>	0.11	4.61
<b>1f–3b</b>	0.15	1.17
<b>1g–3b</b>	0.17	0.48
<b>1c–3d</b>	0.19	0.73
<b>1d–3d</b>	0.22	0.28

влево только при переходе от толуола к дихлорметану, различие между правыми ветвями кривых в дихлорметане и ацетонитриле незначительно. Несимметричность сдвига ветвей кривых  $k_H = f(\Delta G_e)$  при замене растворителя может быть связана с различием скорости лимитирующей стадией реакции для пар реагентов, находящихся на разных ветвях кривой. При этом основные изменения правой ветви кривой  $k_H = f(\Delta G_e)$  (скорость определяющая стадия – перенос электрона) должны происходить при переходе от толуола к дихлорметану. Это связано с тем, что  $k_e$  зависит от  $(1/\epsilon_\infty - 1/\epsilon_0)$ , а разность величин  $(1/\epsilon_\infty - 1/\epsilon_0)$  дихлорметана и толуола в два раза больше разности  $(1/\epsilon_\infty - 1/\epsilon_0)$  ацетонитрила и дихлорметана (0.354 и 0.145 соответственно). Неравномерное “встречное движение” правой и левой ветвей кривой  $k_H = f(\Delta G_e)$  при увеличении полярности растворителя приводит к смещению максимума  $k_H$  в эндотермическую область  $\Delta G_e$ . Точка, соответствующая  $k_H$  пары **1e–3c** ( $\Delta G_e = 0.11$  эВ) в толуоле лежит на правой ветви кривой  $k_H = f(\Delta G_e)$ ; в дихлорметане она находится на максимуме зависимости, то есть, также принадлежит правой ветви кривой, а в ацетонитриле она находится уже на левой ветви кривой (для наглядности на рис. 2 эта метаморфоза проиллюстрирована вертикальной линией, соответствующей  $\Delta G_e = 0.11$  эВ). Можно полагать, что этим переходом с одной ветви кривой на другую объясняется “излом” на линейной зависимости  $\ln k_H = f(1/\epsilon_\infty - 1/\epsilon_0)$  (рис. 1). Поскольку, при  $(1/\epsilon_\infty -$

$1/\epsilon_0) > 0.38$  скорость фотовосстановления **1e** в присутствии **3c** лимитируется стадией переноса протона, а не электрона, то функция  $\ln k_H = f(1/\epsilon_\infty - 1/\epsilon_0)$  теряет свой смысл и зависимость  $k_H$  от диэлектрических характеристик среды должна быть другой. Относительно ступенчатой зависимости  $\ln k_H = f(1/\epsilon_\infty - 1/\epsilon_0)$  для реакционной пары **2–4** можно предположить, что причина ее возникновения та же, что и для пары **1e–3c**.

Обобщая выше изложенное, можно констатировать следующее. Увеличение полярности растворителя приводит к уменьшению  $k_H$  фотовосстановления *o*-бензохинонов и *n*-хлоранила. Для 3,6-ди-*трет*-бутилбензохинона-1,2 и *n*-хлоранила зависимость  $k_H$  от диэлектрической проницаемости среды носит ступенчатый характер. При значениях  $\epsilon \sim 10$  происходит скачкообразное уменьшение величины  $k_H$ , которое вероятно связано со сменой природы скорости лимитирующей стадии реакции.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-13-00137).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чесноков С.А., Черкасов В.К., Абакумов Г.А., Мамышева О.Н., Захарина М.Ю., Шушунова Н.Ю., Чет Ю.В., Куропатов В.А. // Высокомолек. соед. сер. Б. 2014. Т. 56. № 1. С. 13.
2. Чесноков С.А., Черкасов В.К., Абакумов Г.А., Мамышева О.Н., Чет Ю.В., Неводчиков В.И. // Изв. РАН. сер. Хим. 2001. С. 2258.
3. Kaur M., Srivastava A.K. // J. Macromol. Sci. C.: Polymer Reviews. 2002. V. 42. № 4. P. 481.
4. Крюков А.И., Шерстюк В.П., Дилунг. И.И. Фотоперенос электрона и его прикладные аспекты. Киев: Наукова думка. 1982. С. 239.
5. Mateo J.L., Bosch P., Catalina F., Sastre R. // J. Pol. Sci. A: Polym. Chem. 1990. V. 28. № 6. P. 1445.
6. Encinas M.V., Lissi E.A., Rufs A.M., Previtali C.M. // J. Pol. Sci. A: Polym. Chem. 1994. V. 32. P. 1649.
7. Encinas M.V., Carrido J., Lissi E.A. // J. Pol. Sci. A: Polym. Chem. 1989. V. 27. № 1. P. 139.
8. Jakubiak J., Allonas X., Fouassier J.P., Sionkowska A., Andrzejewska E., Linden L., Rabek J. F. // Polymer. 2003. V. 44. P. 5219.
9. Батенькин М.А., Конев А.Н., Менсов С.Н., Чесноков С.А. // Высокомолек. соед. сер. А. 2011. Т. 53. № 7. С. 1033.
10. Менсов С.Н., Полуштайцев Ю.В. // Квантовая электроника. 2012. Т. 42. № 6. С. 545
11. Абакумов Г.А., Черкасов В.К., Абакумова Л.Г., Неводчиков В.И. // Изв. АН СССР Сер. хим. 1990. С. 1098.
12. Abakumov G.A., Cherkasov V.K., Abakumova L.G., Nevodchikov V.I., Druzhkov N.O., Makarenko N.P., Kur-sky Ju.A. // J. Organometal. Chem. 1995. V. 491. P. 127.
13. Абакумов Г.А., Черкасов В.К., Абакумова Л.Г., Дружков Н.О., Неводчиков В.И., Курский Ю.А., Ма-

- каренко Н.П. // Металлоорганическая химия. 1991. Т. 4. С. 925.
14. Гарнов В.А., Неводчиков В.И., Абакумова Л.Г., Абакумов Г.А., Черкасов В.К. // Изв АН СССР Сер. хим. 1987. С. 1864.
15. Вейганд-Хильгетаг. Методы эксперимента в органической химии. Химия, Москва. 1968. С. 464.
16. Гордон А., Форд Р. Спутник химика. Мир, Москва. 1976. 541 с.
17. Абакумов Г.А., Чесноков С.А., Черкасов В.К., Разуваев Г.А. // Изв АН СССР Сер.хим. 1985. С. 773.
18. Дж. Бартлон, Дж. Койл. М.: Мир. 1978. 446 с.
19. Rathore R., Hubig S.M., Kochi J.K. // J. Amer. Chem. Soc. 1997. V. 119. P. 11468.
20. Hubig S.M., Kochi J.K. // J. Amer. Chem. Soc. 1999. V. 121. P. 1688.
21. Peters K.S. // Acc. Chem. Res. 2009. V.42. P. 89.
22. Левин П.П., Кокрашвили Т.А., Кузьмин В.А. // Изв. АН СССР, сер. хим. 1983. № 2. С. 284.
23. Heeb L.R., Peters K.S. // J. Phys. Chem. A. 2006. V. 110. P. 6408.
24. Чесноков С.А., Абакумов Г.А., Черкасов В.К., Шурыгина М.П. // Доклады АН. 2002. Т. 385. № 6. С. 780.
25. Шурыгина М.П., Курский Ю.А., Дружков Н.О., Чесноков С.А., Абакумов Г.А. // Химия высоких энергий. 2010. Т. 44. № 3. С. 262.
26. Чесноков С.А., Шурыгина М.П., Абакумов Г.А. // Химия Высоких энергий. 2011. Т. 45. № 4. С. 319.
27. Чесноков С.А., Черкасов В.К., Четвет Ю.В., Неводчиков В.И., Абакумов Г.А., Мамышева О.Н. // Изв. РАН Сер.хим. 2000. С. 1515.
28. Ч. Манн, К. Барнес. Электрохимические реакции в неводных системах. Москва: Химия, 1974. 479 с.
29. Knibbe H., Rehm D., Weller A. // Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 1969. V. 73. P. 839.
30. Левин П.П., Плужников П.Ф., Кузьмин В.А. // Химическая физика. 1989. Т. 8. № 6. С. 752.