

УДК 547.831.6+547.831.8+547.567.5

*А.В. Белов, В.М. Ничволода, М.В. Колодяжный, К.С. Бурмистров, Т.Е. Бутырина,  
Б.В. Мурашевич*

## ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ ПОТЕНЦИАЛЫ ХИНОИДНЫХ СИСТЕМ ХИНОЛИНОВОГО РЯДА

ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепр

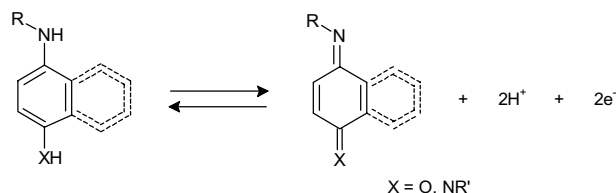
Методом циклической вольтамперометрии определены окислительно-восстановительные потенциалы (ОВП) 5,8-хинолинхинониминов. Исследовано влияние рН среды на значение равновесного потенциала (Е<sub>р</sub>) системы хинонимин-дигидроформа. Редокс процесс 5,8-хинолинхинониминов в диапазоне рН от 0 до 4 протекает с участием трех протонов и двух электронов, что свидетельствует о протонировании гетероциклического атома азота или атома кислорода в N-оксидах и приводят к росту ОВП тозилиминов 5,8-хинолинхинона. Установлено, что указанные хинонимины в условиях электрохимического исследования сначала гидролизуются до соответствующих хинонов, после чего происходит замещение тозильного заместителя в хиноидных ядра на гидроксильную группу. На основе зависимости Е<sub>р</sub>-рН рассчитаны значения стандартных ОВП (Е<sub>0</sub>) хинониминов.

**Ключевые слова:** хиноидные системы, хинолинхинонимины, циклическая вольтамперометрия, редокс-процесс, окислительно-восстановительный потенциал.

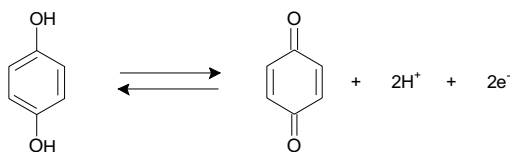
В опубликованных ранее работах [1–6] нами изучались вопросы синтеза, устойчивости и реакционной способности N-тозилзамещенных p-хинонмоно- и дииминов ряда хинолина, а также их 1-оксидов.

Настоящая публикация посвящена изучению окислительно-восстановительных потенциалов хинолинхинониминов.

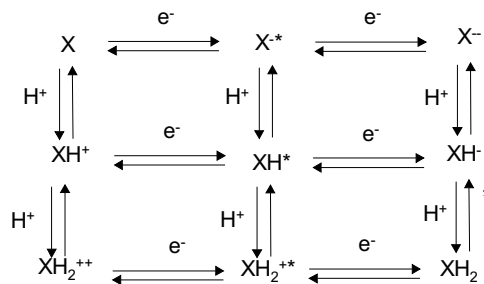
Известно, что хинонимины бензо- и нафторяда образуют с соответствующими дигидропроизводными окислительно-восстановительные системы, равновесие которых в общем виде выражается следующим уравнением [7]:



Эти системы изоэлектронны хорошо изученной паре хинон-гидрохинон:



Общая схема электродных реакций для перечисленных соединений может быть изображена следующим образом [7]:

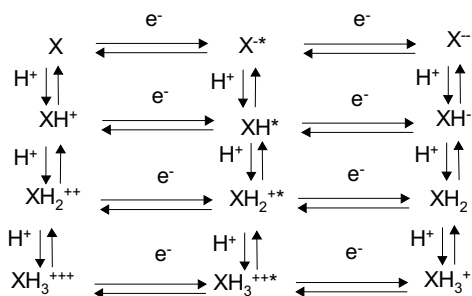


где X – хиноидное соединение, а XH<sub>2</sub> – восстановленная форма хиноидного соединения.

Значения потенциалов и констант равновесия каждого процесса определяются при помощи различных методов, включая и расчетные. Окислительно-восстановительный потенциал, в свою очередь, является функцией электронного строения хиноидных систем и поэтому может служить количественной характеристикой их реакционной способности [8]. Подтверждением этого является ранее обнаруженная для хинонов корреляция между величиной ОВП и скоростью присоединения брома, гидрогенизации, озонлиза и даже противоопухолевой активно-

стью [9]. Исследование способности к разрушению ДНК производными 5,8-хинолинхинона, являющимися аналогами стрептонирина, показало линейную зависимость от потенциала, что позволило прогнозировать структуру потенциальных противоопухолевых препаратов [10].

Одним из наиболее важных свойств 5,8-хинолинхинонов и их иминопроизводных, отличающих эти соединения от соответствующих аналогов бензо- и нафторяда, является наличие гетероциклического основного атома азота, который способен протонироваться и, тем самым, оказывать непосредственное влияние на ход окислительно-восстановительного (редокс) процесса при различных значениях pH. Поэтому схема электродных реакций хиноидных систем хинолинового ряда включает дополнительные возможные превращения, связанные с протонированием по гетероциклическому N-атому, и имеет следующий вид:

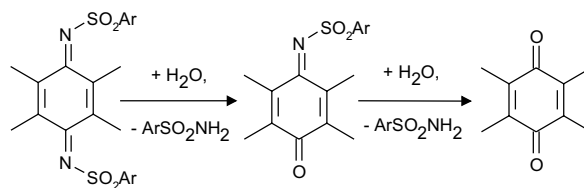


Ранее было показано [8], что при pH > 1 отсутствует протонирование азота (кислорода) хиноидной системы. Поэтому протонированная форма (QH<sup>+</sup>) хиноидного соединения в вышеуказанной схеме реакций представляет собой результат протонирования по гетероциклическому атому азота или атому кислорода в N-оксидах.

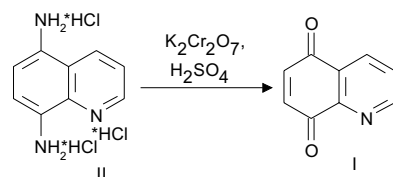
В данном исследовании представлялось важным рассмотреть влияние гетероциклического атома азота, его модификации (основание, N-оксид), а также числа тозилиминогрупп на значения ОВП хиноидных систем хинолинового ряда в сравнении с таковыми для их структурных аналогов – производных 2,3-диметил-1,4-бензохинона и 1,4-нафтохинона.

Для определения ОВП был использован метод тонкослойной циклической вольтамперометрии, который основан на проведении измерений потенциалов путем многократного последовательного окисления и восстановления (циклирования) субстрата в водных растворах при разных значениях pH. При этом в условиях эксперимента хинондиимины гидролизуются до хинонмоноиминов, которые в свою очередь гидролизуются до соответствующих хинонов, потенциалы которых также могут быть зарегист-

рированы [11]:

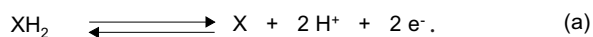


Исходными объектами для электрохимического исследования были соответствующие дигидроформы хинониминов [1–6], а также 5,8-хинолинхинон (I). Последний был получен по разработанному оригинальному методу, заключающемуся в окислении тригидрохлорида 5,8-диаминохинолина (II) бихроматом калия в серной кислоте:

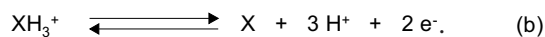


Необходимые для сравнения структурные аналоги – N-Тозил-2,3-диметил-1,4-аминофенол (III) и N-тозил-1,4-аминонафтол (IV), синтезировали по известным ранее методикам [12].

В ходе выполненной работы установлено, что для N-тозил-2,3-диметил-1,4-бензохинонимина, N-тозил-1,4-нафтохинонимина, 1-оксида N-тозил-5,8-хинолинхинон-5-имины и N,N'-дитозил-5,8-хинолинхинондиимины зависимость потенциала является линейной с наклоном -58 мВ/ед. pH (рис. 1), что свидетельствует о протекании редокс процесса с участием двух протонов и двух электронов. Такой же вид имеют зависимости E–pH для продуктов гидролиза первых трех хинониминов – 2,3-диметил-1,4-бензохинона, 1,4-нафтохинона и 1-оксида 5,8-хинолинхинона. Для вышеуказанных систем редокс процесс может быть представлен уравнением (а):



При определении ОВП N-тозил-5,8-хинолинхинон-5-имины в диапазоне pH от 0 до 3 происходит протонирование восстановленной формы по гетероциклическому атому азота, вследствие чего наклон прямой E–pH составляет ~ -87 мВ/ед. pH (рис. 2), а уравнение редокс процесса принимает вид (b):



Увеличение pH (от 4 до 7) приводит к протеканию редокс процесса с участием двух протонов и двух электронов (dE/dpH ~ -58 мВ/ед. pH). Рассчитанное при этом значение pK<sub>a</sub> для

N-тозил-5-амино-8-гидроксихинолина составило  $3,19 \pm 0,43$ .

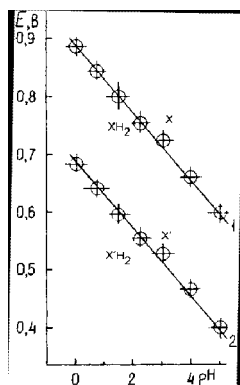


Рис. 1. Зависимость равновесного потенциала от рН для 1-оксида N-тозил-5,8-хинолинхинон-5-имина (1) и образующегося при его гидролизе в электрохимической ячейке 1-оксида 5,8-хинолинхинона (2)

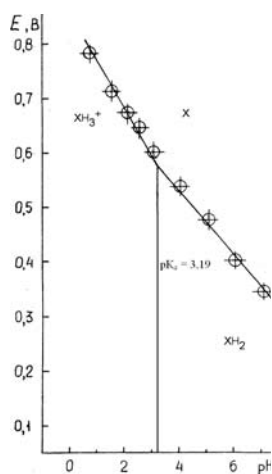


Рис. 2. Зависимость равновесного потенциала от рН для N-тозил-5,8-хинолинхинон-5-имина

На рис. 3 изображена линейная зависимость потенциала 5,8-хинолинхинона от рН, на которой имеется два излома. До первого излома (область рН от 0 до ~1)  $dE/dpH$  составляет примерно  $-58$  мВ/ед. рН. С ростом рН до 4,5–5,0 прямая имеет наклон около  $-87$  мВ/ед. рН. После второго излома при дальнейшем увеличении рН (до ~9)  $dE/dpH$  опять принимает значение  $-58$  мВ/ед. рН. Такой вид графика зависимости потенциала от рН связан с протонированием 5,8-хинолинхинона ( $pK_a=0,91 \pm 0,09$ ) и его восстановленной формы ( $pK_a=4,67 \pm 0,19$ ). В области низких значений рН окислительно-восстановительную систему образуют протонированные по атому азота 5,8-хинолинхинон и его восстановленная форма:

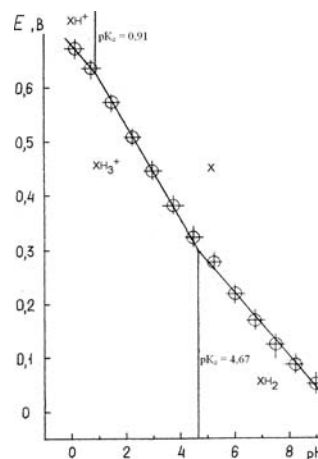
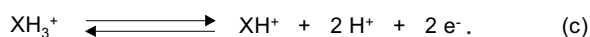


Рис. 3. Зависимость равновесного потенциала от рН для 5,8-хинолинхинона

Увеличение рН приводит к прохождению редокс процесса, описываемого уравнениями (b) и (a) соответственно.

На рис. 4–6 изображены циклические вольтамперные кривые хинониминов хинолинового ряда, записанные при фиксированных значениях рН.

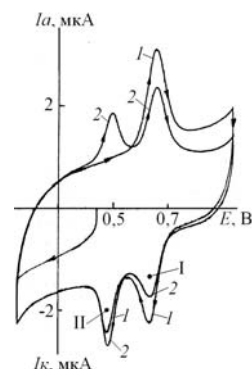
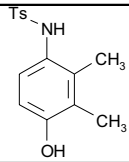
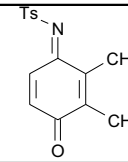
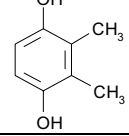
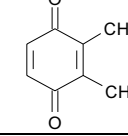
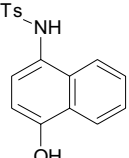
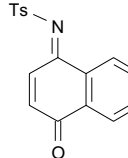
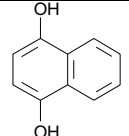
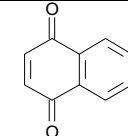
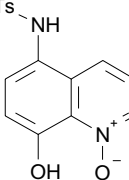
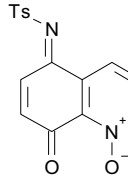
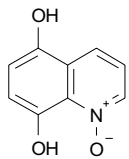
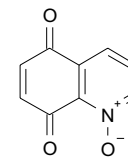
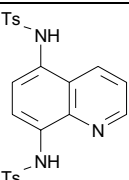
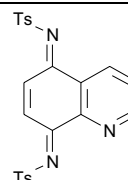
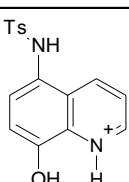
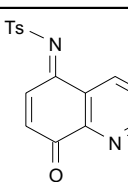
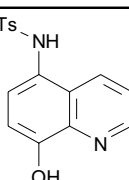
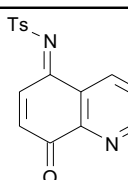


Рис. 4. Циклическая вольтамперная кривая N-тозил-5,8-хинолинхинон-5-имина (рН=2,53): 1, 2 – номера последовательных циклов; I, II – пики окисления-восстановления соответственно хинонимина и хинона

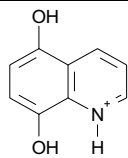
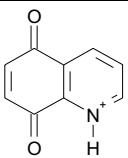
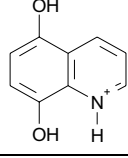
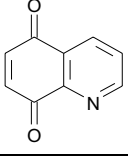
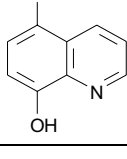
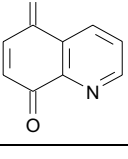
Исследуемые хинолинхинонимины, за исключением N,N'-дитозил-5,8-хинолинхинондиимина, легко гидролизуются и способны образовывать обратимые окислительно-восстановительные системы только в кислых средах. Так, например, не удалось измерить равновесный ОВП 1-оксида N-тозил-5,8-хинолинхинон-5-имина при значениях рН более 5,0 – на вольтамперных кривых пик восстановления хинонимина отсутствует уже на первом цикле.

На основании зависимостей  $E-pH$  рассчитаны значения стандартных ОВП ( $E_0$ ) хиноидных систем бензо-, нафто- и хинолинового ряда, которые приведены в таблице.

Окислительно-восстановительные потенциалы хиноидных систем бензо-, нафто- и хинолинового ряда

| Дигидро-форма   | Окисленная форма  | Диапазон pH, фигурирующий в расчетах (число точек) | $E_0$ (девиация потенциала), В; ОВ-процесс |
|---|---|--|--|
| 1   | 2   | 3  | 4  |
|    |    | 0,01–9,00<br>(10)                                  | 0,787 ( $\delta=7,4$ мВ);<br>$2H^+, 2e^-$  |
|    |    | 0,01–9,00<br>(10)                                  | 0,604 ( $\delta=5,8$ мВ);<br>$2H^+, 2e^-$  |
|    |    | 0,04–9,00<br>(10)                                  | 0,660 ( $\delta=5,3$ мВ);<br>$2H^+, 2e^-$  |
|   |   | 0,04–5,00<br>(6)                                   | 0,484 ( $\delta=5,5$ мВ);<br>$2H^+, 2e^-$  |
|  |  | 0,05–5,02<br>(7)                                   | 0,889 ( $\delta=2,6$ мВ);<br>$2H^+, 2e^-$  |
|  |  | 0,05–5,02<br>(7)                                   | 0,690 ( $\delta=6,0$ мВ);<br>$2H^+, 2e^-$  |
|  |  | 0,01–9,00<br>(13)                                  | 0,939 ( $\delta=6,1$ мВ);<br>$2H^+, 2e^-$  |
|  |  | 0,74 – 3,03<br>(5)                                 | 0,856 ( $\delta=10,1$ мВ);<br>$3H^+, 2e^-$ |
|  |  | 4,02–7,06<br>(4)                                   | 0,763 ( $\delta=9,5$ мВ);<br>$2H^+, 2e^-$  |

Продолжение таблицы

| 1   | 2   | 3                | 4  |
|---|---|------------------|--|
|  |  | 0,16–0,75<br>(2) | 0,681 ( $\delta=2,1$ мВ);<br>$2\text{H}^+$ , $2\text{e}^-$ |
|  |  | 1,50–4,49<br>(5) | 0,707 ( $\delta=2,5$ мВ);<br>$3\text{H}^+$ , $2\text{e}^-$ |
|  |  | 5,25–8,99<br>(6) | 0,570 ( $\delta=5,5$ мВ);<br>$2\text{H}^+$ , $2\text{e}^-$ |

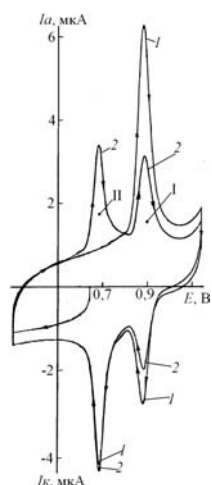


Рис. 5. Циклическая вольтамперная кривая 1-оксида N-тозил-5,8-хинолинхинон-5-имина (рН=0,05): 1, 2 – номера последовательных циклов; I, II – пики окисления-восстановления соответственно хинонимина и хинона

При сравнении значений стандартных ОВП исследуемых соединений было установлено, что замена метильных групп в хиноидном ядре N-тозил-2,3-диметил-1,4-бензохинонимина конденсированным бензольным кольцом приводит к уменьшению ОВП хиноидной системы на 0,127 В. Этот факт свидетельствует о том, что конденсированный ароматический цикл в результате  $\pi^*_{\text{C=O}}-\pi_{\text{Ar}}$  и  $\pi^*_{\text{C=N}}-\pi_{\text{Ar}}$  сопряжения является  $\pi$ -донором электронов для хиноидной системы.

Замена группы  $\text{C}^8-\text{H}$  в N-тозил-1,4-нафтохинонимине атомом азота, обладающим отрицательным индукционным эффектом, усиливает электронноакцепторные свойства хиноидного кольца, которые становятся более выраженными при протонировании. Поэтому ОВП N-то-

зил-5,8-хинолинхинон-5-имина больше ОВП N-тозил-1,4-нафтохинонимина на 0,103 В. Модификация гетероциклического N-атома N-тозил-5,8-хинолинхинон-5-имина в группировку  $\text{N}^+-\text{O}^-$  увеличивает потенциал на 0,126 В. Замена атома кислорода карбонильной группы  $\text{C}^5=\text{O}$  в 5,8-хинолинхиноне тозилиминогруппой приводит к увеличению ОВП системы на 0,193 В. При замене обоих карбонильных атомов кислорода в 5,8-хинолинхиноне тозилиминогруппами ОВП системы возрастает на 0,369 В.

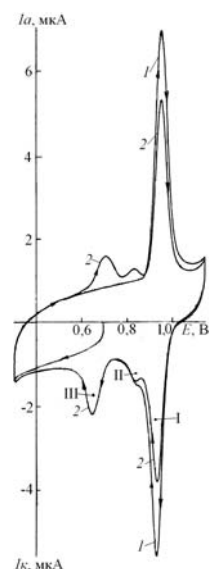


Рис. 6. Циклическая вольтамперная кривая N,N'-дитозил-5,8-хинолинхинондиимина (рН=0,01): 1, 2 – номера последовательных циклов; I, II, III – пики окисления-восстановления соответственно хинондиимина, хинонмоноимина и хинона

Таким образом, ОВП хинониминов увели-

чивается в следующем ряду:

По значениям стандартных ОВП тозил-имины 5,8-хинолинхинона являются соединениями с ярко выраженными электроноакцепторными свойствами хиноидного кольца, что обуславливает их высокую реакционную способность.

#### Экспериментальная часть

5,8-Хинолинхинон (I). Растворяли 2,68 г (0,01 моль) тригидрохлорида 5,8-диаминохинолина (II) [3] в 75 мл 30%-ной серной кислоты, нагретой до 60–65°C. Перемешивали 10–15 мин для удаления выделившегося хлороводорода, образовавшийся раствор охлаждали до 20–25°C и обрабатывали 6,8 г бихромата калия. Образующийся хинон экстагировали хлороформом (3г100 мл), объединенные хлороформные экстракты сушили 5 часов над прокаленным сульфатом натрия и упаривали в вакууме при нагревании до 30–35°C. Получали 0,7 г (выход 44%) продукта реакции в виде мелких горчично-желтых кристаллов с  $T_{пл}=119–121^{\circ}\text{C}$  (разл.).

Эксперименты по определению ОВП хиноидных систем проводили в ячейке с двумя плоскопараллельными пирографитовыми электродами общей площадью 2,26 см<sup>2</sup>. Эффективная толщина зазора составляла 18 мкм. В качестве вспомогательного электрода и электрода сравнения использовали хлорсеребряные электроды ЭВЛ-1М1. Значения потенциалов приведены относительно стандартного водородного электрода при 22±1°C. Восстановленные формы хинониминов и 5,8-хинолинхинон вводили в ячейку в виде тонкой пленки, осажденной на поверхности пирографитовых электродов из растворов в ДМФА. Толщина пленки – несколько молекулярных слоев. Плотность исследуемых соединений в пленке составляла от 4,4·10<sup>-9</sup> до 5,5·10<sup>-9</sup> моль/см<sup>2</sup>.

Фоновым электролитом служил 0,6 н. раствор сульфата натрия. Для поддержания желаемого значения рН в раствор добавляли универсальную буферную смесь уксусной, фосфорной и борной кислот (рН=2,00–12,00). Величину рН измеряли на универсальном иономере ЭВ-74. Общая ионная сила раствора равнялась 1,0. Фоновый раствор готовили на бидистиллированной воде с использованием реактивов квалификации не ниже „х.ч.“.

Циклические вольт-амперные кривые регистрировали на двухкоординатном самописце Н307/1. Скорость развертки потенциала 1 мВ/с задавали при помощи универсального полярографа ПУ-1. Потенциалы измеряли цифровым вольтметром Ш300.

Значения потенциалов редокс-перехода при данном значении рН определяли по расположению пиков окисления-восстановления на кривых.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов А.В., Ничволода В.М. Хинонимины с конденсированным моноазиновым ядром. I. Синтез и гидрохлорирование N-(*n*-толилсульфонил)-5,8-хинолинхинон-5-имина // Журн. орган. химии. – 2004. – Т.40. – № 1. – С.102-105.
2. Белов А.В., Ничволода В.М. Хинонимины с конденсированным моноазиновым ядром. II. Взаимодействие N-(*n*-толилсульфонил)-5,8-хинолинхинон-5-иминов с *n*-толуолсульфинатом натрия // Журн. орган. химии. – 2004. – Т.40. – № 3. – С.436-438.
3. Белов А.В., Ничволода В.М. N,N'-Дитозил-5,8-хинолинхинондиимин и его взаимодействие с HCl // Вопр. химии и хим. технологии. – 2004. – № 6. – С.41-43.
4. Белов А.В., Ничволода В.М. Хинонимины с конденсированным моноазиновым ядром. III. Синтез и реакционная способность производных N-тозил-5,8-хинолинхинон-8-имина // Журн. орган. химии. – 2005. – Т.41. – № 1. – С.124-127.
5. Реакции N-тозил-5,8-хинолинхинон-5-иминов с первичными и вторичными аминами / Белов А.В., Ничволода В.М., Белов В.В., Торопин Н.В., Бурмистров К.С., Берзенина О.В. // Вопр. химии и хим. технологии. – 2008. – № 4. – С.18-21.
6. I-оксиды N-тозил-5,8-хинолинхинон-5-иминов / Белов А.В., Гундрова Т.В., Белов В.В., Ничволода В.М. // Вопр. химии и хим. технологии. – 2010. – № 4. – 9-15.
7. Реакционная способность хинониминов и их аналогов / Бурмистров К.С., Торопин Н.В., Вакуленко А.В., Юрченко А.Г., Марков В.И. // Вопр. химии и хим. технологии. – 2000. – № 2. – С.30-33.
8. Бурмистров К.С. Синтез и реакционная способность хинониминов и их аналогов: Дисс...докт. хим. наук: 02.00.03. – Днепропетровск, 1990. – 445 с.
9. Gupta S.P. Quantitative Structure-Activity Relation Studies on Anticancer Drugs // Chem. Rev. – 1994. – Vol.94. – № 6. – P.1507-1551.
10. Shikh I.A., Johnson F., Grollman A.M. Streptonigrin. 1. Structure-Activity Relationships among Simple Bicyclic Analogues. Rate Dependence of DNA Degradation on Quinone Reduction Potential // J. Med. Chem. – 1986. – Vol.29. – № 8. – P.1329-1340.
11. Электрохимические свойства N-ацилзамещенных хинондииминов и монохинониминов / Петрова С.А., Бурмистров К.С., Колодяжный М.В., Ксенжек О.С. // Электрохимия. – 1979. – Т.15. – № 11. – С.1666-1670.
12. Ничволода В.М. Нуклеофильное замещение в N-арилсульфонил-1,4-бензохинонмоноиминах // Вопр. химии и хим. технологии. – 2001. – № 3. – С.29-32.

Поступила в редакцию 20.12.2016

REDOX POTENTIALS OF QUINOID SYSTEMS OF QUINOLINE SERIES

A.V. Belov, V.M. Nichvoloda, M.V. Kolodyazhny, K.S. Burmistrov, T.E. Butyrina, B.V. Murashevich

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

The redox potentials of 5,8-quinoline quinonimines have been determined in this work by means of cyclic voltammetry method using a pyrographite electrode. The influence of pH on the value of equilibrium potential ( $E_{eq}$ ) of the quinonimin-dihydroform system has been investigated. The redox process of 5,8-quinoline quinonimines in the pH range of 0 to 4 proceeds with the participation of three protons and two electrons which indicates the protonation of the heterocyclic nitrogen atom or oxygen atom in N-oxides. This results in an increase in the redox potentials of tosylimines of 5,8-quinolinequinones. It was established that the quinonimines under consideration are initially hydrolyzed under the conditions of electrochemical research forming respective quinones; then the substitution of tosyl-groups in quinone nucleus for to the hydroxyl group occurs. On the basis of the obtained dependences  $E_{eq}$  versus pH, the standard values of equilibrium potentials of quinonimines have been calculated.

**Keywords:** quinoid systems; quinolinequinonimine; cyclic voltammetry; redox process; redox potentials.

REFERENCES

1. Belov A.V., Nichvoloda V.M. Khinoniminy s kondensirovannym monoazinovym yadrom. I. Sintez i gidroklorirovanie N-(p-tolilsul'fonil)- 5,8-hinolinhinon- 5-imina [Quinone imines with a fused azine ring: I. Synthesis and hydrochlorination of 5-(p-tolylsulfonylimino) quinolin- 8-one]. *Zhurnal Organicheskoi Khimii*, 2004, vol. 40, pp. 102-105. (in Russian).
2. Belov A.V., Nichvoloda V.M. Khinoniminy s kondensirovannym monoazinovym yadrom. II. Vzaimodeistvie N-(p-tolilsul'fonil)- 5,8-hinolinhinon- 5-iminov s p-toluolsul'finatom natriya [Quinone imines with a fused azine ring: II. Reaction of 5-(p-tolylsulfonylimino) quinoline- 8(5H)-ones with sodium p-toluenesulfinate]. *Zhurnal Organicheskoi Khimii*, 2004, vol. 40, pp. 436-438. (in Russian).
3. Belov A.V., Nichvoloda V.M. N,N'-Ditozil-5,8-khinolinkhinondiimin i ego vzaimodeistvie s HCl [N,N'-ditosyl- 5,8-quinolinequinonimine and its reaction with HCl]. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2004, vol. 6, pp. 41-43. (in Russian).
4. Belov A.V., Nichvoloda V.M. Khinoniminy s kondensirovannym monoazinovym yadrom. III. Sintez i reaktivnaya sposobnost' proizvodnykh N-tozil- 5,8-hinolinhinon- 8-imina [Quinone imines with a fused azine ring: III. Synthesis and reactivity of 8-p-tolylsulfonylimino- 5,8-dihydroquinolin- 5-one derivatives]. *Zhurnal Organicheskoi Khimii*, 2005, vol. 41, pp. 124-127. (in Russian).
5. Belov A.V., Nichvoloda V.M., Belov V.V., Toropin N.V., Burmistrov K.S., Berzenina O.V. Reaktsii N-tozil- 5,8-hinolinhinon- 5-iminov s pervichnymi i vtorichnymi aminami [Reaction of N-tosyl-5,8-quinolinequinone-5-imines with primary and secondary amines]. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2008, vol. 4, pp. 18-21. (in Russian).
6. Belov A.V., Gundrova T.V., Belov V.V., Nichvoloda V.M. 1-oksidy N-tozil- 5,8-khinolinhinon- 5-iminov [1-Oxides of N-tosyl- 5,8-quinolinequinone- 5-imines]. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2010, vol. 4, pp. 9-15. (in Russian).
7. Burmistrov K.S., Toropin N.V., Vakulenko A.V., Yurchenko A.G., Markov V.I. Reaktivnaya sposobnost' khinoniminov i ikh analogov [Reactivity of quinonimines and its analogues]. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2000, vol. 2, pp. 30-33. (in Russian).
8. Burmistrov K.S., *Sintez i reaktivnaya sposobnost' khinoniminov i ikh analogov* [Synthesis and reactivity of quinonimines and its analogues]: thesis for the degree of Doctor of Chemical Sciences, Dnepropetrovsk, 1990. (in Russian).
9. Gupta S.P. Quantitative structure-activity relation studies on anticancer drugs. *Chemical Reviews*, 1994, vol. 94, pp. 1507-1551.
10. Shikh I.A., Johnson F., Grollman A.M. Streptonigrin. I. Structure-activity relationships among simple bicyclic analogues. Rate dependence of DNA degradation on quinone reduction potential. *Journal of Medicinal Chemistry*, 1986, vol. 29, pp. 1329-1340.
11. Petrova S.A., Burmistrov K.S., Kolodyazhny M.V., Ksenzhek O.S. Elektrokhimicheskie svoistva N-atsilzameshchennykh khinondiiminov i monokhinoniminov [Electrochemical properties of N-acylsubstituted quinondiimines and monoimines]. *Elektrokhimiya*, 1979, vol. 15, pp. 1666-1670. (in Russian).
12. Nichvoloda V.M. Nukleofil'noe zameshchenie v N-arilsul'fonil- 1,4-benzokhinonmonoiminakh [Nucleophilic substitution in N-arylsulfonyl- 1,4-benzoquinonemonoimines]. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2001, vol. 3, pp. 29-32. (in Russian).