

УДК 541.64:546.21

**ВЛИЯНИЕ ПОДВИЖНОСТИ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ  
НА ХИМИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ  
СИНГЛЕТНОГО КИСЛОРОДА С РАЗЛИЧНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ**

*E. V. Быстрицкая, O. H. Карпухин*

Изучено фотоокисление углеводородов с конденсированными ядрами в матрицах с разной молекулярной подвижностью (ПС, метиленхлорид, их растворы друг в друге), а также влияние на этот процесс тушителей разных классов. Показано, что в твердой полимерной матрице по сравнению с жидкой фазой наблюдается уменьшение реакционной способности и нивелировка эффективности различных веществ. Вместе с тем вещества, обладающие одинаковой эффективностью взаимодействия с  ${}^1\text{O}_2$  в жидкой фазе, могут сильно отличаться по своей активности в твердой фазе, если они взаимодействуют с ним по разным механизмам. Показано, что изменение реакционной способности, характерное для перехода от жидкой фазы к твердой, связано с уменьшением подвижности твердой матрицы.

Работа посвящена изучению влияния полимерной матрицы на фотоокисление углеводородов с конденсированными ядрами и на эффективность тушения молекулы синглетного кислорода  ${}^1\text{O}_2$  различными соединениями.

Интерес к реакциям синглетного кислорода в полимерной матрице вызван тем, что в литературе широко обсуждается его важная роль в фоторазрушении полимеров. Предполагается, что тушители  ${}^1\text{O}_2$  могут быть эффективными светостабилизаторами [1]. Между тем отсутствовали какие-либо данные о влиянии полимерной матрицы как на эффективность тушения  ${}^1\text{O}_2$  различными веществами, так и на эффективность химического взаимодействия  ${}^1\text{O}_2$ . Кроме того, изучение реакций с участием молекулы синглетного кислорода представляет интерес для выяснения механизма протекания элементарной реакции в твердой полимерной матрице. Синглетный кислород — активная частица, механизм движения которой в полимерной матрице вполне ясен. Это избавляет от необходимости рассматривать сложные и еще недостаточно изученные вопросы о механизме сближения реагирующих частиц в твердой фазе.

Для определения эффективности тушителей использовали модельную реакцию фотоокисления ароматических углеводородов — антрацена и нафтацена, в которой участвует синглетный кислород. За их расходом следили по изменению оптической плотности на длине волн 365 нм для антрацена и 475 нм для нафтацена. Спектр поглощения продукта реакции, трансаннулярной перекиси, находится в существенно более коротковолновой области и не мешает определению исходных веществ [2].

Для облучения образцов с нафтаценом использовали ртутную лампу ДРШ-250 со светофильтром ЖС-11. При этом образец поглощал практически только свет с длиной волны 435 нм. При фотоокислении антрацена применяли фотосенсибилизатор бенгальскую розу (БР), в этом случае из излучения лампы комбинацией светофильтров выделялся свет с длиной волны 546 нм. Тушители синглетного кислорода: дигидрофенилкарбамат никеля (ДБДТКNi), диметилдигидрофенилкарбамат висмута (ДМДТКBi), о-бутикс-(3,5-дигидро-4-гидроксибензил), фосфонат никеля (Иргостаб 2002) и 1,2,2,6,6-пентаметил-4-гидроксициперидин (ПМГП) — поглощают свет в более коротковолновой области и поэтому участвуют только в темновых процессах. Облучение

проводили при комнатной температуре на воздухе. При облучении образцов в тех же условиях, но в вакууме, их спектр поглощения не изменяется, т. е. возможная димеризация окисляемых углеводородов не оказывает в этих условиях влияние на процесс.

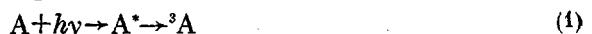
Полимерные образцы готовили из промыпленного блочного ПС со средневязкостной молекулярной массой 300 000. Для получения прозрачных пленок раствор ПС в метиленхлориде (МХ) или метилэтилкетоне (МЭК) с соответствующими добавками наносили тонким слоем на полированную плиту, нагретую до 50–60°. Образцы полимера, содержащие растворитель, готовили следующим образом. На переднюю стенку прямоугольной кварцевой кюветы помещали пленку ПС, содержащую добавки, и добавляли небольшое количество МХ. После испарения избытка МХ кювету герметически закрывали. На передней стенке кюветы при этом получался прозрачный слой полимера, содержащего растворитель. Концентрацию МХ определяли взвешиванием.

Молекулярную подвижность в образцах исследовали методом парамагнитного зонда. В качестве зонда применяли стабильный радикал 2,2,6,6-тетраметилцианилоксид. Время корреляции вращения зонда  $\tau_c$  определяли методом, описанным в [3].  $T_c$  образцов определяли дилатометрически.

**Кинетика фотоокисления в жидкой и твердой фазе. Расчет кинетических констант.** Исследование кинетики фотоокисления углеводородов с конденсированными ядрами в жидкой фазе [2] показало, что этот процесс протекает в два этапа.

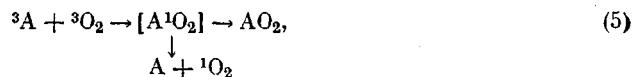
После поглощения кванта света молекула окисляемого вещества переходит, по-видимому, в триплетное состояние  $^3A$ , которое взаимодействует с обычной триплетной молекулой кислорода  $^3O_2$ , давая молекулу синглетного кислорода  $^1O_2$ . Затем молекула  $^1O_2$  взаимодействует с другой молекулой окисляемого вещества А, в результате чего образуется трансанулярная перекись  $AO_2$ .

Кинетическая схема такого процесса имеет вид



Над стрелками указаны обозначения констант скоростей соответствующих реакций.

Кроме того, в полимерной матрице существенную роль может играть реакция внутриклеточного взаимодействия окисляемого вещества с  $^1O_2$



т. е. синглетный кислород может окислять ту же молекулу углеводорода, от которой получил энергию для своего образования. Эта реакция может быть существенной потому, что в твердой фазе движения затруднены и время жизни пары  $[A^1O_2]$  внутри одной клетки значительно больше, чем в жидкости.

Анализ данной кинетической схемы приводит к следующему выражению для начальной скорости расходования окисляемого вещества:

$$W_0 = \left( \frac{d[A]/[A]_0}{dt} \right)_0 = -\alpha \left[ 1 - \gamma \left( 1 - \frac{k_r[A]_0}{k_r[A]_0 + k_d} \right) \right], \quad (6)$$

где  $\gamma$  — вероятность выхода синглетного кислорода из клетки в реакции (5),  $\alpha$  — относительная скорость образования  $^1O_2$ .

В твердом ПС процесс фотоокисления замедляется во времени быстрее, чем того требует рассмотренная выше схема. Это можно, как и в работе [4], объяснить тем, что из-за малой подвижности среды на кинетику процесса оказывает влияние кинетическая неэквивалентность молекул окисляемого вещества. В первую очередь окисляются молекулы, находящиеся в более выгодных для реакции условиях, а равновесное их распре-

деление по всем степеням свободы не успевает восстанавливаться. При этом выражение (6) для начальной скорости реакции выполняется, а входящая в него константа  $k_r$  представляет собой усреднение по исходному равновесному распределению молекул.

На рис. 1 показана зависимость относительной начальной скорости расходования нафтацена в твердом ПС от его начальной концентрации

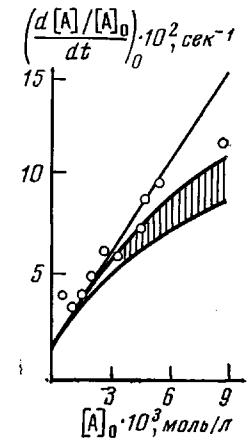


Рис. 1

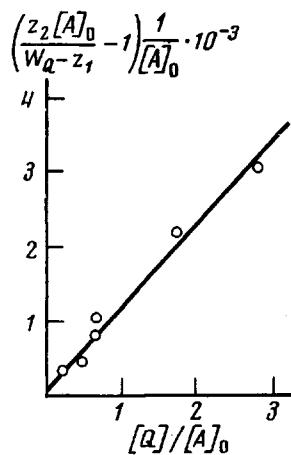


Рис. 2

Рис. 1. Зависимость относительной начальной скорости расходования нафтацена от его концентрации в ПС. Заштрихован сектор расчетных значений по уравнению (6) при значениях параметров из уравнения (10)

Рис. 2. Анаморфоза зависимости скорости фотоокисления нафтацена от концентрации ДБДТКNi в координатах уравнения (9)

$[A]_0$ . Эта зависимость представляет собой прямую, т. е. при этих концентрациях  $k_r[A]_0 \ll k_d$ . Из тангенса угла наклона этой прямой  $z_1$  и отрезка отсекаемого на оси ординат  $z_2$  можно определить параметры

$$z_1 = \alpha \gamma \frac{k_r}{k_d}, \quad z_r = \alpha(1-\gamma) \quad (7)$$

В присутствии тушителя уравнение, аналогичное (6), принимает вид

$$W_q = \left( \frac{d[A]/[A]_0}{dt} \right)_q = -\alpha \left[ 1 - \gamma \left( 1 - \frac{k_r[A]_0}{k_r[A]_0 + k_d + k_q[Q]} \right) \right] \quad (8)$$

С учетом определенных по (7) величин параметров  $z_1$  и  $z_2$  (8) можно преобразовать в уравнение прямой

$$\left( \frac{z_1[A]_0}{w_q - z_2} - 1 \right) \frac{1}{[A]_0} = \frac{k_r}{k_d} + \frac{k_q}{k_d} \frac{[Q]}{[A]_0} \quad (9)$$

На рис. 2 показано, как выполняется уравнение (9) при фотоокислении нафтацена в присутствии ДБДТКNi. Видно, что величина параметра  $k_q/k_d$  может быть определена достаточно точно, а величина  $k_r/k_d$  может быть только ограничена сверху. Нижнюю оценку отношения  $k_r/k_d$  можно сделать, если предположить, что молекула синглетного кислорода образуется после каждого акта поглощения света за вычетом квантового выхода флуоресценции  $\eta_f$

$$\eta = 1 - \eta_f$$

Тогда  $\alpha_0 = I \varepsilon (1 - \eta_f)$ ; в условиях эксперимента  $\alpha_0 = 0,28 \pm 0,03 \text{ сек}^{-1}$ .

Из рис. 1 следует, что  $\alpha_0(1-\gamma) = (1,50 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$  сек<sup>-1</sup>, следовательно,  $1-\gamma = 5,5 \pm 1,3\%$ . Из этого же рисунка  $\alpha\gamma(k_r/k_d) = 16$  л/моль·сек, т. е. нижняя граница  $k_r/k_d = 60 \pm 6$  л/моль. Верхняя граница  $k_r/k_d$  не превышает 100 л/моль (рис. 2). При этом  $\alpha\gamma = 0,16$  и соответственно  $\alpha = 0,18$ , следовательно,

$$\begin{aligned}\eta(1-\eta) &= 0,8 \pm 0,2 \\ 1-\gamma &= 7 \pm 2\% \\ k_r/k_d &= 80 \pm 25 \text{ л/моль}\end{aligned}\tag{10}$$

На рис. 1 показано, как должна искривляться прямая в соответствии с этими значениями констант. Верхняя граница заштрихованной области соответствует минимальному значению  $k_r/k_d$ , нижняя — максимальному. Видно, что экспериментальные значения в данном случае лучше соответствуют минимальному значению параметра.

Несмотря на то, что вероятность выхода синглетного кислорода из клетки в акте его образования  $\gamma$  оказалась в большинстве случаев близкой к единице, реакция в клетке оказывается существенной при малых концентрациях окисляемого вещества. Эффективность взаимодействия синглетного кислорода с нафтаценом  $k_r/k_d$  уменьшилась в твердом ПС почти в 60 раз и составила 60 л/моль. Квантовый выход образования синглетного кислорода как и в жидкой фазе, оказался близким к единице [5]. С помощью уравнения (9) были определены также эффективности тушения синглетного кислорода различными тушителями.

Справедливость рассматриваемой кинетической схемы подтверждает совпадение констант тушения  ${}^1\text{O}_2$  ДБДТКNi и Иргостабом 2002 с константами, измеренными по торможению фотоокисления антрацена, сенсибилизированного БР. В этом процессе БР является источником  ${}^1\text{O}_2$ , который затем вступает в реакции либо с тушителем, либо с окисляемым веществом. Отношение начальных скоростей процесса в отсутствие  $W_0$  и в присутствии тушителя  $W_q$  в этом случае определяется соотношением

$$\frac{W_0}{W_q} = 1 + \frac{k_q}{k_d} [Q]\tag{11}$$

Полученные результаты приведены в таблице. Там же приведены кинетические параметры, характеризующие взаимодействие  ${}^1\text{O}_2$  с рядом углеводородов, рассчитанные по начальным скоростям фотоокисления углеводородов и их смесей, приведенным в работе [4].

Из данных, приведенных в таблице, видно, что в ПС по сравнению с жидкой фазой наблюдается нивелировка и уменьшение эффективности взаимодействия  ${}^1\text{O}_2$  как с тушителями, так и с акцепторами синглетного кислорода.

Величины отношений  $k_q/k_d$  и  $k_r/k_d$  для некоторых соединений уменьшаются более чем на два порядка, а отношение максимального  $k_q/k_d$  к минимальному изменяется от 7000 раз в МХ до 50 в ПС.

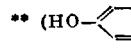
Эти изменения нельзя объяснить уменьшением времени жизни  ${}^1\text{O}_2$ , так как при переходе от МХ к ПС эффективность взаимодействия различных веществ с  ${}^1\text{O}_2$  изменяется в разное число раз — от трех почти до 500. Такие изменения эффективности могут быть связаны с уменьшением подвижности молекул в твердом полимере. Однако простой закон сложения кинетических сопротивлений в данном случае не выполняется.

Нарушение закона сложения кинетических сопротивлений, возможно, связано с наличием кинетической неэквивалентности молекул. Действительно, при взаимодействии подвижной и неподвижной частиц в неподвижной среде закон сложения кинетических сопротивлений справедлив только для частиц, находящихся в эквивалентных условиях. При наличии неэквивалентности эффективная константа скорости бимолекулярной

Влияние полимерной матрицы на реакционную способность синглетного кислорода

Вещество	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>				ПС					$\frac{k_{\text{Ж}}}{k_{\text{TB}}}$	
	$k_q/k_d \cdot 10^{-4}$	$k_r/k_d \cdot 10^{-8}$	$k_q \cdot 10^{-8}$	$k_r \cdot 10^{-8}$	$k_q/k_d \cdot 10^{-4}$	$k_r/k_d$	$1-\gamma, \%$	$\eta = 1 - \eta_f$	$k_q \cdot 10^{-8}$		
	л/моль	л/моль·сек	л/моль	л/моль	л/моль	л/моль			л/моль·сек		
β-каротин *	360 [14]	<15 [14]	260 [14]	<100 [14]	80	120±30	—	<0,01	200	30±8	1300 **** (<300)
ДБДТКNi	47	—	34	—	11	—	—	—	26	—	1300
Рубрен *	—	9,0 [1]	—	65 [1]	—	140±30	—	—	—	34±8	190
1,2,2,6,6-Пентаметил-4-гидроксипириддин	0,73	—	0,54	—	4,2	—	—	—	10	—	54
Нафтацен	—	2,5	—	18	—	(80±25)	7±2	0,8±0,2	—	20±5	90±20
ДМДТКВi	0,15	—	0,11	—	2,4	—	—	—	5,8	—	19
Иргостаб 2002 **	0,051	—	0,037	—	1,7	—	—	—	4	—	9
Антрацен *	—	0,018 ***	—	0,5 ***	—	3,7±0,9	6±1	0,08±0,02	—	9±2	5,5

\* Параметры в ПС рассчитаны по данным [4].

\*\* (HO--CH<sub>2</sub>-P(=O)(OOC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>Ni.

\*\*\* В бензole [15].

\*\*\*\* Для  $k_q$ .

реакции должна быть записана в интегральной форме

$$k_{\text{аф}} = \int \frac{k_{\text{вз}}(U) k_{\text{диф}}(U)}{k_{\text{вз}}(U) + k_{\text{диф}}(U)} \rho(U) dU, \quad (12)$$

где  $U$  – параметр, характеризующий неэквивалентность реагирующих частиц,  $\rho(U)$  – распределение вероятности встретить пару реагирующих частиц, характеризуемую параметром  $U$ ,  $k_{\text{диф}}$  и  $k_{\text{вз}}$  – константы, соответственно характеризующие скорость встречи реагирующих частиц и скорость химического взаимодействия при встрече. Видно, что в общем случае при разном виде функций  $\rho(U)$ ,  $k_{\text{вз}}(U)$  и  $k_{\text{диф}}(U)$  для  $k_{\text{аф}}$  формально может не выполняться ни закон сложения кинетических сопротивлений, ни закон Аррениуса, ни закон действующих масс, хотя на элементарном уровне эти законы остаются в силе.

Из данных таблицы видно, что даже наиболее эффективные тушители в ПС существенно различаются по активности. Следовательно, при взаимодействии с ними, за исключением  $\beta$ -каротина, тушение происходит не при каждой встрече, т. е. эффективность взаимодействия определяется не только диффузией. Этот вывод подтверждает и сопоставление полученных результатов с возможным временем жизни синглетного кислорода. Допустим, что константа тушения  ${}^1\text{O}_2$  наиболее эффективным тушителем –  $\beta$ -каротином является диффузионной. Коэффициент диффузии синглетного кислорода  $D$  примем равным  $2,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{сек}$  (коэффициент диффузии азота [6]). Радиус взаимодействия между  ${}^1\text{O}_2$  и  $\beta$ -каротином  $r_0$  примем равным 10 Å. При этих допущениях

$$k_d = \frac{4\pi D r_0}{k_q/k_d} = 2,4 \cdot 10^3 \text{ сек}^{-1} \quad (13)$$

Еще одну оценку величины  $k_d$  можно сделать по данным об эффективности взаимодействия нафтацена с синглетным кислородом. Ранее было определено, что 5% синглетного кислорода взаимодействует с той же молекулой тетрацена, с участием которой он образовался. Поэтому можно полагать, что для того чтобы синглетный кислород прореагировал с нафтаценом, им необходимо встретиться по крайней мере 20 раз, т. е. оценка  $k_d$  возможна исходя из выражения

$$k_d = \frac{(1-\gamma) 4\pi D r_0}{k_r/k_d} = 1,6 \cdot 10^4 \text{ сек}^{-1}$$

Таким образом, оценка величины  $k_d$  двумя разными способами привела к результатам, различающимся почти в 7 раз.

По-видимому, оценку величины  $k_d$  первым способом следует считать более надежной. Различие же в полученных результатах может быть связано или с тем, что радиус взаимодействия  ${}^1\text{O}_2$  в ПС в акте тушения существенно выше, чем в акте окисления, или с тем, что синглетный кислород в 7 раз лучше реагирует с той молекулой нафтацена, с участием которой он образовался. Эта химическая реакция происходит соответственно в среднем при каждой 140-й встрече.

В настоящее время нет прямых данных о времени жизни  ${}^1\text{O}_2$  в ПС. Проведенная оценка свидетельствует о том, что оно существенно больше, чем в жидкостях, втрое больше, чем в метиленхлориде ( $k_d=7,3 \cdot 10^3 \text{ сек}^{-1}$  [7]) и на порядок больше, чем в бензоле ( $k_d=3 \cdot 10^4 \text{ сек}^{-1}$  [8]).

Используя оценку величины  $k_d$ , можно рассчитать абсолютные значения констант  $k_q$  и  $k_r$ . Такой расчет (таблица) показывает, что изменение более чем на три порядка величины  $k_q$  для наиболее эффективного туш-

теля  $\beta$ -каротина при переходе от МХ к ПС примерно соответствует различию коэффициентов диффузии легких газов в твердом полимере (ПС,  $2,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{сек}$ , азот [6]) и в жидкости (гептан,  $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{сек}$ , азот [9]). Это свидетельствует о том, что в обоих случаях тушение происходит при каждой встрече  $^1\text{O}_2$  с молекулой каротина.

Из таблицы также видно, что внутри данного типа реакций взаимодействия  $^1\text{O}_2$  с различными веществами переход от МХ к ПС не нарушает корреляции эффективности взаимодействия. Более эффективные тушители  $^1\text{O}_2$  в МХ остаются ими и в ПС. Не нарушается последовательность расположения веществ и по их эффективности химического взаимодействия с синглетным кислородом. Явление нивелирования также наблюдается только в пределах одного класса реакций.

При совместном рассмотрении реакций обоих типов нивелирование наблюдается не всегда. Так, нафтацен в МХ взаимодействует с  $^1\text{O}_2$  в 1,5 раза лучше, чем ДМДТКВ<sub>i</sub>, а в ПС соединение В<sub>i</sub> реагирует с  $^1\text{O}_2$  в 3 раза лучше.

Подобные закономерности при рассмотрении реакций совершенно другого класса — радикальных реакций — наблюдались в [10].

Эффективность взаимодействия активных радикалов с валентно-насыщенными ингибиторами нивелировалась в твердой фазе, а относительная эффективность их взаимодействия со стабильными радикалами существенно возрастила. По-видимому, в данном случае мы имеем дело с общим явлением, и экстраполяция данных, полученных в жидкой фазе, на твердофазные процессы возможна в какой-то мере только в пределах одного класса реакций.

Многочисленные исследования реакций синглетного кислорода с различными веществами в жидкой фазе показывают, что константы скорости таких реакций, как правило, слабо зависят от природы растворителя. Так, для рубрена константа взаимодействия с  $^1\text{O}_2$  составляет в пиридине  $9 \cdot 10^7 \text{ л}/\text{моль}\cdot\text{сек}$  [11], в бензоле —  $3 \cdot 10^7 \text{ л}/\text{моль}\cdot\text{сек}$  [12]. Для ДБДТКН<sub>i</sub> константа тушения в сероуглероде —  $4 \cdot 10^9 \text{ л}/\text{моль}\cdot\text{сек}$  [13], в изооктане —  $7 \cdot 10^9 \text{ л}/\text{моль}\cdot\text{сек}$  [7], в МХ —  $3,5 \cdot 10^9 \text{ л}/\text{моль}\cdot\text{сек}$  [1]. В то же время в ПС, как видно из таблицы, эти константы падают более чем на два порядка. По-видимому, такое резкое уменьшение связано с изменением агрегатного состояния матрицы.

На рис. 3 представлены зависимости отношений  $k_r/k_d$  для нафтацена и  $k_q/k_d$  для ДБДТКН<sub>i</sub> от состава смеси ПС — МХ (для раствора, содержащего 50% ПС, удалось определить только нижние границы констант). Видно, что изменение параметров происходит не плавно, а по S-образной кривой. При малых концентрациях МХ величины  $k_r/k_d$  и  $k_q/k_d$  несколько растут по сравнению с чистым ПС, однако этот рост незначителен по сравнению с теми изменениями, которые происходят в диапазоне концентраций ПС от 80 до 50%. Именно в этом интервале концентраций  $T_c$  раствора, измеренная дилатометрически, близка к комнатной.

Такой характер зависимости можно объяснить, если предположить, что изменение констант взаимодействия синглетного кислорода связано с ограничением молекулярной подвижности в твердой стеклообразной матрице. На рис. 3 показана зависимость вращательной подвижности стабильного радикала — зонда от состава смеси ПС — МХ. В интервале

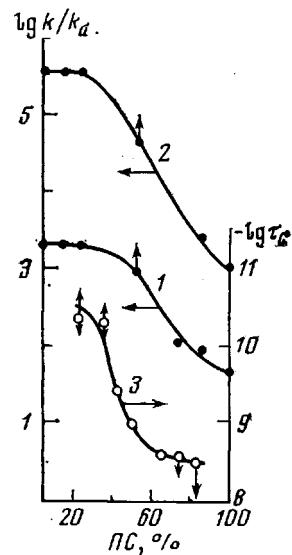


Рис. 3. Зависимость параметров  $k_r/k_d$  для нафтацена (1),  $k_q/k_d$  для ДБДТКН<sub>i</sub> (2) и времени корреляции параметра (3) от состава смеси ПС — МХ. Стрелки у экспериментальных точек характеризуют ошибку измерений

50–80% ПС молекулярная подвижность мала и, видимо, сильно влияет на величины констант. В растворах, содержащих <40% ПС, время корреляции  $\tau_c$  приближается к предельному ( $10^{-10}$ – $10^{-11}$  сек.), и, вероятно, подвижность перестает ограничивать скорость химической реакции.

Институт химической физики  
АН СССР

Поступила в редакцию  
17 XI 1975

#### ЛИТЕРАТУРА

1. D. J. Carlsson, T. Suprunchuk, D. M. Wiles, J. Polymer Sci., Polymer Letters. Ed., 11, 61, 1973.
2. B. Stevens, B. E. Algar, J. Phys. Chem., 72, 3468, 1968.
3. A. M. Вассерман, А. Л. Бучаченко, А. Л. Коеварский, М. Б. Нейман, Высокомолек. соед., A10, 1930, 1968.
4. В. М. Анисимов, О. Н. Карпухин, А. М. Маттууччи, Докл. АН СССР, 214, 828, 1974.
5. Е. В. Быстрицкая, О. Н. Карпухин, Докл. АН СССР, 221, 1100, 1975.
6. В. А. Точин, Д. Н. Сапожников, Б. Г. Никольский, Высокомолек. соед., B12, 66, 1970.
7. D. J. Carlsson, G. D. Mendenhall, T. Suprunkhuk, D. M. Wiles, J. Amer. Chem. Soc., 94, 8960, 1972.
8. P. B. Merkel, D. R. Kearns, J. Amer. Chem. Soc., 94, 7244, 1972.
9. Р. Рид, Т. Шервуд, Свойства газов и жидкостей, «Химия», 1971.
10. T. V. Pokholok, O. N. Korpukhin, V. Ya. Shlyapimtikh, J. Polymer Sci., Polymer Chem. Ed., 13, 525, 1975.
11. T. Wilson, J. Amer. Chem. Soc., 88, 2898, 1966.
12. B. Stevens, S. R. Perer, R. D. Small, Photochem. Photobiol., 19, 315, 1974.
13. J. Flood, K. E. Russell, J. K. S. Wan, Macromolecules, 6, 669, 1973.
14. A. Farmilo, F. Wilkinson, Photochem. Photobiol., 18, 447, 1973.
15. R. Livingston, V. S. Rao, J. Phys. Chem., 63, 794, 1959.