

УДК 542.06542.943-92544.032.4676.1

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ГЕНЕРИРОВАНИЕ РАДИКАЛОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ АММОНИЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ГИДРОПЕРОКСИДАМИ

© 2024 г. Д. А. Кругов^{1*}, А. К. Гатин¹, Н. В. Потапова¹,
В. Г. Кондратович¹, Е. А. Менгеле¹, О. Т. Касаикина¹

¹Федеральный исследовательский центр химической физики
им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: kagur1982@mail.ru

Поступила в редакцию 05.06.2023;
после доработки 13.11.2023;
принята в печать 20.11.2023

Исследовано влияние умеренного магнитного поля (600 мТл) постоянного магнита на скорости генерирования радикалов (W_i) в смешанных мицеллярных системах четвертичных аммониевых соединений (Quaternary Ammonium Compounds (QAC)) с гидропероксидами (QAC–ROOH), которые измеряли методом ингибиторов. Проведена оценка влияния магнитного поля на скорость радикальной полимеризации, инициированной радикалами, генерируемыми с поверхности хемосорбированными на твердом носителе QAC при взаимодействии с растворенным в мономере гидропероксидом. Установлено, что в мицеллярных растворах магнитное поле уменьшает W_i , магнитный эффект $MЭ \approx -0.45$. В случае радикальной полимеризации стирола, содержащего гидропероксид кумила, на поверхности пластинок слюды с хемосорбированным монослоем QAC (СТАВ или ACh) скорость полимеризации и, следовательно, W_i увеличиваются в магнитном поле, т.е. $MЭ > 0$.

Ключевые слова: инициирование радикалов, гидропероксиды, СТАВ, ацетилхолин, магнитное поле, постоянный магнит.

DOI:10.31857/S0207401X24050011

1. ВВЕДЕНИЕ

Четвертичные аммониевые соединения (Quaternary Ammonium Compounds (QAC)) относятся к классу катионных биоцидов с широким спектром антимикробной активности [1]. Они используются в качестве основных компонентов в поверхностно-активных веществах (ПАВ), средствах личной гигиены, косметике, многих красителях, антисептиках и дезинфицирующих смесях [2–4]. Эндогенные QAC, производные холина, включающие катион четвертичного аммония (R_4N^+), синтезируются и играют важную роль в живых организмах [5, 6]. Холин (Ch) является структурным элементом фосфатидилхолина, главного компонента клеточных мембран, и ацетилхолина (ACh), ключевого медиатора в центральной и периферической нервной системе, играющего решающую роль в обучении, памяти, вегетативном контроле и мышечных сокращениях. С возрастом биосинтез ACh замедляется, и его дефицит сопровождается многие нейродегенера-

тивные заболевания [7–9]. Биомедицинские исследования последних лет показывают, что ACh синтезируется и функционирует не только в нервной системе, но и принимает участие в других физиологических и патологических процессах. Способность продуцировать ACh обнаружена для Т-клеток, реагирующих на вирусную инфекцию, однако молекулярный механизм включения ACh в иммунную защиту пока не обсуждался [10, 11].

Ранее [12, 13] на примере ряда катионных ПАВ нами установлено, что QAC ускоряют окисление углеводов и липидов. Ключевой реакцией, отвечающей за ускорение, является каталитический распад на радикалы гидропероксидов (ROOH) – первичных продуктов окисления. Все ПАВ образуют смешанные мицеллы с ROOH, но только катионные ПАВ облегчают распад ROOH на радикалы [12]. Оказалось, что в органических средах ацетилхолин подобно катионным ПАВ ускоряет окисление углеводов и липидов. Вместе с амфифильными гидропероксидами ACh

образует наноагрегаты, и ключевой реакцией, увеличивающей скорость окисления, является каталитическое разложение ROOH в смешанных наноагрегатах с образованием радикалов [13, 14]. Катионные ПАВ и ACh, адсорбированные на твердой поверхности, сохраняют способность каталитически ускорять радикальный распад гидропероксидов и инициировать радикально-цепные процессы окисления и полимеризации [15, 16].

В настоящее время большое внимание уделяется изучению действия магнитных полей (МП) и электромагнитных полей на химические и в особенности на биологические процессы [17–24]. Однако механизмы биологических эффектов, наблюдаемых под воздействием МП, еще не изучены. Существует несколько экспериментальных и теоретических подходов к изучению и объяснению магнитных явлений в химических и биологических процессах. Считается, что основной вклад в магнитные эффекты (МЭ) в биосистемах могут вносить процессы, в которых генерируются и участвуют радикалы, ион-радикалы, парамагнитные частицы, неспаренные электроны которых являются носителями спинового магнетизма и взаимодействуют с магнитными полями. Магнитные спиновые эффекты могут проявляться только в многоспиновых системах при наличии по меньшей мере двух спинов, образующих радикальную пару (РП). Было показано, что внешние и внутренние магнитные поля магнитных ядер могут преодолевать правила отбора электронного спина для РП и способны индуцировать спиновые синглет-триплетные переходы в таких парах, изменять их спиновое состояние и реакционную способность [17–21]. Согласно последним исследованиям, значительное влияние МП на кинетику цепных свободнорадикальных процессов (полимеризация, окисление) можно наблюдать при умеренной интенсивности МП в фотоиницированных реакциях, проводимых в вязких средах [25, 26]. В литературе представлены экспериментальные исследования влияния МП на активность ряда ферментов [17, 18, 27, 28]. При этом почти во всех случаях были обнаружены радикальные посредники, поэтому зависимость активности фермента от МП часто рассматривается как свидетельство радикального механизма реакции [29].

Большое количество исследований было посвящено влиянию магнитного поля на процесс

образования самоорганизующихся супрамолекулярных систем. Спонтанная самоорганизация может быть вызвана прямыми специфическими взаимодействиями, такими как электростатические взаимодействия, водородные связи, силы Ван-дер-Ваальса и гидрофобные взаимодействия непосредственно и/или косвенно через окружающую среду в условиях, близких к термодинамическому равновесию. Благодаря большой анизотропии магнитной восприимчивости, характерной для сложных компонентов, МП может генерировать упорядоченные сборки, состоящие из различных наноразмерных структур [30, 31].

В работах [13, 32, 33] исследовано влияние умеренного МП постоянного магнита на скорость генерирования радикалов в каталитическом распаде гидропероксидов. Обнаружено замедляющее действие внешнего магнитного поля на скорость инициирования радикалов при распаде гидропероксидов в смешанных обращенных мицеллах, образованных катионными ПАВ и ROOH. Аналогичное уменьшение скорости инициирования радикалов наблюдали при каталитическом радикальном распаде ROOH с добавками ацетилхолина под действием внешнего магнитного поля (60–150 мТл). Примечательно, что замедляющий эффект магнитного поля уменьшается в присутствии парамагнитных частиц — кислорода и относительно стабильных радикалов [13, 32], но МП практически не влияет на скорость генерирования радикалов в гомогенном растворе при распаде ROOH, катализированном солями (ацетилацетонатом) железа [33]. Предполагается [13, 32, 33], что ROOH в смешанных с ПАВ мицеллах ориентируется таким образом, что пероксидная связь —O—O— активируется и ослабляется в двойном электрическом слое. Это проявляется в снижении эффективной энергии активации распада и увеличении скорости генерирования радикалов. Факторы, влияющие на структуру наноагрегатов (холестерин, катион-π взаимодействие и, по-видимому, магнитное поле), способны изменять скорость генерирования радикалов [33, 34].

В данной работе исследовано влияние умеренного магнитного поля (600 мТл) постоянного магнита на скорости генерирования радикалов в смешанных мицеллярных системах четвертичных аммониевых соединений с гидропероксидами (QAC—ROOH) и проведена оценка влияния МП на скорость радикальной полимеризации, ини-

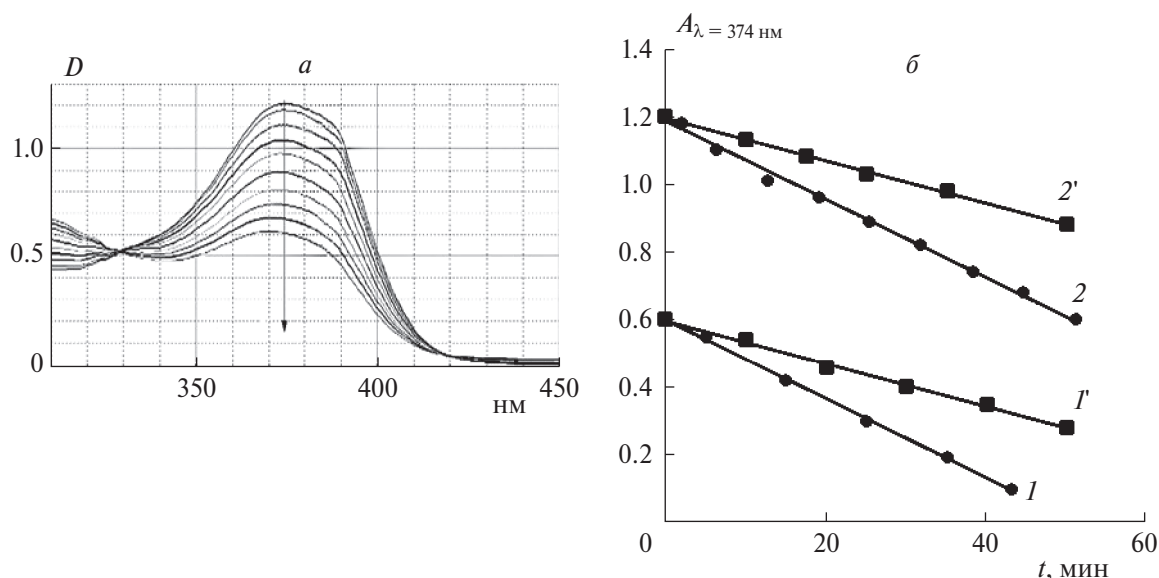


Рис. 1. *a* – Изменение УФ-спектров поглощения кверцетина при взаимодействии с радикалами, образующимися в системе 1мМ СРВ + 20 мМ гидропероксида третбутила в растворе хлорбензола; $[Q]_0 = 0.04$ мМ, 22°C; *б* – Кинетические кривые расходования кверцетина в системе 1 мМ СРВ + 20 мМ ГПТБ; кривые 1' и 2' – в магнитном поле 600 мТл, кривые 1 и 2 – в контроле; $[Q] = A/\varepsilon$, $\varepsilon = 3 \cdot 10^4$ л/(моль · см).

циированной радикалами, генерируемыми с поверхности хемосорбированными на твердом носителе QAC при взаимодействии с растворенным в мономере гидропероксидом.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Хлорид ацетилхолина, бромиды цетилтриметиламмония (СТАВ) и цетилпиридиния (СРВ), гидропероксид трет-бутила (НТВ), гидропероксид кумила (НС) и кверцетин (Q) – все производства компании Fluka (Germany), хлорбензол (Sigma-Aldrich, USA) использовали без дополнительной очистки. Гидроксиэтилметакрилат (НЭМА) предоставлен НПО им. В.А. Каргина (Дзержинск). Стирол очищали от гидрохинона 10%-ным водным раствором NaOH, промывали дистиллированной водой до нейтральной реакции, сушили над прокаленным CaCl_2 и перегоняли при пониженном давлении.

Растворы гидропероксидов (20 мМ) готовили в хлорбензоле, стироле и НЭМА; концентрацию пероксидов определяли методом йодометрического титрования. Базовые растворы СТАВ, СРВ и ACh ($2 \cdot 10^{-2}$ М) готовили в смеси хлороформ–метанол в соотношении 2 : 1.

Скорость образования радикалов (W_i) при каталитическом распаде ROOH в смешанных мицеллах с QAC определяли методом ингибиторов с использованием кверцетина в качестве акцеп-

тора радикалов. Реакцию проводили при комнатной температуре (22°C) в стеклянных сосудах (~4 мл), установленных в держателях одинаковой геометрии, в одном из которых постоянный магнит обеспечивал МП в 600 мТл. В сосуды помещали по 3 мл реакционной смеси и через определенные промежутки времени (5–10 мин) спектрофотометрически измеряли концентрацию кверцетина в максимуме его поглощения в хлорбензоле ($\lambda_{\text{max}} = 374$ нм $\varepsilon = 3 \cdot 10^4$ л · моль $^{-1}$ · см $^{-1}$ на спектрофотометре СФ-2000 “ОКБ Спектр”) и определяли скорости расходования Q (W_{iB} – в сосуде с МП, W_{iK} – в контроле). Пример изменения спектров поглощения Q в ходе реакции и кинетических кривых уменьшения оптической плотности в максимуме поглощения при 374 нм представлен на рис. 1.

Величину магнитного эффекта рассчитывали по формуле

$$\text{МЭ} = (W_{iB} - W_{iK})/W_{iK}. \quad (1)$$

В этих же сосудах изучали влияние МП на полимеризацию гидроксиэтилметакрилата и стирола, инициированную бинарной системой QAC–гидропероксид в условиях гетерогенного инициирования радикалов. Для этого готовили небольшие тонкие пластинки из слюды, адсорбировали на них QAC из соответствующего хлороформного раствора, промывали, сушили, взвешивали (m_0)

и помещали их в сосуды, содержащие раствор гидропероксида кумила в мономере. Через 2.5 часа в случае НЕМА и через сутки при полимеризации в стироле пластинки извлекали, промывали хлороформом, высушивали, взвешивали (m_t) и определяли относительное приращение массы: $m^* = \Delta m / m_0$ ($\Delta m = m_t - m_0$). Величину магнитного эффекта рассчитывали по формуле

$$МЭ = (m_B^* - m_K^*) / m_K^* \quad (2)$$

Морфологию поверхности образцов, полученных при полимеризации стирола на поверхности слюдяных пластинок с хемосорбированным слоем СТАВ и АСh, исследовали на атомно-силовом микроскопе Solver HV производства компании НТ-МДТ (Россия) при атмосферном давлении с применением кантилеверов марки НА_NC (НТ-МДТ, Россия) [13–15]. Микроскоп работал в полуконтактном режиме с одновременным измерением топографии и фазового контраста.

3. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работах [16, 35, 36] скорости инициирования радикалов, W_i , в мицеллярных растворах определяли методом ингибиторов с использованием в качестве акцептора радикалов полиенового углеводорода β -каротина, который активно реагирует с радикалами разных типов, является абсолютно гидрофобным соединением и не взаимодействует с обращенными мицеллами в органических средах. Однако β -каротин довольно быстро окисляется кислородом воздуха [37], что затрудняет его применение в длительных экспериментах. Кверцетин является природным антиоксидантом, менее подверженным непосредственному окислению пероксидами и кислородом, чем β -каротин. Кверцетин имеет интенсивную полосу поглощения в видимой части электронного спектра, растворяется в воде и органических растворителях, активно реагирует со свободными радикалами, т.е. является удобным кинетическим зондом для исследования процессов образования радикалов в разных средах.

В табл. 1 представлены данные по влиянию МП на скорость генерирования радикалов в смешанных наноразмерных агрегатах QAC–ROOH в среде хлорбензола. Видно, что так же, как и в предыдущих работах [35, 36, 38, 39], во всех системах в МП наблюдается уменьшение W_i и

Таблица 1. Влияние умеренного магнитного поля постоянного магнита (600 мТл) на скорость генерирования радикалов в смешанных мицеллах 20 мМ гидропероксида третбутила с CPB, СТАВ и АСh

QAC	Концентрация QAC, мМ	$W_{ik} \cdot 10^9$, М/с	$W_{ib} \cdot 10^9$, М/с	МЭ
CPB	1	6.5 ± 0.3	3.4 ± 0.3	–0.48
СТАВ	1.5	3.3 ± 0.3	1.6 ± 0.2	–0.5
АCh	1	1.6 ± 0.2	1.0 ± 0.1	–0.375

аномально высокие для радикальных реакций по абсолютному значению магнитные эффекты: $|МЭ| = |(W_{ib} - W_{i0}) / W_{i0}| > 0.375$. Обычно в радикальных реакциях они не превышают 25% [28, 40–44].

Ранее [18, 19] было установлено, что иммобилизованные на твердом носителе QAC сохраняют способность катализировать распад гидропероксидов с образованием радикалов и инициировать с поверхности радикальные процессы окисления и полимеризации. Природа носителя оказывает влияние на каталитическую активность QAC [19], что неудивительно, и наблюдается в каталитических газофазных реакциях [45–48]. Для оценки влияния внешнего МП на генерирование радикалов гетерогенной системой (адсорбированное на носителе QAC–раствор ROOH в мономере) была использована та же конструкция с сосудами в держателях одинаковой геометрии, в одном из которых постоянными магнитами обеспечивалось умеренное МП (600 мТл). В сосуды, содержащие раствор гидропероксида кумола в мономере (стирол или НЕМА), помещали предварительно взвешенные тонкие пластинки слюды с адсорбированным QAC, выдерживали 2.5 ч в случае опытов в НЕМА и сутки в опытах со стиролом, после чего измеряли приращение массы пластинок за счет радикальной полимеризации мономера, инициированной с поверхности пластинки. Результаты измерений массы пластинок и оценки величин МЭ по формуле (2) представлены в табл. 2. Из данных этой таблицы видно, что в среде полярного гидроксиэтилметакрилата на начальных стадиях полимеризации измеряемый МЭ отрицательный, т.е. скорость полимеризации и, следовательно, скорость инициирования радикалов в МП меньше, чем в контроле, где индукция магнитного поля Земли составляет всего ~0.05 мТл. В случае стирола, напротив, на пластинках слюды с хемосорбированным слоем СТАВ и АСh в МП

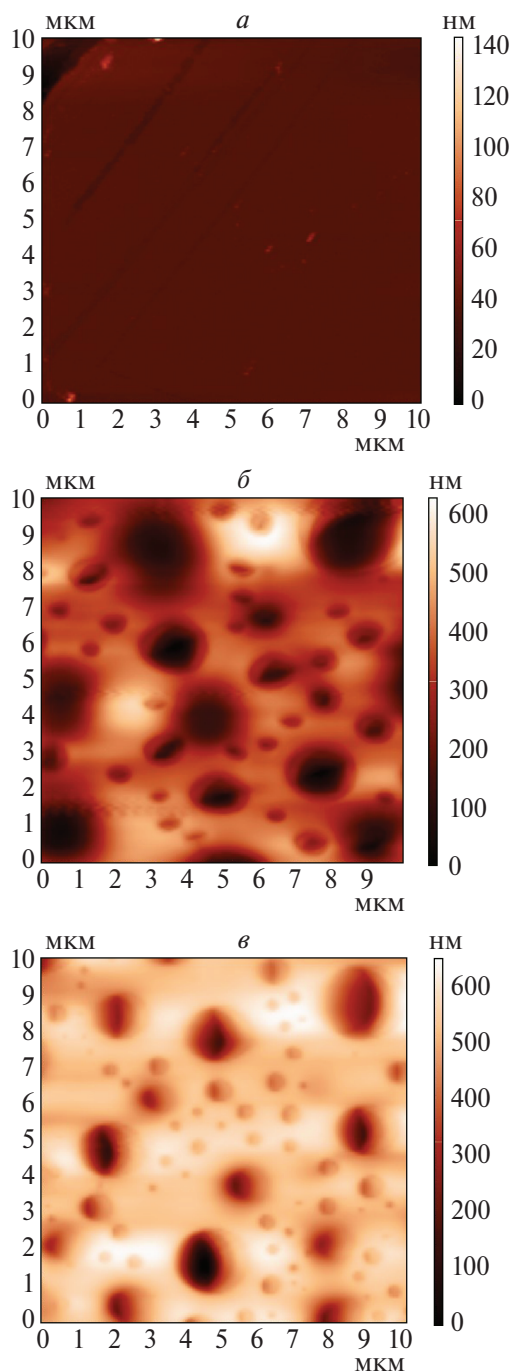


Рис. 2. Морфология поверхности слюдяных пластинок с хемосорбированным монослоем СТАВ: *a* – исходная пластинка; *б*, *в* – пластинки, выдержанные в течение 1 сут в растворе 50 мМ гидропероксида кумила в стироле; *б* – контроль без МП; *в* – полимеризация в магнитном поле 600 мТл (см. табл. 2).

образовалось больше полистирола, чем на пластинках вне поля. Морфология поверхности образцов, полученных при полимеризации стирола на поверхности слюдяных пластинок в магнитном поле и в контроле, была исследована на

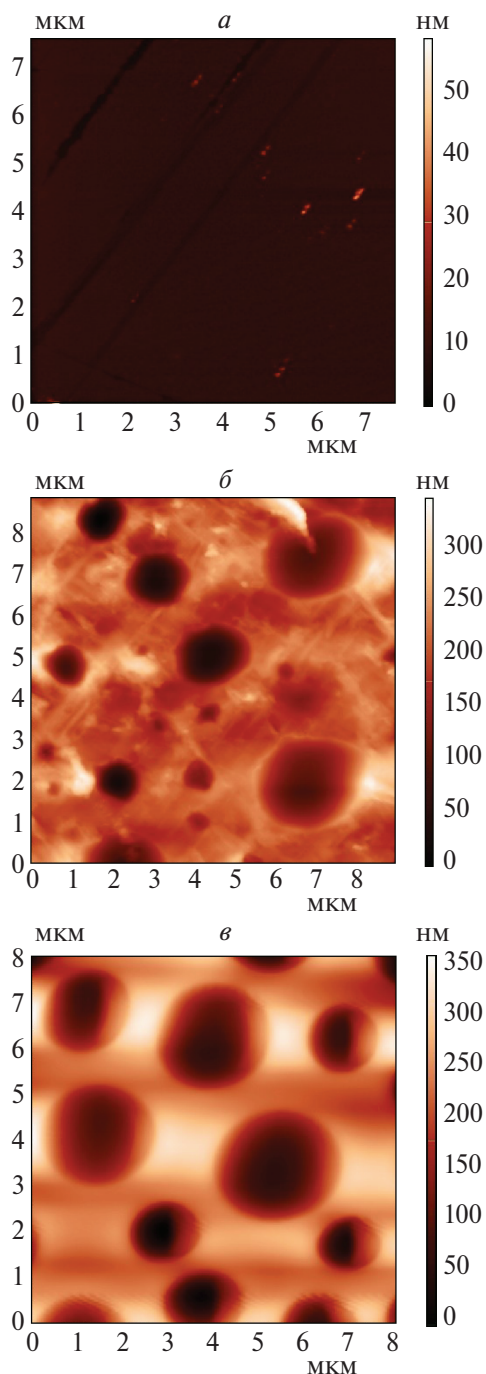


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но с хемосорбированным монослоем АСн. Обозначения те же, что и на рис. 2.

атомно-силовом микроскопе и представлена на рис. 2 и 3. По-видимому, наноразмерные реакторы QAC–ROOH образуются в неполярном стироле и локализуются в вязкой среде интерфейса, затрудняющей и лимитирующей выход радикалов. Согласно теории [28, 29, 40, 44], влияние МП на синглет-триплетный переход в первичной геминальной радикальной паре может увеличить время

Таблица 2. Влияние магнитного поля постоянного магнита (600 мТл) на полимеризацию НЕМА и стирола, содержащих гидропероксид кумила (НС), инициированную с поверхности пластинок слюды с монослоем хемосорбированного QAC

Мономер/QAC/НС	МП, мТл	m_0 , г	m_t , г	Δm , г	m^*	МЭ
НЕМА/CPB/44 мМ НС	Контроль	0.12855	0.12876	0.00021	0.00163	
НЕМА/CPB/44 мМ НС	600	0.13760	0.13781	0.00021	0.00153	–0.061
НЕМА/СТАВ/44 мМ НС	Контроль	0.08195	0.0822	0.00025	0.00305	
НЕМА/СТАВ/44 мМ НС	600	0.07463	0.07483	0.0002	0.00268	–0.121
Стирол/СТАВ/50 мМ НС	Контроль	0.12795	0.12989	0.00194	0.0152	
Стирол/СТАВ/50 мМ НС	600	0.13065	0.13287	0.00222	0.01698	+0.12
Стирол/ ACh /50 мМ НС	Контроль	0.07987	0.08096	0.00109	0.0136	
Стирол/ ACh /50 мМ НС	600	0.08105	0.08239	0.00134	0.01655	+0.217

жизни РП и вероятность выхода радикалов в объем, т.е. увеличить скорость инициирования и полимеризации.

Необходимо отметить, что замедляющее действие МП в опытах с гетерогенным инициированием при полимеризации НЕМА меньше, чем в мицеллярных системах QAC–ROOH в хлорбензоле (табл. 1). Ранее в работе [19] сопоставление активности QAC (по удельным скоростям генерирования радикалов) в катализе гомолитического распада ROOH в мицеллярных системах в разных мономерах и QAC, иммобилизованных на твердом носителе, показало, что, во-первых, активность хемосорбированных на целлюлозе QAC ниже, чем в мицеллярной среде, и, во-вторых, активность в среде более полярного метилметакрилата ниже, чем в стироле и в мицеллярных системах, и в случае иммобилизованных на носителях QAC. При адсорбции на твердом носителе, по-видимому, затрудняется доступ гидропероксида в изменившийся двойной электрический слой, что приводит к уменьшению скорости генерирования радикалов. Снижение активности в среде метилметакрилата и НЕМА может быть обусловлено уменьшением активности ROOH за счет водородных связей со сложноэфирной группой мономера.

ВЫВОДЫ

Постоянное умеренное магнитное поле (600 мТл) уменьшает выход радикалов в объем при распаде гидропероксидов смешанных микроагрегатов с QAC–ROOH.

При иммобилизации QAC на поверхности твердого носителя (слюды) сохраняется способность QAC катализировать радикальный распад гидропероксида в растворе.

Постоянное умеренное магнитное поле (600 мТл) способно увеличивать скорость радикальной полимеризации стирола в растворе с гидроперекисью, инициированной с поверхности иммобилизованным QAC.

Работа выполнена в рамках госзадания (тема № 122040500074-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jia Y., Niu L., Ma S. et al. // Progress in Polymer Science. 2017. V. 71. P. 53.
2. Paulson D.S. // New Biocides Development / Ed. by P.C. Zhu. Washington, DC: Amer. Chem. Soc., 2007. P. 124. (ACS Symp. series. V. 967).
3. Vereshchagin A.N., Frolov N.A., Egorova K.S., Seitkaliyeva M.M., Ananikov V.P. // Intern. J. Mol. Sci. 2021. V. 22. P. 6793.
4. Kwaśniewska D., Chen Y.-L., Wieczorek D. // Pathogens. 2020. V. 9. P. 459.
5. Al-Shareeda Z.A., Abramovich R.A., Potanina O.G., Alhejoj H. // Intern. J. Pharm. Qual. Ass. 2020. V. 11. P. 361.
6. SIDS Initial Assessment Reports: Choline Chloride. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), 2004.
7. Smith D.G., Cappai R., Barnham K.J. // Biochim. Biophys. Acta. 2007. V. 1768. P. 1976.
8. Masters C.L., Cappai R., Barnham K.J., Vilmagne V.L. // J. Neurochem. 2006. V. 97. P. 1700.
9. Auld D.S., Kornecook T.J., Bastianetto S., Quirion R. // Prog. Neurobiol. 2002. V. 68. P. 209.
10. Cox M.A., Bassi C., Saunders M.E. et al. // J. Intern. Med. 2020. V. 287. P. 120.
11. Beckmann J., Lips K.S. // Pharmacology. 2013. V. 92. P. 286.
12. Касаикина О.Т., Карташева З.С., Писаренко Л.М. // ЖОХ. 2008. № 8. С. 1298.
13. Бельшева Т.В., Гатин А.К., Гришин М.В. и др. // Хим. физика. 2015. Т. 34. № 9. С. 56.

14. Гришин М.В., Гатин А.К., Слуцкий В.Г., Харитонов В.А., Шуб Б.Р. // Хим. физика. 2014. Т. 33. № 6. С. 73.
15. Харитонов В.А., Гришин М.В., Уласевич С.А., Сарвадий С.Ю., Шуб Б.Р. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 1. С. 10.
16. Касаикина О.Т., Потапова Н.В., Круговов Д.А., Писаренко Л.М. // Кинетика и катализ. 2017. Т. 58. № 5. С. 567.
17. Круговов Д.А., Менгеле Е.А., Касаикина О.Т. // Изв. АН. Сер. хим. 2014. № 8. С. 1837.
18. Касаикина О.Т., Круговов Д.А., Менгеле Е.А., Березин М.П., Фокин Д.А. // Нефтехимия. 2015. Т. 55. № 6. С. 535.
19. Касаикина О.Т., Потапова Н.В., Круговов Д.А., Березин М.П. // Высокомолекуляр. соединения. В. 2017. Т. 59. № 3. С. 181.
20. Бучаченко А.Л. // Успехи химии. 2014. Т. 83. № 1. С. 1.
21. Buchachenko A.L. Magneto-Biology and Medicine. New York: Nova Science Publishers, 2014.
22. Saunders R. // Prog. Biophys. Mol. Biol. 2005. V. 87. № 2–3. P. 225.
23. Ghodbane J., Lahbib A., Sakly M., Abdelmetek H. // BioMed Reseach Intern. 2013. V. 2013. № 602987. <https://doi.org/10.1155/2013/602987>
24. Okano H. // Front. Biosci. 2008. V. 13. P. 6106.
25. Colbert A.P., Souder J., Markov M. // Environmentalist. 2009. V. 29. № 2. P. 177.
26. Zhang B., Tian L. // Bioelectromagnetics. 2020. V. 41. № 8. P. 573.
27. Zhan A., Luo Y., Qin H., Lin W., Tian L. // Bioelectromagnetics. 2022. V. 43. № 8. P. 462.
28. Levin P.P., Efremkin A.F., Khudyakov I.V. // Chem. Phys. 2017. V. 495. P. 23.
29. Rintoul I., Wandrey C. // Polymer. 2007. V. 48. P. 1903.
30. Buchachenko A.L., Lawler R.G. // Acc. Chem. Res. 2017. V. 50. P. 877.
31. Anatoly B., Dmitry K. // J. Phys. Chem. Biophys. 2018. V. 8. P. 272.
32. Eichwald C., Waliczek J. // Biophys. J. 1996. V. 71. P. 623.
33. Diaconu A., Nita L.E., Chiriac A.P., Butnaru M. // Intern. J. Biol. Macromol. 2018. V. 119. P. 974.
34. Yu J., Jin D., Chan K. et al. // Nat. Commun. 2019. V. 10. P. 5631.
35. Касаикина О.Т., Писаренко Л.М. // Изв. АН. Сер. хим. 2015. № 10. С. 2319.
36. Потапова Н.В., Касаикина О.Т., Березин М.П., Плащина И.Г. // Кинетика и катализ. 2020. Т. 61. № 5. С. 700.
37. Ozhogina O.A., Kasaikina O.T. // Free Radical. Biol. Med. 1995. V. 19. № 5. P. 575.
38. Касаикина О.Т., Потапова Н.В., Круговов Д.А., Плащина И.Г. // Изв. АН. Сер. хим. 2018. № 11. С. 2141.
39. Карташева З.С., Касаикина О.Т. // Изв. АН. Сер. хим. 1994. № 10. С. 1752.
40. Бучаченко А.Л., Сагдеев Р.З., Салихов К.М. Магнитные и спиновые эффекты в химических реакциях. Новосибирск: Наука, 1978.
41. Salikhov K.M. Magnetic Isotope Effect in Radical Reactions. Wien: Springer, 1996.
42. Levin P.P., Shafirovich V.Ya., Kuzmin V.A. // J. Phys. Chem. 1992. V. 96. P. 200.
43. Levin P.P., Kuzmin V.A. // Chem. Phys. 1992. V. 162. P. 79.
44. Levin P.P., Efremkin A.F., Khudyakov I.V. // Photochem. Photobiol. Sci. 2015. V. 14. P. 891.
45. Гатин А.К., Гришин М.В., Простнев А.С. и др. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 5. С. 221.
46. Гришин М.В., Гатин А.К., Слуцкий В.Г. и др. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 6. С. 3.
47. Гатин А.К., Сарвадий С.Ю., Дохликова Н.В., Гришин М.В. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 6. С. 3.
48. Гришин М.В., Гатин А.К., Слуцкий В.Г. и др. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 9. С. 3.

THE EFFECT OF A MAGNETIC FIELD ON THE GENERATION OF FREE RADICALS IN THE INTERACTION OF QUATERNARY AMMONIUM COMPOUNDS WITH HYDROPEROXIDES

D. A. Krugovov^{1*}, A. K. Gatin¹, N. V. Potapova¹,
V. G. Kondratovich¹, E. A. Mengele¹, O. T. Kasaikina¹

¹*Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow Russia*

*E-mail: kagur1982@mail.ru

The magnetic effects (ME) of a moderate magnetic field (MF, 600 mT) on the rate of radical generation (W_f) in mixed micellar systems of quaternary ammonium compounds with hydroperoxides (QAC-ROOH), measured by the inhibitor method, and the effect of magnetic field on the rate of radical polymerization initiated by radicals, generated from the surface by QAC chemisorbed on a solid carrier upon interaction with hydroperoxide dissolved in the monomer are compared. It has been established that in micellar solutions MF reduces W_f , ME ≈ -0.45 . In the case of radical polymerization of styrene containing cumyl hydroperoxide on the surface of mica plates with a chemisorbed monolayer of QAC (CTAB or ACh), the polymerization rate increases in MF.

Keywords: radical initiation, hydroperoxides, CTAB, acetylcholine, permanent magnet magnetic field.

REFERENCES

- Jia Y., Niu L., Ma S. et al. // Progress in Polymer Science. 2017. V. 71. 53.
- Paulson D.S. // New Biocides Development / Ed. P.C. Zhu. Washington, DC: Amer. Chem. Soc., 2007. P. 124. (ACS Symp. series. V. 967).
- Vereshchagin A.N., Frolov N.A., Egorova K.S., Seitkalieva M.M., Ananikov V.P. // Intern. J. Mol. Sci. 2021. V. 22. P. 6793.
- Kwaśniewska D., Chen Y.-L., Wieczorek D. // Pathogens. 2020. V. 9. P. 459.
- Al-Shareeda Z.A., Abramovich R.A., Potanina O.G., Al-hejoj H. // Intern. J. Pharm. Qual. Ass. 2020. V. 11. P. 361.
- SIDS Initial Assessment Reports: Choline Chloride. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), 2004.
- Smith D.G., Cappai R., Barnham K.J. // Biochim. Biophys. Acta. 2007. V. 1768. P. 1976.
- Masters C.L., Cappai R., Barnham K.J., Villeneuve V.L. // J. Neurochem. 2006. V. 97. P. 1700.
- Auld D.S., Kornecook T.J., Bastianetto S., Quirion R. // Prog. Neurobiol. 2002. V. 68. P. 209.
- Cox M.A., Bassi C., Saunders M.E. et al. // J. Intern. Med. 2020. V. 287. P. 120.
- Beckmann J., Lips K.S. // Pharmacology. 2013. V. 92. P. 286.
- Kasaikina O.T., Kartasheva Z.S., Pisarenko L.M. // J. General. Chem. 2008. V. 8. P. 1298.
- Belysheva T.V., Gatin A.K., Grishin M.V. et al. // Russian J. Phys. Chem. B. 2015. V. 9. № 5. P. 56.
- Grishin M.V., Gatin A.K., Slutsky V.G., Kharitonov V.A., Shub B.R. // Russ. J. Phys. Chem. B. 2014. V. 8. № 3. P. 416–419.
- Kharitonov V.A., Grishin M.V., Ulasevich S.A., Sarvadny S.Yu., Shub B.R. // Russ. J. Phys. Chem. B. 2019. V. 13. № 1. P. 16–24.
- Kasaikina O.T., Potapova N.V., Krugovov D.A., Pisarenko L.M. // Kinetics and Catalysis. 2017. V. 58. P. 567.
- Krugovov D.A., Mengele E.A., Kasaikina O.T. // Russian Chemical Bulletin. 2014. V. 63. P. 1837.
- Kasaikina O.T., Krugovov D.A., Mengele E.A., Berezhin M.P., Fokin D.A. // Petroleum Chemistry. 2015. V. 55. P. 535.
- Kasaikina O.T., Potapova N.V., Krugovov D.A., Berezhin M.P. // Polymer Science. Series B. 2017. V. 59. P. 225.
- Buchachenko A.L. // Russ. Chem. Rev. 2014. V. 83. P. 1.
- Buchachenko A.L. Magneto-Biology and Medicine. New York. Nova Science Publishers, 2014.
- Saunders R. Progress in Biophysics and Molecular Biology. 2005. V. 87. P. 225.
- Ghodbane J., Lahbib A., Sakly M., Abdelmetek H. // BioMed Research Intern. 2013. V. 2013. № 602987. <https://doi.org/10.1155/2013/602987>
- Okano H. // Frontiers in Bioscience. 2008, V. 13. P. 6106.
- Colbert A.P., Souder J., Markov M. // Environmentalist. 2009. V. 29. № 2. P. 177.
- Zhang B., Tian L. // Bioelectromagnetics. 2020. V. 41. № 8. P. 573.
- Zhan A., Luo Y., Qin H., Lin W., Tian L. // Bioelectromagnetics. 2022. V. 43. № 8. P. 462.
- Levin P.P., Efremkin A.F., Khudyakov I.V. // Chem. Phys. 2017. V. 495. P. 23.
- Rintoul I., Wandrey C. // Polymer. 2007. V. 48. P. 1903.
- Buchachenko A.L., Lawler R.G. // Acc. Chem. Res. 2017. V. 50. P. 877.
- Anatoly B., Dmitry K. // J. Phys. Chem. Biophys. 2018. V. 8. P. 272.

32. *Eichwald C., Walleczeck J.* // *Biophys. J.* 1996. V. 71. P. 623.
33. *Diaconu A., Nita L.E., Chiriac A.P., Butnaru M.* // *Intern. J. Biol. Macromol.* 2018. V. 119. P. 974.
34. *Yu J., Jin D., Chan K. et al.* // *Nat. Commun.* 2019. V. 10. P. 5631.
35. *Kasaikina O.T., Pisarenko L.M.* // *Russian Chemical Bulletin.* 2015. V. 10. P. 2319.
36. *Potapova N.V., Kasaikina O.T., Berezin M.P., Plashchina I.G.* // *Kinetics and Catalysis.* 2020. V. 61. P. 700.
37. *Ozhogina O.A., Kasaikina O.T.* // *Free Radical. Biol. Med.* 1995. V. 19. № 5. P. 575..
38. *Kasaikina O.T., Potapova N.V., Krugovov D.A., Plashchina I.G.* // *Russian Chemical Bulletin.* 2018. V. 11. P. 2141.
39. *Kartasheva Z.S., Kasaikina O.T.* // *Russian Chemical Bulletin.* 1994. V. 10. P. 1752.
40. *Buchachenko A.L., Sagdeev R.Z., Salikhov K.M.* *Magnetic and Spin Effects in Chemical Reactions.* Novosibirsk: Nauka, 1978 [in Russian].
41. *Salikhov K.M.* *Magnetic Isotope Effect in Radical Reaction.* Wien: Springer, 1996.
42. *Levin P.P., Shafirovich V.Ya., Kuzmin V.A.* // *J. Phys. Chem.* 1992. V. 96. P. 200.
43. *Levin P.P., Kuzmin V.A.* // *Chem. Phys.* 1992. V. 162. P. 79.
44. *Levin P.P., Efremkin A.F., Khudyakov I.V.* // *Photochem. Photobiol. Sci.* 2015. V. 14. P. 891.
45. *Gatin A.K., Grishin M.V., Prostnev A.S. et al.* // *Russ. J. Phys. Chem. B.* 2022. V. 16. № 3. P. 468.
46. *Grishin M.V., Gatin A.K., Slutskii V.G. et al.* // *Russ. J. Phys. Chem. B.* 2022. V. 16. № 3. P. 395.
47. *Gatin A.K., Sarvady S.Yu., Dokhlikova N.V., Grishin M.V.* // *Russ. J. Phys. Chem. B.* 2021. V. 15. № 3. P. 367.
48. *Grishin M.V., Gatin A.K., Slutsky V.G. et al.* // *Russian J. Phys. Chem. B.* 2021. V. 15. № 5. P. 777–781.