

ХИМИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА
И КАТАЛИЗ

УДК 544.424.2

О ВЛИЯНИИ ПРИРОДЫ РАСТВОРИТЕЛЯ НА ОБРАЗОВАНИЕ
КАТИОНОВ ФЕРРОЦЕНИЯ ПРИ ПРОТОНИРОВАНИИ АЦЕТИЛ-
И 1,1'-ДИАЦЕТИЛФЕРРОЦЕНА ХЛОРНОЙ КИСЛОТОЙ
И ИХ ОКИСЛЕНИИ ЙОДОМ

© 2023 г. В. М. Фомин^{а,*}, Н. Н. Шуклина^а

^аНижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского, Н. Новгород, Россия

*e-mail: niuh325@bk.ru

Поступила в редакцию 14.11.2022 г.

После доработки 26.01.2023 г.

Принята к публикации 27.01.2023 г.

Установлено, что скорость образования катиона ферроцения в реакционной смеси ацетилферроцен (1,1'-диацетилферроцен) + I_2 + $HClO_4$ в результате протонирования металлокомплексов (МК) и их окисления йодом в диоксане и ацетонитриле протекает по разным механизмам и описывается разными кинетическими уравнениями, полученными при анализе схем процессов. Наблюдаемое отличие обусловлено разной ролью процессов протонирования металлокомплексов и их окисления йодом в указанных растворителях.

Ключевые слова: ацетилферроцен, 1,1'-диацетилферроцен, кислота, йод, протонирование, карбока-
тион, редокс-изомерия, катион ферроцения, окисление

DOI: 10.31857/S0044453723070105, **EDN:** SKONUH

Известно, что протонирование производных ферроцена с различными функциональными группами сильными кислотами (НХ) приводит к образованию соответствующих катионов ферроцения в результате редокс-изомерии ферроценилкарбениевых ионов, являющихся первичными продуктами протонирования указанных металлокомплексов (МК) [1–3].

Выход карбокатионов при протонировании МК и их способность к редокс-изомерии, а, следовательно, и скорость накопления катионов ферроцения, зависят от природы МК и НХ, соотношения их начальных концентраций и сольватирующей способности растворителя. В диоксане и ацетонитриле выход карбокатионов существенно выше, чем в таких растворителях как этанол, диоксан — H_2O , ДМФА, ДМСО, но только в диоксане образование катиона ферроцения является доминирующим процессом [4, 5].

На примере ферроценилметанола $FcCH_2OH$ показано, что при наличии в реакционной смеси окислителя, например, *n*-хинона [6], процессы протонирования и окисления МК оказывают взаимное влияние на скорость протекания каждого из них, причем степень и характер этого влияния зависят как от природы окислителя, так и соотношения начальных концентраций $FcCH_2OH$ -кислота.

Поскольку *n*-хинон проявляет свои окислительные свойства лишь в комбинации с сильной кислотой, процесс образования катиона ферроцения в системе МК + *n*-хинон + НХ в результате протонирования МК и его окисления разделить и исследовать по отдельности невозможно. Это же касается ряда других окислителей, например кислорода и гидропероксидов. Такая возможность появляется если использовать окислитель (Ох), например, йод, который способен вступать в реакцию с МК как в отсутствие кислоты, так и в ее присутствии, что ранее было показано на примере ферроцена [7], причем кислота катализирует его окисление, в то время как в комбинации с *n*-хиноном она входит в состав продукта восстановления окислителя. Из этого следует, что меняя природу растворителя, можно влиять на скорость образования катиона ферроцения как при протонировании МК, так и при его окислении йодом в системе МК + I_2 + НХ, и исследовать конкуренцию и взаимное влияние этих процессов, что и явилось целью настоящей работы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объектов исследования были выбраны ацетилферроцен $FcCOCH_3$ (соединение I) и 1,1'-диацетилферроцена $Fc(COCH_3)_2$ (II), кото-

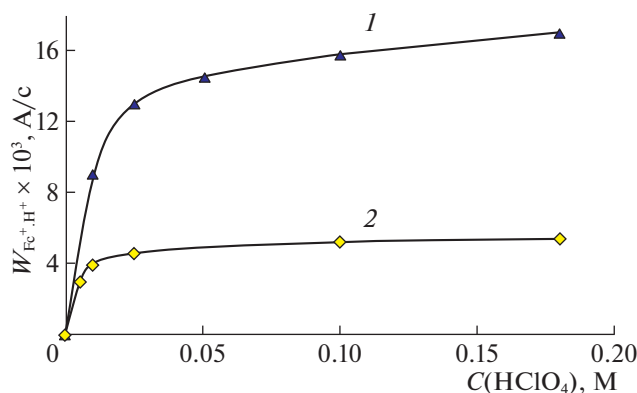


Рис. 1. Влияние концентрации HClO_4 на скорость образования катиона ферроцена при протонировании соединений I (1), II (2) в диоксане; $C_{\text{МК}}^0 = 0.003 \text{ M}$.

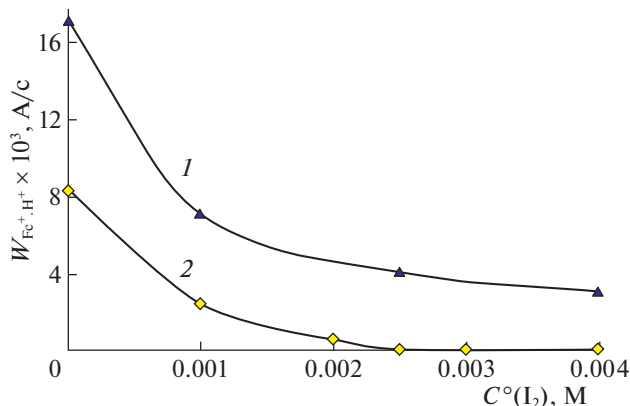


Рис. 2. Влияние добавок I_2 на скорость образования катиона ферроцена в диоксане при протонировании соединений I (1), II (2); $C_{\text{МК}}^0 = 0.003 \text{ M}$, $C_{\text{НХ}}^0 = 0.1 \text{ M}$.

рые отличаются своей реакционной способностью, как в отношении реакции редокс-изомерии соответствующих карбокатионов [2], так и в их реакции с йодом.

Электронные спектры поглощения реакционных смесей снимали в области 400–800 нм в атмосфере аргона на спектрометре Shimadzu UV-1700 с использованием кварцевых кювет 10 мм. Работу проводили в спектральном режиме, который предполагал сканирование по длине волны с последующей обработкой спектра.

Для проведения опытов готовились концентрированные растворы реагентов в сосудах, заполненных аргоном, после чего раствор металлокомплекса переносился в кювету и разбавлялся тем же растворителем до нужной концентрации. Далее снимался фоновый спектр. После этого в кювету вводился капилляр, через который раствор продувался аргоном в течение трех минут. Не прерывая барботаж, в кювету вводилось необходимое количество либо раствора йода, либо смеси I_2 с HClO_4 , капилляр вынимался, кювета изолировалась от воздуха, и этот момент времени принимался за начало реакции. Время появления максимума на полосе поглощения катиона ферроцена принималось за время реакции (8–10 с). После этого с интервалом в 15–20 с снимались следующие спектры раствора в течение двух–трех минут. По полученным спектрам строились кинетические кривые в координатах $A(\text{abs}) - t(\text{с})$, из которых рассчитывались начальные скорости реакции для конкретных концентраций реагентов.

Использованные растворители имели квалификацию “ос.ч.” и “ч.д.а.” и дополнительной очистке не подвергались. Ферроцен использовался в виде продажного препарата после его допол-

нительной очистки путем двукратной возгонки в вакууме.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты кинетических исследований свидетельствуют о том, что в диоксане в системе I (II) + НХ основным каналом образования катиона ферроцена является протонирование МК, скорость которого $W_{\text{Fc}^+, \text{H}^+}$ стремится к предельному значению с ростом концентрации HClO_4 (рис. 1). Йод в отсутствие кислоты не способен окислять указанные соединения в этом растворителе и его добавки в реагирующую систему или не должны влиять на скорость образования катиона ферроцена, или должны увеличивать ее за счет катализируемого кислотой окисления МК йодом, как это наблюдается при окислении ферроцена (III) [7]. В действительности наблюдается ингибирование этого процесса (рис. 2), скорость которого в случае соединения II падает практически до нуля с ростом концентрации I_2 . Полученный результат можно объяснить дезактивацией образующихся при протонировании МК карбокатионов за счет образования достаточно устойчивых комплексов [карбокатион· I_2] с молекулой I_2 , как основанием Льюиса, способность которых к редокс-изомерии заметно ниже, чем карбокатионов в свободном виде, или вообще равна нулю, как в случае соединения II.

При более высоких концентрациях НХ и II, по сравнению с приведенными на рис. 2 значениями, и $C_{\text{I}_2}^0 = 0.004 \text{ M}$, образования катиона ферроцена в реакционной смеси так же не наблюдается.

В ацетонитриле йод способен окислять только соединение I. Введение кислоты в реакционную

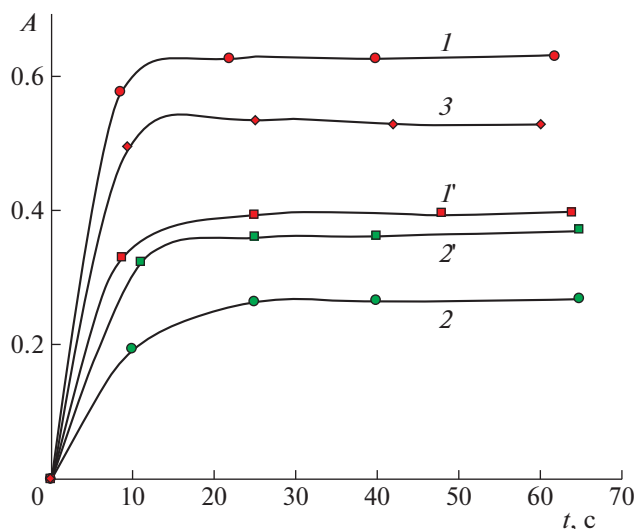


Рис. 3. Кинетические кривые накопления катиона ферроценция при окислении I (1, 1', 3) и III (2, 2') йодом в ацетонитриле; 1, 2 – без добавок НХ; 1', 2' – с добавками НХ, 3 – в смешанном растворителе ацетонитрил–вода (9 : 1); $C_{\text{МК}}^0 = 0.003 \text{ M}$, $C_{\text{I}_2}^0 = 0.004 \text{ M}$, $C_{\text{НХ}}^0 = 0.1 \text{ M}$.

смесь, содержащую I и I₂, приводит к снижению скорости образования катиона ферроценция в отличие от реакции окисления ферроцена йодом в этом растворителе, которая ускоряется в присутствии кислоты (рис. 3). Обращает на себя внимание, что скорость окисления йодом ферроцена в ацетонитриле меньше, чем скорость окисления ацетилферроцена несмотря на то, что последний содержит достаточно сильный электронно-акцепторный заместитель. Причину такого “несоответствия” можно объяснить, если обратиться к механизму окисления ферроцена йодом [7]. Предполагается, что на первичной стадии процесса происходит образование координационно-го комплекса $\text{Cp}_2\text{Fe}\cdot\text{I}_2$ типа КПЗ за счет взаимодействия высших занятых орбиталей МК (d_{xy} , $d_{x^2-y^2}$), локализованных на атоме железа [8], с вакантной разрыхляющей σ^* -орбиталью молекулы окислителя. В соединении I появляется возможность координации молекулы йода не только с атомом металла, но и как основания Льюиса, за счет неподеленных пар электронов, с электрофильным атомом углерода заместителя, что приводит к увеличению его окислительной способности и, как следствие этого, скорости реакции.

Снижение скорости окисления соединения I йодом в ацетонитриле добавками кислоты $W_{\text{Fc}^+\cdot\text{Ox}}$ вместо ее ожидаемого увеличения, скорее всего, обусловлено уменьшением текущей концентрации МК за счет его протонирования. Образующийся при этом карбокатион не склонен к ре-

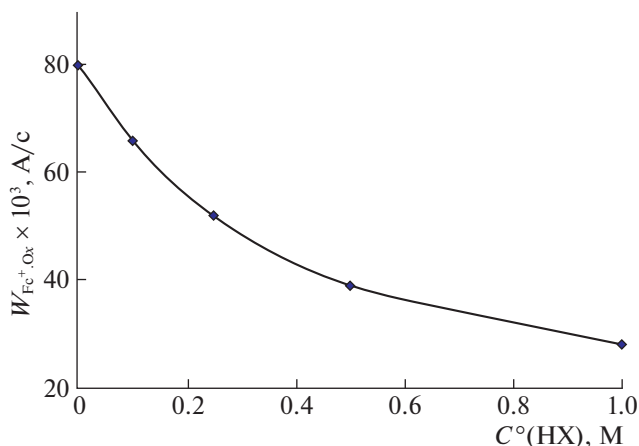
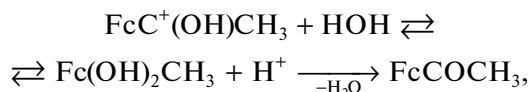


Рис. 4. Влияние концентрации HClO_4 на скорость образования катиона ферроценция при окислении соединения I йодом в ацетонитриле; $C_{\text{МК}}^0 = 0.003 \text{ M}$, $C_{\text{I}_2}^0 = 0.004 \text{ M}$.

докс-изомерии в апротонных высокополярных растворителях вследствие неспецифической и специфической сольватации [2] (рис. 4).

Веским доводом в пользу этого предположения является ускорение реакции при разбавлении ацетонитрила водой (рис. 3), способствующий регенерации соединения I за счет ее реакции с карбокатионом,



что приводит к увеличению текущей концентрации металлокомплекса.

Таким образом, кинетическая кривая накопления катиона ферроценция 1' в присутствии НХ на рис. 3 отражает влияние двух кинетических эффектов – положительного (за счет предполагаемого увеличения скорости реакции МК с I₂) и отрицательного (за счет снижения текущей концентрации МК при его протонировании) на скорость взаимодействия I с йодом.

Приблизительно оценить уменьшение текущей концентрации МК при их протонировании можно, если предположить, что каталитические эффекты кислоты при окислении ферроцена и соединения I в идентичных условиях приблизительно одинаковы. Для ферроцена, по данным приведенным на рис. 3 (кривые 2, 2'), $W_{\text{Fc}^+\cdot\text{Ox}} = W_{\text{Fc}^+\cdot\text{Ox}} \times 1.45$. Тогда, для соединения I (кривая 1), предполагаемое расчетное значение $W_{\text{Fc}^+\cdot\text{Ox}} = 80 \times 10^{-3} \times 1.45 = 116 \times 10^{-3} \text{ A/c}$. По данным эксперимента (кривая 1') $W_{\text{Fc}^+\cdot\text{Ox}} = 46 \times 10^{-3} \text{ A/сек}$, что ~ в 2.5 раза ниже, чем расчетное значение. Это свидетельствует о том, что текущая

концентрация I во столько же раз меньше, чем начальная, вследствие его протонирования, подтверждая тем самым предположение о причине снижения скорости окисления I йодом в присутствии NHX.

Исходя из изложенного, на примере соединения I рассмотрим схемы вероятных процессов, протекающих в реагирующей системе МК + I₂ + NHX в диоксане (схема 1) и в ацетонитриле (схема 2), отражающие влияние растворителя на них.

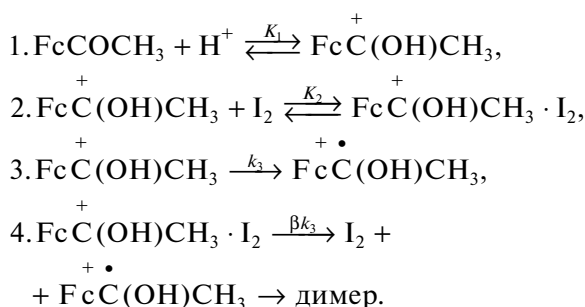


Схема 1. Процессы, протекающие в реагирующей системе МК + I₂ + NHX в диоксане.

Тогда в соответствии со схемой, скорость образования катиона ферроцена $W_{\text{Fc}^+, \text{H}^+}$ в реагирующей системе $\text{FcCOCH}_3 + \text{NHX} + \text{I}_2$ будет равна

$$\begin{aligned} W_{\text{Fc}^+, \text{H}^+} &= (1-x)k_3 \left[\text{FcC}^+(\text{OH})\text{CH}_3 \right] + \\ &+ x\beta k_3 \left[\text{FcC}^+(\text{OH})\text{CH}_3 \cdot \text{I}_2 \right] = \\ &= (1-x)k_3 K_1 [\text{FcCOCH}_3][\text{H}^+] + \\ &+ x\beta k_3 K_1 K_2 [\text{FcCOCH}_3][\text{H}^+][\text{I}_2], \end{aligned} \quad (1)$$

где x — доля карбокатионов, связанных в комплексе с I₂; $(1-x)$ — доля свободных карбокатионов, способных к редокс-изомерии; β — коэффициент, учитывающий способность связанного карбокатиона к редокс-изомерии; $0 \leq \beta < 1$.

При $[\text{H}^+]_0 \gg [\text{I}_2]_0 > [\text{FcCOCH}_3]_0$ текущую концентрацию МК найдем из баланса по его концентрации

$$\begin{aligned} [\text{FcCOCH}_3]_0 &= [\text{FcCOCH}_3] + \\ &+ (1-x) \left[\text{FcC}^+(\text{OH})\text{CH}_3 \right] + \\ &+ x \left[\text{FcC}^+(\text{OH})\text{CH}_3 \cdot \text{I}_2 \right] = \\ &= [\text{FcCOCH}_3](1 + (1-x)K_1[\text{H}^+]_0 + \\ &+ xK_1 K_2[\text{H}^+]_0[\text{I}_2]_0). \end{aligned} \quad (2)$$

Отсюда

$$\begin{aligned} [\text{FcCOCH}_3] &= \\ &= \frac{[\text{FcCOCH}_3]_0}{1 + (1-x)K_1[\text{H}^+]_0 + xK_1 K_2[\text{H}^+]_0[\text{I}_2]_0}. \end{aligned} \quad (3)$$

Поскольку речь идет о начальной скорости процесса, принимаем, что при $t \rightarrow 0$, $[\text{I}_2] \rightarrow [\text{I}_2]_0$.

Тогда

$$W_{\text{Fc}^+, \text{H}^+} = \frac{(1-x)k_3 K_1 [\text{FcCOCH}_3]_0 [\text{H}^+]_0 + x\beta k_3 K_1 K_2 [\text{FcCOCH}_3]_0 [\text{H}^+]_0 [\text{I}_2]_0}{1 + (1-x)K_1[\text{H}^+]_0 + xK_1 K_2[\text{H}^+]_0[\text{I}_2]_0}. \quad (4)$$

При $[\text{I}_2]_0 = 0$, $x = 0$, получаем известное уравнение [1], описывающее скорость редокс-изомерии свободного карбокатиона $W_{\text{Fc}^+, \text{H}^+}^1$,

$$W_{\text{Fc}^+, \text{H}^+}^1 = \frac{k_3 K_1 [\text{FcCOCH}_3]_0 [\text{H}^+]_0}{1 + K_1[\text{H}^+]_0}, \quad (5)$$

которая заведомо выше, чем $W_{\text{Fc}^+, \text{H}^+}$, что полностью соответствует полученным экспериментальным данным (рис. 2).

При $[\text{H}^+] \rightarrow \infty$, $W_{\text{Fc}^+, \text{H}^+}^1$ стремится к предельному значению при протонировании I,

$$W_{\text{Fc}^+, \text{H}^+}^1 = W_{\text{Fc}^+, \text{H}^+}^1_{\text{max}} = k_3 [\text{FcCOCH}_3]_0 \quad (6)$$

подтверждая тем самым данные на рис. 1. При увеличении концентрации I₂, что соответствует стремлению x к единице, уравнение (4) трансформируется в уравнение

$$W_{\text{Fc}^+, \text{H}^+}^2 = \beta k_3 [\text{FcCOCH}_3]. \quad (7)$$

Совершенно очевидно, что при $\beta < 1$, $W_{\text{Fc}^+, \text{H}^+}^2 < W_{\text{Fc}^+, \text{H}^+}^1$. Для соединения II $\beta = 0$, $W_{\text{Fc}^+, \text{H}^+}^2 = 0$, что соответствует результатам кинетических исследований, приведенных на рис. 2.

Отметим, что из монокарбокатионов, образующихся при протонировании соединений I и II, карбокатион $\text{FcC}^+(\text{OH})\text{CH}_3(\text{COCH}_3)$ является менее активным по своей способности к редокс-изомерии вследствие сильного электронно-ак-

цепторного влияния второй ацетильной группы. На этом основании можно предположить, что, будучи координированным с I_2 , он может фактически полностью потерять свою способность к редокс-изомерии, что и наблюдается на опыте (рис. 2). Не исключено, что молекула I_2 дезактивирует две молекулы карбокатиона, в пользу чего говорит тот факт, что ингибирование процесса его редокс-изомерии наблюдается при сравнительно низких концентрациях йода. Если же при протонировании II образуется дикарбокатион [9], то его способность к редокс-изомерии, скорее всего, близка к нулю.

Замена диоксана на ацетонитрил приводит к изменению механизма происходящих в той же самой реагирующей системе процессов:

1. $\text{FcCOCH}_3 + I_2 \xrightleftharpoons{K_1} \text{FcCOCH}_3 \cdot I_2 (KK_1)$,
2. $\text{FcCOCH}_3 \cdot I_2 + H^+ \xrightleftharpoons{K_2} \text{FcCOCH}_3 \cdot I_2 \cdot H^+ (KK_2)$,
3. $\text{FcCOCH}_3 \cdot I_2 \xrightarrow{k_3} \text{FcCOCH}_3^+ + I^- + I^\bullet$,
4. $\text{FcCOCH}_3 \cdot I_2 \cdot H^+ \xrightarrow{k_4} \text{FcCOCH}_3^+ + I^- + H^+ + I^\bullet$,
5. $\text{FcCOCH}_3 + I^\bullet \xrightarrow{k_5} \text{FcCOCH}_3^+ + I^-$,
6. $\text{FcCOCH}_3 + H^+ \xrightleftharpoons{K_6} \text{FcC}^+(\text{OH})\text{CH}_3$,
7. $\text{FcC}^+(\text{OH})\text{CH}_3 + I_2 \xrightleftharpoons{K_7} \text{FcC}^+(\text{OH})\text{CH}_3 \cdot I_2$,
8. $I^- + I_2 \xrightleftharpoons{K_8} I_3^-$.

Схема 2. Процессы, протекающие в реагирующей системе $\text{МК} + I_2 + \text{НХ}$ в ацетонитриле.

Принимается, что схема окисления I в ацетонитриле в целом аналогична схеме окисления ферроцена в этаноле и ацетонитриле, включающей образование трийодида ферроцена при избытке концентрации I_2 по сравнению с МК [7]. Йодистоводородная кислота, как и хлорная, в ацетонитриле диссоциирована нацело [10]. Стадии (2) и (4) учитывают каталитический эффект кислоты, установленный при окислении ферроцена йодом в этаноле [7] и в ацетонитриле (рис. 3).

В соответствии со схемой, скорость образования катиона ферроцена $W_{\text{Fc}^+.\text{Ox}}$ может быть представлена уравнением

$$\begin{aligned} W_{\text{Fc}^+.\text{Ox}} &= k_3(1-x)[KK_1] + k_4(1-x)[KK_2] + \\ &+ k_5(1-x)[\text{FcCOCH}_3][I^\bullet] = \\ &= k_3 K_1(1-x)[\text{FcCOCH}_3][I_2] + \\ &+ k_4 K_1 K_2(1-x)[\text{FcCOCH}_3][I_2][H^+] + \\ &+ k_5(1-x)[\text{FcCOCH}_3][I^\bullet], \end{aligned} \quad (8)$$

здесь $(1-x)$ — доля координационных комплексов, в которые входит непротонированный ацетилферроцен, x — доля производных МК, включающая его протонированную форму.

В реакцию с йодом будет вступать не подвергшийся протонированию МК, текущую концентрацию которого найдем из выражения баланса по его концентрации, в условиях, когда $[H^+]_0 \gg [I_2]_0 > [\text{FcCOCH}_3]_0$:

$$\begin{aligned} [\text{FcCOCH}_3]_0 &= [\text{FcCOCH}_3] + (1-x) \times \\ &\times (K_1[\text{FcCOCH}_3][I_2] + \\ &+ K_1 K_2[\text{FcCOCH}_3][I_2][H^+] + \\ &+ x(K_6[\text{FcCOCH}_3][H^+] + \\ &+ K_6 K_7[\text{FcCOCH}_3][I_2][H^+])). \end{aligned} \quad (9)$$

$$[\text{FcCOCH}_3] = \frac{[\text{FcCOCH}_3]_0}{1 + (1-x)(K_1[I_2]_0 + K_1 K_2[I_2]_0[H^+]_0) + x(K_6[H^+]_0 + K_6 K_7[I_2]_0[H^+]_0)}. \quad (10)$$

Из уравнения (10) следует, принимая во внимание наличие второго слагаемого после единицы в знаменателе уравнения, что текущая концентрация металлокомплекса существенно ниже начальной за счет его протонирования, которое характеризуется априори высокими значениями констант равновесия K_6 и K_7 . Отметим, что связывание I_2 карбокатионом должно

приводить к снижению текущей концентрации и окислителя в реакционной смеси. Это подтверждает высказанное выше предположение о причине ингибирующего влияния кислоты на скорость окисления МК йодом. С учетом выражения (10) для текущей концентрации I, уравнение для скорости реакции $W_{\text{Fc}^+.\text{Ox}}$ будет иметь вид:

$$W_{\text{Fc}^+\cdot\text{Ox}} = \frac{2k_3 K_1 (1-x) [\text{FcCOCH}_3]_0 [\text{I}_2]_0 + 2k_4 K_1 K_2 (1-x) [\text{FcCOCH}_3]_0 [\text{I}_2]_0 [\text{H}^+]_0}{1 + (1-x)(K_1 [\text{I}_2]_0 + K_1 K_2 [\text{I}_2]_0 [\text{H}^+]_0) + x(K_6 [\text{H}^+]_0 + K_6 K_7 [\text{I}_2]_0 [\text{H}^+]_0)}. \quad (11)$$

Коэффициент “2” в числителе уравнения (11) появляется в результате учета выражения для скорости окисления МК атомом йода при нахождении его концентрации, которая считается стационарной.

При $[\text{H}^+]_0 = 0$, $x = 0$ и уравнение (11) преобразуется в уравнение

$$W_{\text{Fc}^+\cdot\text{Ox}}^1 = \frac{2k_3 K_1 [\text{FcCOCH}_3]_0 [\text{I}_2]_0}{1 + K_1 [\text{I}_2]_0}, \quad (12)$$

которое аналогично уравнению для скорости окисления ферроцена йодом в идентичных условиях.

При $[\text{H}^+] \rightarrow \infty$, $x \rightarrow 1$, $W_{\text{Fc}^+\cdot\text{Ox}}^2 \rightarrow 0$, что полностью соответствует экспериментальным данным об ингибирующем влиянии добавок кислоты на скорость окисления I йодом в ацетонитриле, которое тем выше, чем больше концентрация кислоты в реакционной смеси. Полученный результат однозначно свидетельствует в пользу предположения о причинах ингибирующего влияния кислоты на скорость окисления соединения I в указанном растворителе.

В заключение отметим, что результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что, варьируя природу растворителя можно регулировать скорость процессов протекающих в системе $\text{МК} + \text{Ox} + \text{HX}$ независимо от природы МК, которая будет сказываться лишь на конкретных значениях $W_{\text{Fc}^+\cdot\text{H}^+}$ и $W_{\text{Fc}^+\cdot\text{Ox}}$. Природа Ox определяет возможность отдельного исследования процессов протонирования МК и их окисления.

Ацетилферроцен и 1,1'-диацетилферроцен были предоставлены ООО “СИНОР”, за что авторы выражают свою благодарность его научному руководителю Татарникову А.Н.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фомин В.М., Шуклина Н.Н., Климова М.Н. // Журн. физ. химии. 2020. Т. 94. № 9. С. 1–7. <https://doi.org/10.31857/S0044453720090071>
2. Фомин В.М., Маркин А.В., Шуклина Н.Н. // ЖОХ. 2020. Т. 90. Вып. 6. С. 896. <https://doi.org/10.31857/S0044460X20060091>
3. Фомин В.М., Шуклина Н.Н. // Журн. физ. химии. 2022. Т. 96. № 5. С. 1. <https://doi.org/10.31857/S0044453722050119>
4. Фомин В.М., Зайцева К.С., Шарова М.Н. // ЖОХ. 2016. Т. 86. Вып. 5. С. 815. <https://doi.org/10.1134/S1070363216050169>
5. Фомин В.М., Кочеткова Е.С., Ключевский К.В. // Там же. 2018. Т. 88. Вып. 5. С. 805. <https://doi.org/10.1134/S1070363218050183>
6. Фомин В.М., Шуклина Н.Н. // Там же. 2021. Т. 91. № 7. С. 1078. <https://doi.org/10.31857/S0044460X2107012X>
7. Фомин В.М., Маркин А.В., Шуклина Н.Н. // Журн. физ. химии. 2022. Т. 96. № 1. С. 1. <https://doi.org/10.31857/S0044453722010095>
8. Несмеянов А.Н., Кочетков К.А. Методы элементо-органической химии. Железоорганические соединения. М.: Наука, 1983, с. 544
9. Несмеянов А.Н., Шульпин Г.Б., Рыбинская М.И. // Изв. АН СССР. Сер. Хим. 1975. С. 2824.
10. Белл Р. Протон в химии. М.: Мир, 1977. С. 61.