

УДК 542.943-92:547.8

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2020.2.13

КИНЕТИКА И АКТИВАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕАКЦИЙ ОЗОНА С 5-ФТОРУРАЦИЛОМ И 5-ГИДРОКСИ-6-МЕТИЛУРАЦИЛОМ

© А. А. Максютова^{1*}, Е. Д. Монсева¹,
Ю. С. Зимин¹, А. Г. Мустафин^{1,2}

¹Башкирский государственный университет
Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, Заки Валиди, 32.

²Уфимский институт химии УФИЦ РАН
Россия, Республика Башкортостан, 450054 г. Уфа, пр. Октября, 71.

Тел.: +7 (347) 229 96 94.

*Email: ajm-ajms@mail.ru

Методом УФ-спектроскопии изучена кинетика реакций озона с двумя производными урацила – 5-фторурацилом и 5-гидрокси-6-метилурацилом – в водных растворах. Установлено, что исследуемые реакции протекают по кинетическим уравнениям второго порядка (первого – по озону и первого – по урацилу). В интервале 285–309 К изучена температурная зависимость констант скоростей второго порядка и определены значения активационных параметров. Обнаружено, что между значениями энергий активации и логарифмов предэкспоненциальных множителей (полученных в настоящей работе и известных из литературы) имеет место удовлетворительная линейная корреляция, которая может свидетельствовать о едином механизме лимитирующей стадии озонированного окисления всех изученных урацилов.

Ключевые слова: 5-фторурацил, 5-гидрокси-6-метилурацил, озон, кинетика реакции, активационные параметры.

Введение

В настоящее время озон находит весьма широкое применение в косметологии и медицине (профилактика и терапия многих болезней). При наличии положительных медицинских результатов, использование озона способно приводить к окислению мономерных структур РНК, ДНК и, конечно же, пиримидиновых оснований. О возможности такого процесса могут свидетельствовать недавние литературные данные по окислению и деструкции пиримидиновых оснований под действием различных окислителей (молекулярного кислорода [1–5], пероксида водорода [6–9], персульфата аммония [10], гидроксильного [3; 11–13], супероксидного [3], пероксильных [14–16] радикалов и др.). В связи с изложенным большое значение приобретают исследования, направленные на изучение реакционной способности озона по отношению к урацилу и его производным.

Недавно [17] были получены первые результаты по кинетике окисления урацила и отдельных его производных озоном в водных растворах. Настоящая работа является продолжением исследований в данной области и посвящена изучению реакционной способности озона по отношению к двум, ранее не изученным, производным урацила (ПУ) – 5-фторурацилу и 5-гидрокси-6-метилурацилу – в водных растворах.

Экспериментальная часть

В опытах использовали 5-фторурацил производства фирмы «Aldrich» (США) с содержанием основного вещества $\geq 99\%$. 5-Гидрокси-6-метилурацил получали и очищали по методике [18] в ла-

боратории фармакофорных циклических систем Уфимского института химии УФИЦ РАН. Для получения озон-кислородной смеси использовали лабораторный озонатор. Растворителем служила свежеперегнанная дистиллированная вода.

Кинетику реакций озона с 5-фторурацилом и 5-гидрокси-6-метилурацилом в водных растворах изучали методом УФ-спектроскопии на приборе UV-2600 фирмы «Shimadzu». Исследования проводили при равенстве начальных концентраций реагентов ($[O_3]_0 = [ПУ]_0$) по методике, описанной в работе [17]. За кинетикой процессов следили по изменению оптических плотностей (A) на длинах волн (λ_{max}), соответствующих максимумам поглощения сопряжения —C=C—C=O урацильных колец.

Для определения стехиометрических соотношений реагентов (O_3 и ПУ) использовали барботажную установку, суть которой и возможности описаны в работе [19]. При этом озон-кислородная смесь продувалась через водные растворы производных урацила, а контроль за расходом озона проводился по изменению $[O_3]$ в газовой фазе до и после реактора. Детальное описание проводимых экспериментов представлено в работе [17].

Результаты и их обсуждение

Анализ таутомерных форм производных урацила. УФ-спектры 5-фторурацила и 5-гидрокси-6-метилурацила (рис. 1) имеют две характерные полосы поглощения, первую из которых (200–210 нм) относят к поглощению группы

—C=O, а вторую (265–275 нм) – к поглощению сопряжения урацильного кольца —C=C—C=O [20]. Наличие двух максимумов в указанных областях спектра (рис. 1) следует рассматривать как свидетельство нахождения изучаемых производных урацила в дикето-форме.

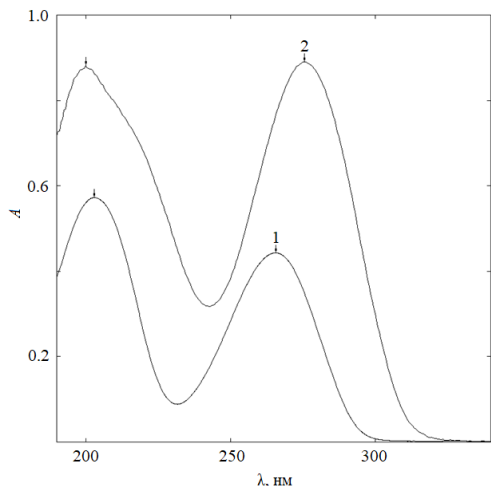


Рис. 1. Спектры поглощения водных растворов 5-фторурацила (1) и 5-гидрокси-6-метилурацила (2); 294 К, [ПУ] = 1.0·10⁻⁴ моль/л.

В пользу данного факта говорят и результаты исследований [20–21], указывающих на значительное преобладание дикето-форм производных урацила при их нахождении в нейтральных и кислых водных растворах (т.е. при pH ≤ 7.0). Согласно данным табл. 1, pH водных растворов 5-фторурацила и 5-гидрокси-6-метилурацила в области использованных нами концентраций не превышает 6.2.

Таблица 1

Значения pH водных растворов производных урацила; 294 К, [ПУ] = (1÷20)×10⁻⁵ моль/л

Производные урацила	Диапазон pH
5-Фторурацил	5.0–6.2
5-Гидрокси-6-метилурацил	4.3–5.8

Таким образом, в условиях изучения реакций O₃ с ПУ преимущественной формой производных урацила является дикето-форма (концентрация енольной формы в этих условиях является пренебрежимо малой).

Определение коэффициентов экстинкции производных урацила. Коэффициенты экстинкции 5-фторурацила и 5-гидрокси-6-метилурацила в водных растворах определяли по закону Бугера-Ламберта-Бера [22]:

$$A = \varepsilon_{\lambda} \cdot [\text{О}] \cdot l,$$

где A – оптическая плотность водных растворов ПУ; ε_{λ} – коэффициенты экстинкции производных урацила при длине волны λ , л моль⁻¹ см⁻¹; [ПУ] – концентрация изученных ПУ в водных рас-

творах, моль/л; l – толщина кюветы (во всех опытах величина $l = 1$ см).

На рис. 2 приведены результаты изучения зависимостей оптических плотностей от концентраций 5-фторурацила и 5-гидрокси-6-метилурацила в водных растворах. Из данного рисунка видно, что изучаемые зависимости достаточно четко (с коэффициентами корреляции $r \geq 0.998$) выполняются до [ПУ] = 2·10⁻⁴ моль/л. По тангенсам углов наклона приведенных на рис. 2 прямых определены коэффициенты экстинкции производных урацила, значения которых представлены в табл. 2.

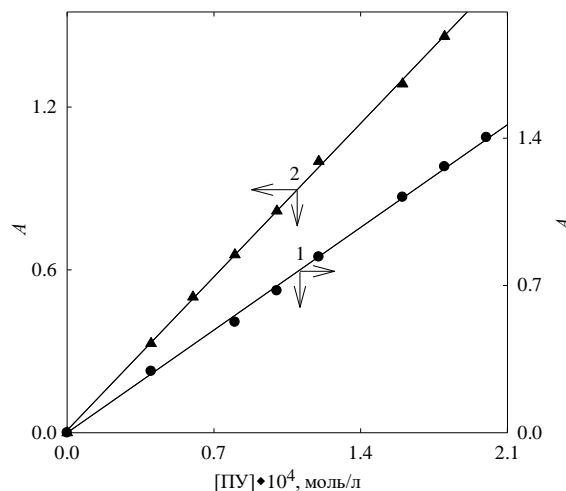


Рис. 2. Зависимости оптических плотностей водных растворов 5-фторурацила (1) и 5-гидрокси-6-метилурацила (2) от их концентраций; 294 К.

Таблица 2

Коэффициенты экстинкции производных урацила в водных растворах

Производные урацила	$\varepsilon_{\lambda} \cdot 10^{-3}$, л моль ⁻¹ см ⁻¹	λ_{max} , нм
5-Фторурацил	7.0±0.2	265
5-Гидрокси-6-метилурацил	8.1±0.1	275

Изучение кинетики реакций озона с 5-фторурацилом и 5-гидрокси-6-метилурацилом в водных растворах. Исследование реакций O₃ с урацилом и его производными на барботажной установке [17] позволило установить стехиометрию процесса (1:1), т.е. на начальной стадии окисления 1 моль израсходованного урацила однозначно связан с расходом 1 моля озона. На основании данного факта можно ожидать, что скорость изучаемых реакций описывается следующим кинетическим уравнением:

$$V = -dC/dt = k [\text{ПУ}][\text{O}_3], \quad (1)$$

где k – константа скорости реакций озона с изученными урацилами. Тогда, проводя реакции при одинаковых начальных концентрациях реагентов ([ПУ]₀ = [O₃]₀ = C₀), кинетика изменения текущих концентраций C должна спрямляться в координатах следующего уравнения [22]:

$$1/C = 1/C_0 + k \cdot t. \quad (II)$$

Действительно, проведение реакций озона с 5-фторурацилом и 5-гидрокси-6-метилурацилом в указанных выше условиях показало, что кинетические кривые изменения C достаточно хорошо, со значениями $r \geq 0.995$, линейризуются в координатах уравнения (II) (см., например, *рис. 3*). При этом текущая концентрация C реагирующих веществ рассчитывалась по уравнению

$$\tilde{N} = \frac{\dot{A}}{(\varepsilon_{iO} + \varepsilon_{iC}) \cdot l} \quad [17], \quad (III)$$

с учетом того факта, что оба реагента (ПУ и O_3) поглощают в одной и той же области УФ-спектра. В уравнении (III) величина A представляет собой сумму оптических плотностей: $A_{ПУ} + A_{O_3}$, где $A_{ПУ}$ и A_{O_3} – оптические плотности, связанные с поглощением производных урацила и озона; ε_{iO} и ε_{iC} – коэффициенты экстинкции реагирующих веществ.

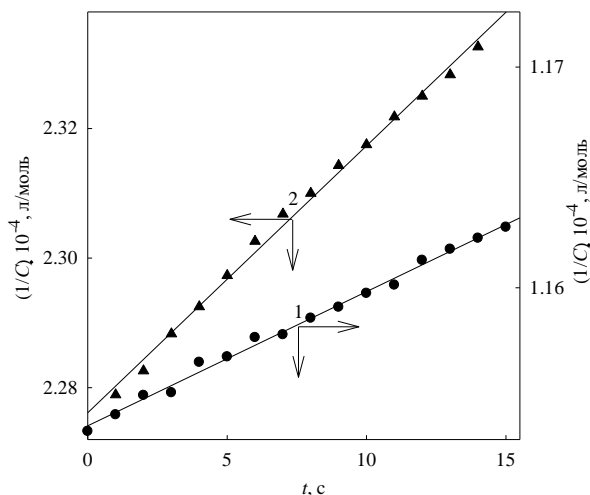


Рис. 3. Линейризация кинетических кривых изменения концентрации C в координатах уравнения (II) для реакций озона с 5-фторурацилом (1) и 5-гидрокси-6-метилурацилом (2); 289 К.

По тангенсам углов наклона прямых (*рис. 3*) были рассчитаны константы скоростей реакций O_3 с 5-фторурацилом и 5-гидрокси-6-метилурацилом в водных растворах.

Определение активационных параметров реакции озона с производными урацила. В настоящей работе в интервале 285–309 К изучена температурная зависимость констант скоростей k реакций озона с 5-фторурацилом и 5-гидрокси-6-метилурацилом в водных растворах (*табл. 3*).

Следует отметить, что полученные значения констант скоростей второго порядка свидетельствуют о довольно высокой реакционной способности озона по отношению к производным урацила. Обработав данные *табл. 3* в координатах уравнения Аррениуса, были вычислены активационные

параметры (логарифмы предэкспоненциальных множителей $\lg A$ и энергии активации E) изучаемых реакций в водной среде (*табл. 4*).

Таблица 3

Температурная зависимость констант скоростей реакций озона с производными урацила

T, K	$k \cdot 10^{-1}$, л моль $^{-1}$ с $^{-1}$	
	5-Фторурацил	5-Гидрокси-6-метилурацил
285	0.32 ± 0.02	3.01 ± 0.05
289	0.50 ± 0.01	4.4 ± 0.1
293	0.65 ± 0.02	5.0 ± 0.5
297	0.83 ± 0.09	5.8 ± 0.3
301	1.1 ± 0.07	7.4 ± 0.6
305	1.6 ± 0.2	8.8 ± 0.3
309	1.9 ± 0.2	11.2 ± 0.4

Таблица 4

Активационные параметры реакций озона с производными урацила

Производные урацила	$\lg A$ (л моль $^{-1}$ с $^{-1}$)	E , кДж/моль
5-Фторурацил	10.5 ± 1.0	53.6 ± 5.2
5-Гидрокси-6-метилурацил	8.3 ± 0.9	37.4 ± 5.2

Оказалось, что значения активационных параметров (найденных в настоящей работе и взятых из [17]) удовлетворительно линейризуются в координатах $E = f(\lg A)$ (*рис. 4*, $r = 0.985$), что свидетельствует о наличии так называемого «компенсационного эффекта». Данная линейризация указывает, скорее всего, на одинаковый механизм лимитирующей стадии, определяющей скорости озонированного окисления всех изученных урацилов.

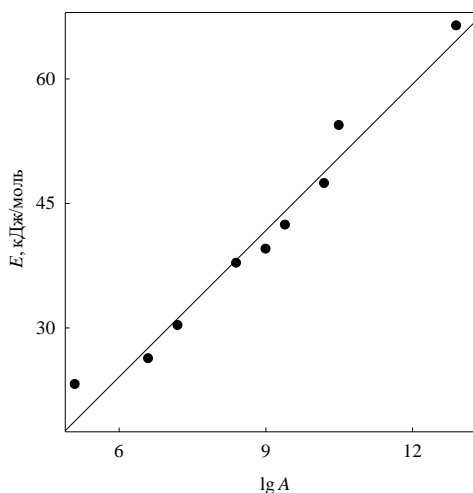


Рис. 4. Компенсационный эффект в реакциях озонированного окисления урацила и его производных (по данным настоящей работы и работы [17]).

Выводы

Таким образом, в настоящей работе изучена кинетика озонированного окисления 5-фторурацила и 5-гидрокси-6-метилурацила в водных растворах. Показано, что исследуемые реакции протекают по кинетическим уравнениям второго порядка

(первого – по O_3 и первого – по урацилу). В интервале 285–309 К проведено изучение температурных зависимостей констант скоростей второго порядка. Обработав полученные данные в координатах уравнения Аррениуса, были вычислены логарифмы предэкспоненциальных множителей $\lg A$ и энергии активации E реакций озона с 5-фторурацилом и 5-гидрокси-6-метилурацилом в водной среде. Обнаружено, что значения активационных параметров (найденных в настоящей работе и взятых из литературы) удовлетворительно линеаризуются в координатах $E = f(\lg A)$. Данная линеаризация (компенсационный эффект) свидетельствует, скорее всего, о едином механизме лимитирующей стадии озонированного окисления всех изученных урацилов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-73-20073).

ЛИТЕРАТУРА

1. Нугуманов Т. Р., Иванов С. П., Насыров А. А., Гайфутдинова Р. К., Муринов Ю. И. Гомогенное окисление 5-гидрокси-6-метилурацила молекулярным кислородом в водных растворах // Башк. хим. журн. 2007. Т. 14. №1. С. 48–50.
2. Nugumanov T. R., Ivanov S. P., Starikova Z. A., Murinov Yu. I. Oxidation of 5-Hydroxy-6-methyluracil to 5,5,6-Trihydroxy-6-methylpyrimidine-2,4-dione with Molecular Oxygen // Mend. Commun. 2008. Vol. 18. No. 4. Pp. 223–224.
3. Kuznetsova A. A., Knorre D. G., Fedorova O. S. Oxidation of DNA and its Components with Reactive Oxygen Species // Russ. Chem. Rev. 2009. Vol. 78. No. 7. Pp. 659–678.
4. Nugumanov T. R., Antipin A. V., Grabovskii S. A., Kabal'nova N. N., Murinov Y. I. Oxidation of 5-Hydroxy-6-methyluracil with Molecular Oxygen in the Presence of Copper(II) Chloride in Aqueous Solution // Russ. J. Gen. Chem. 2011. Vol. 81. No. 7. Pp. 1543–1546.
5. Ostakhov S. S., Khursan S. L., Murinov Y. I., Nugumanov T. R., Kayumova R. R., Petrova S. F. The Role of Copper(II) Ions in the Oxidation of 5-Hydroxy-6-methyluracil in the Ground and Electronically Excited States with Molecular Oxygen in Aqueous Solutions // High Energy Chem. 2017. Vol. 51. No. 1. Pp. 32–37.
6. Ахатова Г. Р., Сафарова И. В., Герчиков А. Я., Еникеев А. А. Кинетика взаимодействия производных урацила с пероксидом водорода // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2012. Т. 55. Вып. 3. С. 40–43.
7. Akhatova G. R., Safarova I. V., Gerchikov A. Ya., Enikeev A. A. Kinetics and Mechanism of the Reactions of Uracil with Hydrogen Peroxide in Aqueous Solutions // Kinet. Catal. 2012. Vol. 53. No. 3. Pp. 297–300.
8. Ахатова Г. Р., Шарипова Г. М., Сафарова И. В., Герчиков А. Я., Мустафин А. Г. Реакционная способность таутомерных форм 5-метилурацила при взаимодействии с пероксидом водорода в водных растворах // Вестн. БашГУ. 2013. Т. 18. №4. С. 1019–1022.
9. Gerchikov A. Ya., Sharipova G. M., Akhatova G. R., Mustafin A. G., Sakhibgareeva M. V., Spivak S. I. Kinetics, Mechanism, and Mathematical Model of the Reaction between Uracil and Hydrogen Peroxide in Aqueous Solution // Kinet. Catal. 2015. Vol. 56. No. 5. Pp. 563–568.
10. Лихачева Н. А., Аминова Э. К. Продукты окислительного расщепления 6-метилурацила персульфатом аммония // Башк. хим. журн. 2017. Т. 24. №3. С. 89–91.
11. Grand A., Morell C., Labet V., Cadet J., Eriksson L. A. 1H Atom and 1OH Radical Reactions with 5-Methylcytosine // J. Phys. Chem. A. 2007. Vol. 111. No. 37. Pp. 8968–8972.
12. Wagner J. R., Cadet J. Oxidation Reactions of Cytosine DNA Components by Hydroxyl Radical and One-electron Oxidants in Aerated Aqueous Solutions // Acc. Chem. Res. 2010. Vol. 43. No. 4. Pp. 564–571.
13. Madugundu G. S., Cadet J., Wagner J. R. Hydroxyl-radical-induced Oxidation of 5-Methylcytosine in Isolated and Cellular DNA // Nucleic Acids Research. 2014. Vol. 42. No. 11. Pp. 7450–7460.
14. Kabal'nova N. N., Grabovskiy S. A., Nugumanov T. R., Ivanov S. P., Murinov Y. I. 5-Hydroxy-6-methyluracil as an Efficient Scavenger of Peroxy Radicals // Russ. Chem. Bull. 2008. Vol. 57. No. 11. Pp. 2265–2270.
15. Grabovskiy S. A., Konkina I. G., Murinov Y. I., Kabal'nova N. N. 5-Aminouracil as Effective Inhibitor of Peroxyl Radicals. Experimental and Theoretical Studies // Current Organic Chemistry. 2012. Vol. 16. No. 11. Pp. 1447–1452.
16. Yakupova L. R., Nasibullina R. A., Petrova S. F., Abdullin M. F., Salikhov S. M., Gimadieva A. R., Safiullin R. L. The Mechanism of 5-Amino-6-methyluracil Oxidation with 1,4-Dioxanyl Peroxyl Radical // Chem. Heterocycl. Compd. 2015. Vol. 51. No. 2. Pp. 162–165.
17. Maksyutova A. A., Zimin Yu. S., Gimadieva A. R., Mustafin A. G. Kinetics of the Oxidation of Uracil and Six of Its Derivatives by Ozone in Aqueous Solutions // Russ. J. Phys. Chem. A. 2019. Vol. 93. No. 9. Pp. 1672–1676.
18. Мустафин А. Г., Гимадиева А. Р., Хазимуллина Ю. З., Абдрахманов И. Б., Сафиуллин Р. Л., Байметов Б. З. Способ получения 5-гидрокси-6-метилурацила: Пат. РФ №2700687 // Б.И. 19.09.2019. №26.
19. Зимин Ю. С. Кинетика и механизм озонированного окисления спиртов, эфиров, кетонов и олефинов в водной среде: дис. ... докт. хим. наук. Уфа, 2006. 302 с.
20. Iza N., Gil M., Marcillo J. Identification and Tautomeric Species of Uracil by Second Derivative UV Absorption Spectroscopy // J. Mol. Struct. 1988. Vol. 175. Pp. 31–36.
21. Иванов С. П. Изучение кето-енольного равновесия некоторых производных урацила в водных растворах: дис. ... канд. хим. наук. Уфа, 2003. 143 с.
22. Бадаев Ф. З. Химическая кинетика. М.: изд-во Юрайт, 2020. 181 с.

Поступила в редакцию 27.01.2020 г.

После доработки – 08.06.2020 г.

**KINETICS AND ACTIVATION PARAMETERS OF OZONE REACTIONS
WITH 5-FLUOROURACYL AND 5-HYDROXY-6-METHYLURACYL**© A. A. Maksyutova^{1*}, E. D. Moiseeva¹, Yu. S. Zimin¹, A. G. Mustafin^{1,2}¹*Bashkir State University
32 Zaki Validi Street, 450076 Ufa Republic of Bashkortostan, Russia.*²*Ufa Institute of Chemistry, Ufa Federal Research Center of RAS
71 Oktyabrya Avenue, 450054 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

Phone: +7 (347) 229 96 94.

*Email: ajm-ajms@mail.ru

The reactions kinetics of ozone with uracil derivatives (5-fluorouracil and 5-hydroxy-6-methyluracil) in aqueous solutions was studied by ultraviolet spectroscopy. Under the reactions conditions, the diketo form is shown to be the predominant form of uracil derivatives (UD). It has also been revealed that the linear dependences between the optical densities of aqueous uracil derivatives and their concentrations are fulfilled up to $[UD] = 2 \cdot 10^{-4}$ mol/L with the correlation coefficient $r \geq 0.998$. The extinction coefficients of 5-fluorouracil and 5-hydroxy-6-methyluracil in an aqueous medium are determined by the Bouguer-Lambert-Beer law. It has been established that ozone reacts with uracil derivatives by the second-order kinetic equations (the first being by O_3 and by UD). The temperature dependence of the second-order rate constants has been studied within the range of 285–309 K, with the values indicating quite high ozone reactivity as compared to the studied uracils. The processing of obtained data within the Arrhenius equation coordinates made it possible to determine the activation parameters of ozone reactions with 5-fluorouracil and 5-hydroxy-6-methyluracil in aqueous solutions. A satisfactory linear correlation between the activation energy values and the logarithms of preexponential factors (obtained in this work and known from literature) was found out. It may point to a single mechanism for the limiting stage of ozonized oxidation of all the studied uracils.

Keywords: 5-fluorouracil, 5-hydroxy-6-methyluracil, ozone, reaction kinetics, activation parameters.

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at bulletin_bsu@mail.ru if you need translation of the article.

REFERENCES

1. Nugumanov T. R., Ivanov S. P., Nasyrov A. A., Gaifutdinova R. K., Murinov Yu. I. *Bashk. khim. zhurn.* 2007. Vol. 14. No. 1. Pp. 48–50.
2. Nugumanov T. R., Ivanov S. P., Starikova Z. A., Muri-nov Yu. I. *Mend. Commun.* 2008. Vol. 18. No. 4. Pp. 223–224.
3. Kuznetsova A. A., Knorre D. G., Fedorova O. S. *Russ. Chem. Rev.* 2009. Vol. 78. No. 7. Pp. 659–678.
4. Nugumanov T. R., Antipin A. V., Grabovskii S. A., Kabal'nova N. N., Murinov Y. I. *Russ. J. Gen. Chem.* 2011. Vol. 81. No. 7. Pp. 1543–1546.
5. Ostakhov S. S., Khursan S. L., Murinov Y. I., Nuguma-nov T. R., Kayumova R. R., Petrova S. F. *High Energy Chem.* 2017. Vol. 51. No. 1. Pp. 32–37.
6. Akhatova G. R., Safarova I. V., Gerchikov A. Ya., Enikeev A. A. *Izv. vuzov. Khimiya i khim. tekhnologiya.* 2012. Vol. 55. No. 3. Pp. 40–43.
7. Akhatova G. R., Safarova I. V., Gerchikov A. Ya., Enike-ev A. A. *Kinet. Catal.* 2012. Vol. 53. No. 3. Pp. 297–300.
8. Akhatova G. R., Sharipova G. M., Safarova I. V., Gerchikov A. Ya., Mustafin A. G. *Vestn. BashGU.* 2013. Vol. 18. No. 4. Pp. 1019–1022.
9. Gerchikov A. Ya., Sharipova G. M., Akhatova G. R., Mustafin A. G., Sakhibgareeva M. V., Spivak S. I. *Kinet. Catal.* 2015. Vol. 56. No. 5. Pp. 563–568.
10. Likhacheva N. A., Aminova E. K. *Bashk. khim. zhurn.* 2017. Vol. 24. No. 3. Pp. 89–91.
11. Grand A., Morell C., Labet V., Cadet J., Eriksson L. A. *J. Phys. Chem. A.* 2007. Vol. 111. No. 37. Pp. 8968–8972.
12. Wagner J. R., Cadet J. *Acc. Chem. Res.* 2010. Vol. 43. No. 4. Pp. 564–571.
13. Madugundu G. S., Cadet J., Wagner J. R. *Nucleic Acids Research.* 2014. Vol. 42. No. 11. Pp. 7450–7460.
14. Kabal'nova N. N., Grabovskiy S. A., Nugumanov T. R., Ivanov S. P., Murinov Y. I. *Russ. Chem. Bull.* 2008. Vol. 57. No. 11. Pp. 2265–2270.

15. Grabovskiy S. A., Konkina I. G., Murinov Y. I., Kabal'nova N. N. *Current Organic Chemistry*. 2012. Vol. 16. No. 11. Pp. 1447–1452.
16. Yakupova L. R., Nasibullina R. A., Petrova S. F., Abdul-lin M. F., Salikhov S. M., Gimadieva A. R., Safiullin R. L. *Chem. Heterocycl. Compd.* 2015. Vol. 51. No. 2. Pp. 162–165.
17. Maksyutova A. A., Zimin Yu. S., Gimadieva A. R., Mustafin A. G. *Russ. J. Phys. Chem. A*. 2019. Vol. 93. No. 9. Pp. 1672–1676.
18. Mustafin A. G., Gimadieva A. R., Khazimullina Yu. Z., Abdrakhmanov I. B., Safiullin R. L., Baimetov B. Z. B.I. 19.09.2019. No. 26.
19. Zimin Yu. S. *Kinetika i mekhanizm ozonirovannogo okisleniya spirtov, efirov, ketonov i olefinov v vodnoi srede: dis. ... dokt. khim. nauk.* Ufa, 2006.
20. Iza N., Gil M., Marcillo J. J. *Mol. Struct.* 1988. Vol. 175. Pp. 31–36.
21. Ivanov S. P. *Izuchenie keto-enol'nogo ravnovesiya nekotorykh proizvodnykh uratsila v vodnykh rastvorakh: dis. ... kand. khim. nauk.* Ufa, 2003.
22. Badaev F. Z. *Khimicheskaya kinetika [Chemical kinetics]*. Moscow: izd-vo Yurait, 2020.

Received 27.01.2020.

Revised 08.06.2020.