

ЭНТАЛЬПИИ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ СМЕШАННЫХ КОМПЛЕКСОВ НИКЕЛЯ(II) С L-ГИСТИДИНОМ И ОЛИГОГЛИЦИНАМИ

© 2024 г. Г.Г. Горболова^a, С.А. Бычкова^{a,*}

^aИвановский государственный химико-технологический университет, Иваново, Россия

*e-mail: bychkova_sv@mail.ru

Поступила в редакцию 26.02.2024 г.

После доработки 28.03.2024 г.

Принята к публикации 01.04.2024 г.

Потенциометрическим и калориметрическим методами изучена система Ni^{2+} – диглицин – L-гистидин в водном растворе при $T = 298.15 \text{ K}$ (KNO_3). С помощью потенциометрических измерений определен состав и устойчивость смешаннолигандного комплекса $\text{Ni}(\text{GG})(\text{His})$. Исследования проводили при соотношениях Ni : ($\text{GG} + \text{His}$) = 1:4; 1:6. Концентрации диглицина и L-гистидина находились в соотношении 3:1 и 5:1. Полученные при разных соотношениях диглицина и L-гистидина значения $\lg \beta$ хорошо согласуются между собой. Измерения тепловых эффектов проводили в ампульном калориметре смешения с изотермической оболочкой, термисторным датчиком температуры и автоматической записью кривой температура – время. Для определения энталпии образования частицы $\text{Ni}(\text{GG})(\text{His})$ измеряли тепловые эффекты смешения растворов $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$, диглицина и L-гистидина при соотношении $c^0_{\text{Ni}}: c^0_{\text{GG}}: c^0_{\text{His}} = 1:3:1$. Опыты проводили при значениях ионной силы 0,2, 0,5, 1,0 (моль/л). Определены стандартные термодинамические характеристики ($\Delta_f H^\circ$, $\Delta_f G^\circ$, $\Delta_f S^\circ$) реакции образования смешаннолигандного комплекса. Проведен сравнительный анализ полученных данных с термодинамическими характеристиками процессов смешаннолигандного комплексообразования в системе Ni^{2+} – глицин – L-гистидин и Ni^{2+} – триглицин – L-гистидин, изученных ранее. Предложены структуры образующихся комплексов.

Ключевые слова: глицин, диглицин, триглицин, комплексообразование, константа устойчивости, энталпия

DOI: 10.31857/S0044453724120102, **EDN:** EOJFZS

ВВЕДЕНИЕ

Аминокислоты и короткие пептиды представляют собой группу соединений, обладающих высокой биологической активностью. Они могут быть использованы при лечении инфекций. Для активации этих молекул необходимы ионы переходных металлов, например, $\text{Cu}(\text{II})$ и $\text{Ni}(\text{II})$ [1]. Для разработки противовоспалительных препаратов могут применяться комплексы трипептидов с катионами Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , которые увеличивают биодоступность препаратов и проникаемость тканей [2, 3].

Все больше аналитических и клинических данных подтверждают, что ионы металлов играют значительную роль в конформационных изменениях и последующей агрегации белков. Выявлено, что для этих процессов важны гистидиновые остатки [4]. Гистидин широко участвует в структуре и функционировании биомолекул. Для доступности

ароматических лекарственных средств в биологических средах имеет значение взаимодействие между гистидином и ионами переходных металлов [5].

Поглощение и перенос металлов в биологических системах необходимы для функционирования ферментов, переноса кислорода и электронов, борьбы с инфекциями. Для точного прогнозирования образования комплексов в конкурентной среде необходимо всестороннее понимание термодинамической вероятности координации [6, 7].

Изучение совместимости лигандов в смешанных комплексах состава MLY , где L и Y – аминокислоты и пептиды представляет интерес в связи с их научным и практическим значением. Информацию о факторах, влияющих на совместимость двух разных лигандов в одной координационной сфере центрального иона, можно получить из энталпийной и энтропийной характеристик реакций сопропорционирования. В литературе, как

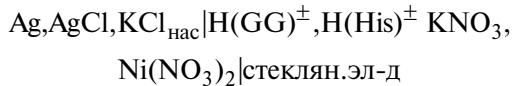
правило, термохимические данные о реакциях образования смешаннолигандных комплексов аминокислот и пептидов немногочисленны.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали глицин, глицил-глицин, глицил-глицил-глицин фирмы "Sigma" и L-гистидин марки "х.ч." (содержание основного компонента >99%) без дополнительной очистки. Растворы аминокислот и пептидов готовили по точной навеске из кристаллических препаратов, высушенных до постоянной массы при 343 К. Для приготовления растворов $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ использовали реактив марки "х.ч.", концентрацию устанавливали комплексонометрически. Для потенциометрического титрования и создания необходимых значений pH растворов олигоглицинов в калориметрических опытах применяли гидроксид калия марки "х.ч.". Заданное значение ионной силы поддерживали с помощью нитрата калия марки "х.ч.".

Состав и устойчивость смешаннолигандного комплекса $\text{Ni}(\text{GG})(\text{His})$ определяли из потенциометрических измерений. Суммарная концентрация лигандов изменялась от 1.2×10^{-2} до 2.4×10^{-2} моль/л. Исследования проводили при соотношениях $\text{Ni}:(\text{GG} + \text{His}) = 1:4; 1:6$. Концентрации диглицина и L-гистидина находились в соотношении 3:1 и 5:1.

Потенциометрическое титрование проходило по стандартной методике. Измерения ЭДС цепи:



проводили с помощью прибора "Мультитест" ИПЛ-311. Абсолютная погрешность измерения потенциала составляла не более 0.5 мВ. Равновесие считалось установившимся, если измеряемое значение ЭДС не изменялось в пределах 0.1 мВ в течение 5 мин. Температуру 298.15 К потенциометрической ячейки, титранта и электрода поддерживали с точностью $\pm 0.1^\circ\text{C}$ с помощью воздушного и водяного термостатов. В ячейку помещали раствор нитрата никеля(II), диглицина и L-гистидина, который титровали 0.1М раствором KOH в токе инертного газа.

Градуировку стеклянного электрода проводили по стандартным растворам соляной кислоты при $I = 0.2$ (моль/л) (KNO_3). Полученная при обработке этих данных по методу наименьших квадратов величина $tg\alpha$ составляла 0.05805 В/ед pH. Для каждого соотношения $\text{Ni}:(\text{GG} + \text{His})$ проводили по три – четыре параллельных опыта.

Экспериментальные данные обрабатывали по универсальной программе "PHMETR", предназначенному для расчета констант равновесия

с произвольным числом реакций по измеренной равновесной концентрации одной из частиц [8]. Критерием адекватности выбранной модели служили различия между рассчитанными и экспериментальными величинами pH. Они были знакоприменными и не превышали погрешности эксперимента.

Измерения тепловых эффектов проводили в ампульном калориметре смешения с изотермической оболочкой, термисторным датчиком температуры и автоматической записью кривой температура – время [9], надежность работы которого проверяли по энталпии растворения KCl в воде при 298.15 К. Полученные нами экспериментальные данные $\Delta H_{\text{solv}}(\infty \text{H}_2\text{O}) = 17.25 \pm 0.06$ кДж/моль согласуются с погрешностью менее 0.3% с наиболее надежными литературными значениями $\Delta H_{\text{solv}}(\infty \text{H}_2\text{O}) = 17.22 \pm 0.02$ кДж/моль [10], что свидетельствует об отсутствии систематической ошибки в работе калориметрической установки.

Опыты проводили при 298.15 К и значениях ионной силы 0.2, 0.5, 1.0 (моль/л). Величины pH контролировали с помощью прибора "Мультитест" ИПЛ-311. Равновесный состав растворов в условиях каждого опыта рассчитывали по программе RRSU [11]. Для расчета доверительного интервала среднего значения ΔH из трех параллельных опытов критерий Стьюдента был взят при доверительной вероятности 0.95.

Для определения энталпии образования частицы $\text{Ni}(\text{GG})(\text{His})$ измеряли тепловые эффекты смешения растворов $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$, диглицина и L-гистидина при соотношении $c_{\text{Ni}}^0 : c_{\text{GG}}^0 : c_{\text{His}}^0 = 1:3:1$. Навеска нитрата никеля(II) концентрации 1.0514 моль/кг раствора в ампуле составляла ~ 0.4 г. После разрушения ампулы в калориметрической ячейке объемом 39.86 мл, содержащей растворы диглицина концентрации 0.03 моль/л и L-гистидина 0.01 моль/л, концентрация $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ составляла ~ 0.01 моль/л. В ходе калориметрического опыта pH изменялось в интервале 9.8–8.7. Энталпии разведения раствора $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ в растворах фонового электролита были измерены ранее [12].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При моделировании системы Ni^{2+} – диглицин – L-гистидин учитывали следующие равновесия:

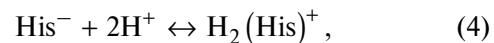
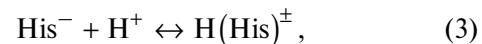
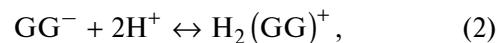
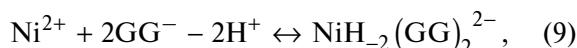
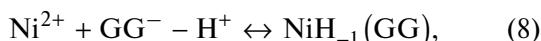
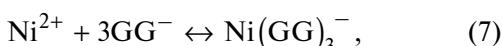
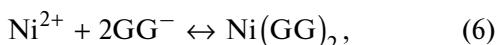
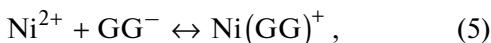


Таблица 1. Тепловые эффекты (кДж/моль) взаимодействия раствора $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ (1.0514 моль/кг раствора) с растворами диглицина (0.03100 моль/л) и L-гистидина (0.01040 моль/л)

$m \text{ Ni}(\text{NO}_3)_2, \text{ г}$	$-\Delta_{\text{mix}}H, \text{ кДж/моль}$	$-\Delta_rH = \Delta_{\text{mix}}H - \Delta_{\text{dil}}H, \text{ кДж/моль}$
$I (\text{KNO}_3) = 0.2$		
0.40005	62.96	61.65
0.40005	62.73	61.42
0.40035	62.88	61.57
	$-\Delta_{\text{mix}}H = 62.86 \pm 0.21$	$-\Delta_rH = 61.55 \pm 0.23$
$I (\text{KNO}_3) = 0.5$		
0.40000	64.94	62.22
0.40030	65.14	62.42
0.40015	65.01	62.29
	$-\Delta_{\text{mix}}H = 65.03 \pm 0.19$	$-\Delta_rH = 62.31 \pm 0.21$
$I (\text{KNO}_3) = 1.0$		
0.40050	66.49	62.29
0.40045	66.69	62.49
0.40025	66.73	62.53
	$-\Delta_{\text{mix}}H = 66.64 \pm 0.24$	$-\Delta_rH = 62.44 \pm 0.26$

Обозначения: I – ионная сила, m – навеска раствора.



В расчетах использовали константы диссоциации диглицина: $pK_1 = 2.98$, $pK_2 = 8.01$ и L-гистидина: $pK_2 = 6.10$, $pK_3 = 9.16$, а также константы устойчивости однородных комплексов никеля(II) с диглицином и L-гистидином [13–15]. Учитывали возможность гидролиза ионов Ni^{2+} [16]. Термодинамические параметры диссоциации воды на фоне KNO_3 взяты из [17].

Расчеты показали, что в системе Ni^{2+} – диглицин – L-гистидин происходит образование смешанного комплекса состава $\text{Ni}(\text{GG})(\text{His})$, смешанные комплексы другого состава не образуются. Полученные при разных соотношениях диглицина и L-гистидина значения $\lg\beta(\text{Ni}(\text{GG})(\text{His})) = 11.73 \pm 0.10$, 11.75 ± 0.11 хорошо согласуются между собой. В качестве наиболее вероятного принята величина $\lg\beta(\text{Ni}(\text{GG})(\text{His})) = 11.74 \pm 0.10$. Погрешность рассчитывали как средневзвешенное вероятного отклонения среднеарифметического при доверительной вероятности 0.95.

Экспериментальные данные калориметрических измерений приведены в табл. 1.

Экспериментальный тепловой эффект взаимодействия растворов никеля(II), диглицина и L-гистидина имеет вид:

$$\Delta_{\text{mix}}H - \Delta_{\text{dil}}H = \alpha\Delta_rH_{(\text{Ni}(\text{GG})(\text{His}))} + \sum \alpha_i\Delta_rH_i, \quad (16)$$

где $\Delta_{\text{mix}}H$ – тепловой эффект взаимодействия растворов $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ с растворами диглицина и L-гистидина, имеющими заданное значение pH; $\Delta_{\text{dil}}H$ – энталпия разведения нитрата никеля(II) в растворах фонового электролита; α_i – полнота протекания процесса (13); $\sum \alpha_i\Delta_rH_i$ – вклад одновременно протекающих побочных процессов (1) – (12), (14), (15) в измеряемый тепловой эффект.

Условия проведения калориметрических опытов выбирали таким образом, чтобы вклад побочных процессов был минимальным. Необходимые для расчета энталпии процессов кислотно-основного взаимодействия в растворах диглицина и L-гистидина взяты из работ [14, 18], энталпии реакций образования комплексов $\text{Ni}(\text{GG})^+$, $\text{NiH}_{-1}(\text{GG})$, $\text{Ni}(\text{GG})_2$, $\text{NiH}_{-2}(\text{GG})_2^{2-}$, $\text{Ni}(\text{GG})_3^-$, $\text{NiH}_{-3}(\text{GG})_3^{4-}$ из [12], комплексов $\text{Ni}(\text{His})^+$, $\text{Ni}(\text{His})_2$ из [19]. Вклад теплового эффекта процесса (15) стремился к нулю.

При определении энталпии образования комплекса никеля(II) с диглицином и L-гистидином наряду с равновесием (13) протекали реакции (6), (7), (8), (11) и (12). Доля образования смешанно-лигандного комплекса составляла около 94%. Энталпию образования комплекса $\text{Ni}(\text{GG})(\text{His})$ рассчитывали по универсальной программе HEAT [20] путем минимизации критериальной функции F по искомым параметрам:

Таблица 2. Стандартные термодинамические характеристики реакций образования комплексов никеля(II) с глицином (G), диглицином (GG), триглицином (GGG) и L-гистидином (His) при $T = 298.15$ К

Процесс	$\lg\beta^\circ$	$-\Delta_r H^\circ$, кДж/моль	$-\Delta_r G^\circ$, кДж/моль	$\Delta_r S^\circ$, Дж/(моль·К)
$I=0.2$				
$\text{Ni}^{2+} + \text{GG}^- + \text{His}^- \leftrightarrow \text{Ni(GG)(His)}$	11.74 ± 0.10	62.27 ± 0.23	67.01 ± 0.57	15.9 ± 0.8
$I=0.5$				
$\text{Ni}^{2+} + \text{GG}^- + \text{His}^- \leftrightarrow \text{Ni(GG)(His)}$	11.59 ± 0.10	62.89 ± 0.21	66.16 ± 0.57	10.9 ± 0.8
$I=1.0$				
$\text{Ni}^{2+} + \text{GG}^- + \text{His}^- \leftrightarrow \text{Ni(GG)(His)}$	11.34 ± 0.10	63.56 ± 0.26	64.73 ± 0.57	3.9 ± 0.8
$I=0$				
$\text{Ni}^{2+} + \text{G}^- + \text{His}^- \leftrightarrow \text{Ni(G)(His)} [22]$	15.66 ± 0.06	54.27 ± 0.30	89.39 ± 0.34	117.8 ± 0.2
$\text{Ni}^{2+} + \text{GG}^- + \text{His}^- \leftrightarrow \text{Ni(GG)(His)}$	12.54 ± 0.10	60.72 ± 0.26	71.58 ± 0.57	36.4 ± 0.8
$\text{Ni}^{2+} + \text{GGG}^- + \text{His}^- \leftrightarrow \text{Ni(GGG)(His)} [23]$	12.40 ± 0.09	52.08 ± 0.30	70.78 ± 0.51	62.7 ± 0.8

$$F = \sum_{i=1}^N \omega_i (\Delta H_i^{\text{эксп}} - \Delta H_i^{\text{выч}})^2, \quad (17)$$

где $\Delta H_i^{\text{выч}}$ – рассчитанный тепловой эффект при заданных значениях общих концентраций $c_{\text{Ni}^{2+}}^0$, $c_{\text{GG}^-}^0$, $c_{\text{His}^-}^0$ и текущих $\lg\beta$ и $\Delta_r H$; N – число опытов; ω_i – весовые множители.

Рассчитанные энталпии процессов образования частицы Ni(GG)(His) приведены в табл. 2.

Энталпии комплексообразования в стандартном растворе были найдены экстраполяцией величин тепловых эффектов при фиксированных значениях ионной силы к нулевой по уравнению [21]:

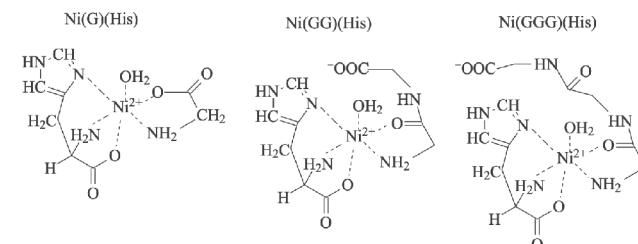
$$\Delta H - \Delta Z^2 \Psi(I) = \Delta H^\circ + bI, \quad (18)$$

где ΔH , ΔH° – изменение энталпии при конечном значении ионной силы и $I = 0$ соответственно; $\Psi(I)$ – функция ионной силы, вычисленная теоретически; ΔZ^2 – разность квадратов зарядов продуктов реакции и исходных компонентов; b – эмпирический коэффициент.

Результаты экстраполяции и рассчитанные значения стандартных термодинамических характеристик комплексообразования в системе Ni^{2+} – диглицин – L-гистидин приведены в табл. 2.

В табл. 2 приведены также термодинамические характеристики процессов смешаннолигандного комплексообразования в системе Ni^{2+} – глицин – L-гистидин и Ni^{2+} – триглицин – L-гистидин, полученные ранее [22, 23].

Вероятные структуры комплексов представлены на схеме:



Поскольку кислород пептидной группы является более слабым донором электронной плотности по сравнению с кислородом карбоксильной группы, величина $\lg\beta^\circ$ более значительна в случае образования комплекса $\text{Ni}(G)(\text{His})$ по сравнению с комплексами $\text{Ni}(GG)(\text{His})$ и $\text{Ni}(GGG)(\text{His})$. При образовании последних величины $\lg\beta^\circ$ довольно близки. Это свидетельствует о подобной координации диглицина и триглицина в смешаннолигандных комплексах. Однако, энталпии процессов комплексообразования с участием глицина и триглицина менее экзотермичны по сравнению с $\Delta_r H^\circ$ образования смешанного комплекса с участием диглицина (табл. 2). Судя по величинам изменения энтропии это может быть связано с меньшей дегидратацией при образовании частицы $\text{Ni}(GG)(\text{His})$, чем частиц $\text{Ni}(G)(\text{His})$ и $\text{Ni}(GGG)(\text{His})$.

Логарифм константы равновесия реакции со-пропорционирования:

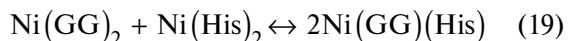
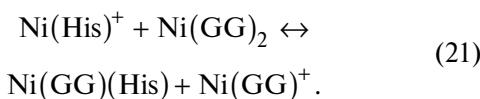
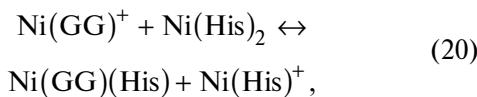


Таблица 3. Стандартные термодинамические характеристики реакций сопропорционирования смешанно-лигандных комплексов никеля(II) с глицином (G), диглицином (GG), триглицином (GGG) и L-гистидином (His) при $I=0$ и $T = 298.15$ К

Процесс	$\lg K$	$\Delta_f H^\circ$, кДж/моль	$-\Delta_f G^\circ$, кДж/моль	$\Delta_f S^\circ$, Дж/(моль·К)
$\text{NiG}_2 + \text{Ni}(\text{His})_2 \leftrightarrow 2\text{Ni}(\text{G})(\text{His})$ [22]	4.69 ± 0.09	2.95 ± 0.66	26.77 ± 0.52	99.7 ± 1.6
$\text{NiG}^+ + \text{Ni}(\text{His})_2 \leftrightarrow \text{Ni}(\text{G})(\text{His}) + \text{Ni}(\text{His})^+$	2.99 ± 0.08	6.18 ± 0.60	17.07 ± 0.46	78.0 ± 1.2
$\text{Ni}(\text{His})^+ + \text{NiG}_2 \leftrightarrow \text{Ni}(\text{G})(\text{His}) + \text{NiG}^+$	1.70 ± 0.08	-3.23 ± 0.66	9.70 ± 0.48	21.7 ± 1.9
$\text{Ni}(\text{GG})_2 + \text{Ni}(\text{His})_2 \leftrightarrow 2\text{Ni}(\text{GG})(\text{His})$	1.97 ± 0.15	-11.63 ± 0.59	11.25 ± 0.83	-1.3 ± 1.4
$\text{Ni}(\text{GG})^+ + \text{Ni}(\text{His})_2 \leftrightarrow \text{Ni}(\text{GG})(\text{His}) + \text{Ni}(\text{His})^+$	1.48 ± 0.11	-1.67 ± 0.58	8.46 ± 0.63	22.7 ± 1.2
$\text{Ni}(\text{His})^+ + \text{Ni}(\text{GG})_2 \leftrightarrow \text{Ni}(\text{GG})(\text{His}) + \text{Ni}(\text{GG})^+$	0.49 ± 0.11	-9.96 ± 0.61	2.79 ± 0.65	-24.0 ± 1.2
$\text{Ni}(\text{GGG})_2 + \text{Ni}(\text{His})_2 \leftrightarrow 2\text{Ni}(\text{GGG})(\text{His})$ [23]	2.11 ± 0.13	0.88 ± 0.72	12.04 ± 0.74	43.3 ± 1.6
$\text{Ni}(\text{GGG})^+ + \text{Ni}(\text{His})_2 \leftrightarrow \text{Ni}(\text{GGG})(\text{His}) + \text{Ni}(\text{His})^+$	1.70 ± 0.10	1.99 ± 0.62	9.70 ± 0.57	39.2 ± 1.2
$\text{Ni}(\text{His})^+ + \text{Ni}(\text{GGG})_2 \leftrightarrow \text{Ni}(\text{GGG})(\text{His}) + \text{Ni}(\text{GGG})^+$	0.41 ± 0.10	-1.11 ± 0.74	2.34 ± 0.57	4.1 ± 1.2

является мерой отклонения $\lg\beta(\text{Ni}(\text{GG})(\text{His}))$ от величины, ожидаемой из аддитивности $\lg\beta(\text{Ni}(\text{GG})_2)$ и $\lg\beta(\text{Ni}(\text{His})_2)$, и характеризует устойчивость смешаннолигандного комплекса $\text{Ni}(\text{GG})(\text{His})$ к распаду на однородные $\text{Ni}(\text{GG})_2$ и $\text{Ni}(\text{His})_2$.

Реакцию (19) можно представить как сумму двух реакций:

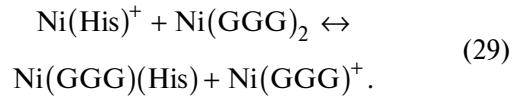
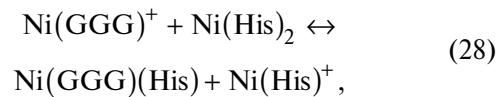
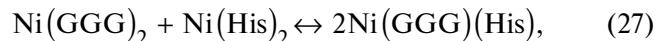
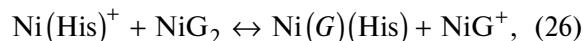
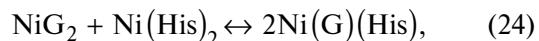


каждая из которых характеризует различие в реакциях:



В табл. 3 приведены термодинамические характеристики процессов (19), (20), (21), рассчитанные с использованием результатов настоящей работы (табл. 2) и литературных данных [12, 19], а также термодинамические характеристики процессов

смешаннолигандного комплексообразования в системе Ni^{2+} – глицин – L-гистидин, Ni^{2+} – триглицин – L-гистидин полученные ранее [22, 23] для реакций:



Смешанный комплекс $\text{Ni}(\text{GG})(\text{His})$ устойчив к диспропорционированию, так как логарифм константы реакции (19) $\lg K > 0$. Сравнение $\lg K$ реакций (19), (24) и (27), приведенных в табл. 3, показывает, что комплекс $\text{Ni}(\text{GG})(\text{His})$ менее устойчив к распаду на однородные, чем комплексы $\text{Ni}(\text{G})(\text{His})$

и Ni(GGG)(His). Положительные значения $\lg K$ реакций (20), (21) и аналогичных реакций (25), (26), (28), (29) показывают, что присоединение глицина, диглицина, триглицина и L-гистидина в качестве смешанных лигандов в комплексах Ni(G)(His), Ni(GG)(His) и Ni(GGG)(His) усиливает их устойчивость больше, чем присоединение этих лигандов в качестве однородных усиливает устойчивость образующихся при этом бискомплексов. $\Delta_f H^\circ$ в реакциях (25), (28) и (26), (29) (табл. 3) противоположны по знаку, а в реакции (20) гораздо меньше по абсолютной величине, чем в реакции (21), что, очевидно, связано со значительными гидратационными изменениями в процессе диссоциации комплекса Ni(His)₂ по первой ступени. Достаточно большие положительные величины $\Delta_f S^\circ$ в реакциях (20), (25) и (28) подтверждают данное предположение.

Работа выполнена в рамках 09-Г3-23 Фундаментальные и прикладные аспекты создания полифункциональных волокнистых полимерных материалов с использованием капсулированных наномикросистем (FZZW-2023-0008).

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kotynia A., Wiatrak B., Kamysz W. et al. // Int. J. Mol. Sci. 2021. V. 22. P. 12028.
2. Hammouda A.N., Elmagbary F.M., Jackson G.E. et al. // Aust. J Chem. Soc. 2021. V. 74 (8). P. 613.
3. Vicatos G.M., Hammouda A.N., Alnajjar R. et al. // Inorganics. 2022. V. 10(1). P. 8
4. Balogh B.D., Szunyog G., Lukács M. et al. // Dalton Trans. 2021. V. 50. P. 14411.
5. Song Y., Zhan J., Li M. et al. // Int. J. Mol. Sci. 2022. V. 23. P. 3957.
6. Murphy J.M., Powell B.A., Brumaghim J.L. // Coordination Chemistry Reviews. 2020. V. 412. P. 213253.
7. Ramek M., Pejić J., Sabolović J. // Journal of Inorganic Biochemistry. 2021. V. 223. P. 111536.
8. Бородин В.А., Васильев В.П., Козловский Е.В. // Журн. неорган. химии. 1986. Т. 31. № 1. С.10.
9. Черников В.В. Термодинамика кислотно-основного взаимодействия в водных растворах иминоди янтарной, 1-аминоэтилиден-1,1-дифосфоновой, этианоламин-Н, N-диметиленфосфоновой кислот: Дис. ... канд. хим. наук. Иваново: ИХТИ, 1988. 161с.
10. Wadsö I., Goldberg R.N. // Pure Appl. Chem. 2001. V. 73 P. 1625.
11. Васильев В.П., Бородин В.А., Козловский Е.В. Применение ЭВМ в химико-аналитических расчетах. М.: Высш. школа, 1993. С. 112.
12. Горболова Г.Г., Бычкова С.А., Фролова К.О. // Журн. физ. химии. 2022. Т. 96. № 9. С. 1311. [Gorboletova G.G., Bychkova S.A., Frolova K.O. // Russian Journal of Physical Chemistry. 2022. V. 96. № 9. P. 1909].
13. Бычкова С.А., Горболова Г.Г., Крутова О.Н., Фролова К.О. // Рос. хим. журн. (Журн. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). 2021. Т. 65. № 2. С. 47.
14. Васильев В.П., Кочергина Л.А., Гаравин В.Ю. // Журн. общ. химии. 1985. Т. 55. № 1. С. 189.
15. Васильев, В. П., Зайцева Г.А. // Журн. неорган. химии. 1988. Т. 33. № 5. С. 1196.
16. Назаренко В.А., Антонович В.П., Невская Е.М. Гидролиз ионов металлов в разбавленных растворах. М.: Атомиздат, 1979. С. 120.
17. Васильев В.П., Лобанов Г.А. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 1969. Т. 12. № 6. С. 740.
18. Горболова Г.Г., Гридин С.Н., Сазонова Е.С. // Журн. физ. химии. 2005. Т. 79. № 8. С. 1390. [Gorboletova G.G., Gridchin S.N., Sazonova E.S. // Russian Journal of Physical Chemistry. 2005. V. 79. № 8. P. 1222].
19. Горболова Г.Г., Метлин А.А. // Журн. физ. химии. 2014. Т. 88. № 9. С. 1359. [Gorboletova G.G., Metlin A.A. // Russian Journal of Physical Chemistry. 2014. V. 88. № 9. P. 1514].
20. Бородин В.А., Козловский Е.В., Васильев В.П. // Журн. неорган. химии. 1982. Т. 27. № 9. С. 2169.
21. Васильев В.П. Термодинамические свойства растворов электролитов. М.: Высш. школа, 1982. С. 320.
22. Горболова Г.Г., Метлин А.А., Бычкова С.А. // Журн. физ. химии. 2015. Т. 89. № 5. С. 787. [Gorboletova G.G., Metlin A.A., Bychkova S.A. // Russ. J. of Phys. Chem. 2015. V. 89. N. 5. P. 793].
23. Горболова Г.Г., Метлин А.А., Бычкова С.А. // Там же. 2018. Т. 92. № 9. С. 1426. [Gorboletova G.G., Metlin A.A., Bychkova S.A. // Ibid. 2018. V. 92. № 9. P. 1715]