

УДК 547.539.04

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАМЕЩЕННЫХ АРИЛИОДИДОВ С ПРОТОННЫМИ КИСЛОТАМИ**

В.К. Чайковский, А.А. Функ, Н.С. Козлова, Т.С. Кец\*

Томский политехнический университет

\*Томский государственный педагогический университет

E-mail: clg@mail.ru

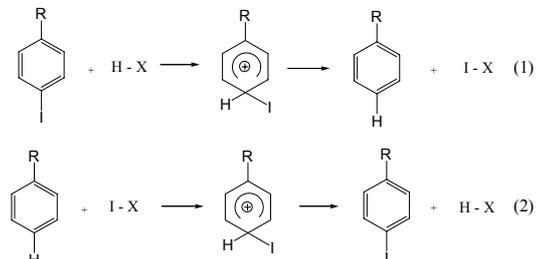
С использованием программы GAUSSIAN'98W проведены расчеты свободных энергии Гиббса, энтальпий активации и свободных энергии активации прямой и обратной реакций взаимодействия замещенных арилиодидов с минеральными кислотами. Осуществлена экспериментальная проверка полученных теоретических результатов. Показано, что HI проявляет сильное дезиодирующее действие только на соединения с повышенной  $\pi$ -электронной плотностью. HCl, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> и H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> частично дезиодируют только 4-иоданилин.

Несмотря на немалое количество публикаций по процессам, сопровождающим превращения арилиодидов под действием протонных кислот, в этом разделе химии иодпроизводных остается еще много неясного. В литературных источниках приводятся весьма противоречивые сведения по поведению ароматических иодпроизводных в кислых средах. В первую очередь это относится к взаимодействию арилиодидов с иодистоводородной кислотой. Например, до сих пор классическим объяснением невозможности иодирования ароматических соединений молекулярным иодом является то, что иодистый водород, выделяющийся в процессе реакции, восстанавливает образующийся арилиодид [1–3]. Из чего следует, что возникающую при иодировании иодистоводородную кислоту, необходимо каким-либо образом удалять. Для этого используют окислители, которые могут переводить HI в соединения с электроположительным иодом, или такие вещества, как соли серебра, которые удаляют HI из реакционной среды в виде иодида серебра [4]. С другой стороны, по результатам исследований А. Кекуле, проведенным еще в XIX в., арилиодиды не восстанавливаются HI при кипячении с ее избытком в течение нескольких часов [5]. И, наконец, имеется мнение, что замещение иода в иодаренах в присутствии сильных кислот не что иное, как процесс электрофильного замещения иода на протон (протодезиодирование) [6, 7].

Для более глубокого понимания процессов иодирования и дезиодирования ароматических соединений нами были проведены термодинамические расчеты прямой (дезиодирование) (1) и обратной (иодирование) (2) реакций взаимодействия 4-иоданилина (**1a**), иодбензола (**2a**) и 1-иод-4-нитробензола (**3a**) с HI, HCl, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> и H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> полуэмпирическим (PM3) методом с использованием пакета программ GAUSSIAN'98W [8] и осуществлена экспериментальная проверка полученных результатов (схема 1).

Расчет свободных энергий Гиббса ( $\Delta G$ ), энтальпий и свободных энергий активации ( $\Delta H^\ddagger$ ,  $\Delta G^\ddagger$ ) реакций взаимодействия соединений **1a–3a** с HI показал, табл. 1, реакция (1), что относительно невысокая энергия переходного состояния и отрицательные значения  $\Delta G$  реакции могут способство-

вать дезиодированию 4-иоданилина **1a**, но уже для иодбензола **2a** активационный барьер возрастает примерно в 1,3, а для иоднитроарена **3a** в 1,5 раза, что делает их дезиодирование затруднительным. О невозможности протекания процесса в обратном направлении (2), т. е. иодирования анилина, бензола и нитробензола молекулярным иодом, говорят большие активационные барьеры и положительные значения свободной энергии  $\Delta G$  обратной реакции для всех трех аренов (табл. 2). При взаимодействии иодароматических соединений **1a–3a** с хлористоводородной, ортофосфорной и серной кислотами более вероятным становится протекание обратной реакции (2) и менее вероятным дезиодирование иодарена.



Где: R = NH<sub>2</sub> (**1a,б**), H (**2a,б**), NO<sub>2</sub> (**3a,б**); X = I<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, HSO<sub>4</sub><sup>-</sup>

Схема 1

Для экспериментального подтверждения полученных результатов нами было исследовано поведение соединений **1a–3a** в уксуснокислых растворах иодистоводородной (57,5 %, 1,717 кг/м<sup>3</sup>), хлористоводородной (34,0 %, 1,700 г/см<sup>3</sup>), ортофосфорной (84,0 %, 1,834 г/см<sup>3</sup>) и серной (95,0 %, 1,835 г/см<sup>3</sup>) кислот.

Все протонные кислоты использовались с двукратным мольным избытком. Температура реакции, время и растворитель были выбраны для максимального приближения условий процесса к условиям реакции иодирования, которую чаще всего проводят в уксусной кислоте в интервале температур 25...120 °С. Реакционную массу кипятили с обратным холодильником в течение 5 ч.

Хромато-масс-спектрометрический (ХМС) анализ продуктов взаимодействия иодаренов с ио-

дистоводородной кислотой показал, что из трех исследуемых соединений значительному деиодированию подвергся только 4-иоданилин **1a**. По результатам ХМС конверсия субстрата **1a** составила 84,03 %. Главными продуктами реакции оказались анилин (78,00 %) (**1б**) и ацетанилид (6,03 %) (**1в**), табл. 3.

**Таблица 1.** Свободные энергии Гиббса ( $\Delta G$ ), энтальпии ( $\Delta H^\circ$ ) и свободные энергии активации ( $\Delta G^\ddagger$ ) реакций деиодирования при взаимодействии арилиодидов с протонными кислотами, реакция (1), кДж/моль

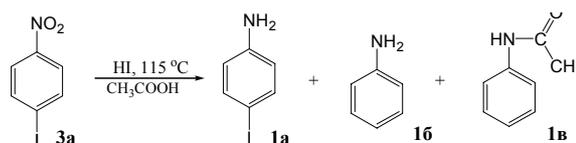
R	H-X	$\Delta H^\circ$	$\Delta G^\ddagger$	$\Delta G$
NH <sub>2</sub>	H-I	337,98	356,07	-111,87
H	H-I	436,48	453,00	-112,19
NO <sub>2</sub>	H-I	516,30	531,60	-116,07
NH <sub>2</sub>	H-Cl	600,53	615,89	47,38
H	H-Cl	699,03	712,82	47,07
NO <sub>2</sub>	H-Cl	778,85	791,42	43,18
NH <sub>2</sub>	H-H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	615,42	621,02	100,81
H	H-H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	713,90	717,95	100,50
NO <sub>2</sub>	H-H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	793,74	796,55	96,61
NH <sub>2</sub>	H-H <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	522,89	523,64	105,96
H	H-HSO <sub>4</sub>	621,36	620,57	105,64
NO <sub>2</sub>	H-HSO <sub>4</sub>	701,20	699,18	101,76

**Таблица 2.** Свободные энергии Гиббса ( $\Delta G$ ), энтальпии ( $\Delta H^\circ$ ) и свободные энергии активации ( $\Delta G^\ddagger$ ) реакций иодирования реагентами I-X, реакция (2), кДж/моль

R	I-X	$\Delta H^\circ$	$\Delta G^\ddagger$	$\Delta G$
NH <sub>2</sub>	I-I	444,39	467,90	111,87
H	I-I	543,50	565,19	112,19
NO <sub>2</sub>	I-I	626,85	647,67	116,07
NH <sub>2</sub>	I-Cl	541,81	568,51	-47,38
H	I-Cl	640,91	665,75	-47,07
NO <sub>2</sub>	I-Cl	724,27	748,24	-43,18
NH <sub>2</sub>	I-H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	509,66	520,21	-100,81
H	I-H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	608,76	617,45	-100,50
NO <sub>2</sub>	I-H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	692,12	699,94	-96,61
NH <sub>2</sub>	I-OSO <sub>3</sub> H	415,86	417,68	-105,96
H	I-OSO <sub>3</sub> H	514,96	514,93	-105,64
NO <sub>2</sub>	I-OSO <sub>3</sub> H	598,32	597,42	-101,76

При нагревании ариламина **1a** с HCl или H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> деиодирование происходило в значительно меньшей степени. В смеси продуктов, по данным препаративной тонкослойной хроматографии, помимо исходного вещества **1a** (68...71 %) был обнаружен анилин **1б** (10...12 %) и ацетанилид **1в** (17...19 %), а в присутствии H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> кроме указанных продуктов из реакционной смеси препаративно была выделена сульфаниловая кислота.

Иодбензол **2a** при взаимодействии с HI превратился в бензол (**2б**) только на 0,24 %, но 1-иод-4-нитробензол **3a**, вопреки теоретическим расчетам, подвергся большей общей конверсии (2,5 %) с образованием 4-иоданилина (**1a**), анилина (**1б**) и ацетанилида (**1в**).



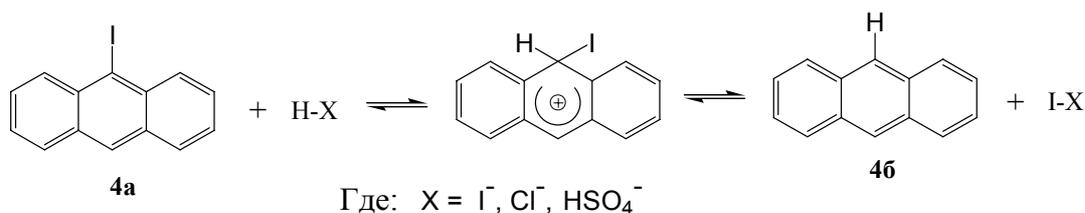
Мы предполагаем, что в нитроарене **3a** первоначально восстанавливалась нитрогруппа, а уже затем происходило деиодирование образовавшегося ариламина **1a**. При замене иодистоводородной кислоты на хлористоводородную, серную или ортофосфорную, деиодирование субстрата **3a** не фиксировалось.

**Таблица 3.** Хромато-масс-спектрометрический анализ продуктов взаимодействия иодароматических соединений с HI в уксусной кислоте (120 °C, 5 ч)

Субстрат	Продукты реакции	Содержание в смеси, %	Данные масс-спектрометрии, m/z (I отн., %)
 <b>1a</b>	Анилин	78,00	93(M+, 100), 39(12,5), 41(5), 52(7), 63(7), 66(41), 78(3)
	Ацетанилид	6,03	135(M+, 30), 43(17), 51(5), 66(16), 77(4), 93(100)
	4-Иоданилин	15,95	219 (M+, 100), 39(20), 65(60), 74(2), 92(59), 109(7)
 <b>2a</b>	Бензол	0,24	78(M+, 100), 15(2), 26(4), 28(3), 37(4), 39(12), 49(4), 51(23), 61(1), 63(5), 74(6), 76(6)
	Иодбензол	99,76	204(M+, 75), 27(3), 38(3), 51(28), 77(100), 127(8)
 <b>3a</b>	Анилин	0,84	93(M+, 100), 39(12), 46(8), 52(5), 63(5), 66(41), 77(2), 105(5), 120(1)
	Ацетанилид	0,19	135(M+, 23), 43(22), 66(18), 77(5), 93(100)
	4-Иоданилин	1,47	219 (M+, 100), 39(24), 52(9), 65(75), 74(2), 92(97), 109(12), 127(9)
	1-Иод-4-нитробензол	97,5	249(M+, 100), 30(7), 50(37), 76(83), 92(24), 127(5), 191(6), 203(50), 219(7)

Аннелированный полициклический углеводород – антрацен (**4б**), несмотря на его высокую реакционную способность в реакциях электрофильного замещения, образует 9-иодантрацен (**4a**) с большим трудом [9]. Действием хлорида иода полицикл **4a** не иодируется, но хлорируется [10, 11], а при действии реагентов гипоиодитного характера преимущественно образует антрахинон [7].

Проведенные нами термодимические расчеты, конечно же, не дали в полной мере ответы на все вопросы, касающиеся антрацена и его галогенпроизводных, однако они показали, что иодарен **4a** в



**Схема 2**

кислых средах более лабилен, чем иоданилин **1a**, особенно под действием HI (Схема 2, табл. 3, 4).

**Таблица 4.** Свободные энергии Гиббса ( $\Delta G$ ), энтальпии ( $\Delta H^\circ$ ) и свободные энергии активации ( $\Delta G^\ddagger$ ) реакций деиодирования 9-иодантрацена под действием протонных кислот, кДж/моль

	H-X	$\Delta H^\circ$	$\Delta G^\ddagger$	$\Delta G$
	H-I	311,58	330,08	-148,88
	H-Cl	574,13	589,91	10,37
	H-HSO <sub>4</sub>	496,48	497,66	68,95

**Таблица 5.** Свободные энергии Гиббса ( $\Delta G$ ), энтальпии ( $\Delta H^\circ$ ) и свободные энергии активации ( $\Delta G^\ddagger$ ) реакций иодирования антрацена реагентами I-X, кДж/моль

	I-X	$\Delta H^\circ$	$\Delta G^\ddagger$	$\Delta G$
	I-I	455,21	478,96	148,88
	I-Cl	552,62	579,54	-10,37
	I-OSO <sub>3</sub> H	426,67	428,71	-68,95

И, действительно, на практике оказалось, что нагревание 9-иодантрацена **4a** с двукратным мольным избытком иодистоводородной кислоты в уксусной кислоте в течение 5 часов, привело к 100 % конверсии 9-иодантрацена в антрацен. Последний препаративно был выделен с выходом 95 %.

#### Экспериментальная часть

Контроль за ходом реакции и чистотой полученных продуктов осуществлялся методом тонкослойной хроматографии на пластинках Silufol UV-254. Пятна проявляли в УФ-свете. В качестве элюента для производных антрацена использовался гексан, для остальных исследуемых субстратов гексан : бензол (1:1). После проведения эксперимента, полученные смеси анализировали на хромато-масс-спектрометре HP 5972 (ЭУ, 70 эВ. Колонка RTX-5ms, длина 15 м).

Термохимические расчеты проводили с помощью пакета компьютерных программ GAUSSIAN'98W методом PM3.

Субстраты **1a** и **3a** марки «х.ч.» кристаллизовали дополнительно (по 2 раза). Иодбензол **2a** очищали

перегонкой. 9-Иодантрацен получали иодированием антрацена тетраиодглицолирилом [9]. Иодистоводородную кислоту готовили по методике [12].

**Взаимодействие иодаренов 1a-4a с иодистоводородной кислотой.** В колбу емкостью 50 мл, снабженную обратным холодильником, загружали 10 ммоль иодарена **1a-3a**, 4,52 г (20 ммоль) HI и 20 мл AcOH (для 9-иодантрацена: 1 ммоль иодарена **4a**, 2 ммоль HI, 5 мл AcOH). Реакционную массу кипятили в течение 5 ч при 120 °С, затем охлаждали и разбавляли 40 мл холодной воды.

**Подготовка образцов к анализу.** 1. К смеси продуктов взаимодействия амина **1a** и нитроарена **3a** с HI добавляли раствор NaOH до слабощелочной реакции и сернистокислый натрий для удаления выделившегося иода. Продукты экстрагировали гексаном (3×30 мл), гексановый слой отделяли, ~80 % растворителя отгоняли. Полученную смесь веществ анализировали методом тонкослойной хроматографии и газовой ХМС.

2. К смеси продуктов взаимодействия иодбензола **2a** с HI добавляли раствор Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> для удаления выделившегося иода. Продукты экстрагировали гексаном (3×10 мл), гексановый слой отделяли, сушили CaCl<sub>2</sub> и анализировали ГХМС.

**Выделение и очистка антрацена (46).** После взаимодействия 9-иодантрацена **4a** с HI смесь разбавляли водой, добавляли раствор Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>. Продукт экстрагировали дихлорметаном (3×20 мл), экстракт сушили CaCl<sub>2</sub>. Растворитель отгоняли. Антрацен очищали на колонке с SiO<sub>2</sub> (элюент гексан). Выход полицикла **46** 0,169 г (95 %). Т. пл. 215...216 °С.

**Взаимодействие иодаренов 1a-3a с HCl, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.** В колбу емкостью 50 мл, снабженную обратным холодильником, загружали 10 ммоль иодарена **1a-3a**, (20 ммоль) кислоты и 20 мл AcOH. Реакционную массу кипятили в течение 5 ч при температуре ~120 °С. Охлаждали, разбавляли 40 мл холодной воды и экстрагировали CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>. Экстракт сушили, растворитель отгоняли. Продукты разделяли методом препаративной тонкослойной хроматографии (SiO<sub>2</sub>, гексан : бензол – 1:1).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Несмеянов А.Н., Несмеянов Н.А. Начала органической химии, издание 2-е. – М.: Химия, 1974. – Кн. 2. – С. 48.
2. Гауптман З., Грефе Ю., Ремане Х. Органическая химия. – М.: Химия, 1979. – С. 289.
3. Химическая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1990. – Т. 2. – С. 497.
4. Меркушев Е.Б. Успехи в синтезе иодароматических соединений // Успехи химии. – 1984. – Т. 53. – Вып. 4. – С. 583–594.
5. Kekule A. Untersuchungen über aromatische Verbindungen // Annalen der Chemie und Pharmacie. – 1866. – Bd.137. – S. 129.
6. Филимонов В.Д., Краснокутская Е.А., Лесина Ю.А. Генерирование электрофильного иода из хлорида иода в нейтральных средах. Иодирование и протоиодирование карбазола // Журнал органической химии. – 2003. – Т. 39. – Вып. 6. – С. 924–927.
7. Бартошевич Р., Мечниковска-Столярчик В., Опшондек Б. Методы восстановления органических соединений. – М.: Иностранная литература, 1960. – С. 76.
8. GAUSSIAN 98W. User's Reference. Ed. E. Fritsch, M.J. Fritsch. – Pittsburgh: Gaussian Inc., 1998. – 280 p.
9. Чайковский В.К., Филимонов В.Д., Яговкин А.Ю., Огородников В.Д. 2,4,6,8-Тетраиод-2,4,6,8-тетраазабицикло[3.3.0]октан-3,7-дион как универсальный и мягкий реагент для иодирования ароматических соединений // Известия РАН. Сер. хим. – 2001. – Т. 50. – № 12. – С. 2302–2306.
10. Turner D.E., O'Malley R.F., Sardella D.J., Dennis J.S., Lucio S.B., Pushkar K. The reaction of iodine monochloride with polycyclic aromatic compounds: polar and electron transfer pathways // J. Org. Chem. – 1994. – V. 59. – № 23. – P. 7335–7340.
11. Чайковский В.К., Филимонов В.Д. Иодирование и хлорирование ароматических полициклических углеводородов хлористым иодом в водных растворах серной кислоты // Журнал органической химии. – 2001. – Т. 37. – Вып. 8. – С. 1189–1192.
12. Карякин Ю.В., Ангелов И.И. Чистые химические реактивы. – М.: Химия, 1974. – С. 169.

*Поступила 27.10.2006 г.*