

# СУПРАМОЛЕКУЛЯРНАЯ ХИМИЯ: КОНТАКТНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ МОЛЕКУЛ

Ю. А. ДЯДИН

Новосибирский государственный университет

## SUPRAMOLECULAR CHEMISTRY: CONTACT STABILIZATION OF MOLECULES

Yu. A. DYADIN

*The influence of the supramolecular processes on the chemical state of a molecule is considered. It is shown that through nonvalent interactions (contacts) not only conformers, tautomers and isomers unstable under ordinary conditions, but also non existing molecules (unstable in their own phases) can be stabilized.*

*Рассмотрено влияние надмолекулярных процессов на химическое состояние молекулы. Показано, что посредством невалентного взаимодействия (контактов) могут стабилизироваться не только неустойчивые в обычных условиях конформеры, таутомеры и изомеры, но и не существующие (неустойчивые в своих фазах) молекулы.*

[www.issep.rssi.ru](http://www.issep.rssi.ru)

## ВВЕДЕНИЕ

В супрамолекулярной химии молекула играет роль, аналогичную той, которую атом выполняет в традиционной химии<sup>1</sup>, то есть является как бы неделимой частицей в надмолекулярных процессах [1]. Взаимодействуя между собой невалентным образом, эти молекулы хотя и претерпевают определенные изменения, но в таких пределах, которые, как правило, оставляют за ними их химическую индивидуальность. В одних случаях межмолекулярные взаимодействия могут привести (пространственная комплементарность здесь играет решающую роль [2]) к образованию макромолекулярного ансамбля (надмолекулы), который состоит из нескольких десятков молекул (например, одна из разновидностей рибосомы состоит из 55 белковых молекул и трех молекул рибонуклеиновой кислоты и представляет собой глобулу с линейными размерами порядка 200 Å). В других случаях невалентные взаимодействия между двумя (или более) молекулярными подсистемами при хорошей пространственной комплементарности приводят к образованию клатратных соединений, которые

<sup>1</sup> Слово "атом" происходит от греческого ατομος (неделимый). Действительно, химическая сущность атома определяется числом протонов в ядре (как известно, число нейтронов у изотопов одного и того же элемента может меняться в некоторых пределах) и таким же количеством электронов вне ядра. Изменить же состав ядра путем химических реакций невозможно, поскольку энергия связи нуклонов в ядре примерно на шесть порядков больше тех энергий, которые могут быть получены при протекании самых энергетически емких химических реакций. Но химическое состояние атома все-таки может (хотя и слабо) повлиять на стабильность ядра. Так, оттягивание электронной плотности с бериллия на фтор приводит к тому, что период полураспада изотопа <sup>7</sup>Be (электронный захват), равный 54 дням для металла, в соединении BeF<sub>2</sub> увеличивается примерно на 1 ч. Очевидно, что надмолекулярные процессы, энергетика которых только на полтора-два порядка меньше валентных, будут оказывать на молекулу гораздо большее влияние.

представляют собой молекулярный кристалл, построенный из разного сорта молекул таким образом, что молекулы одного сорта строят кристаллический каркас (молекулы-хозяева), в полостях которого располагаются молекулы-гости [2]. Клатраты относятся к так называемым гетеромолекулярным кристаллам (в отличие от гомомолекулярных кристаллов—молекулярных кристаллов, построенных из одного сорта молекул). Очевидно, что упаковка молекул разного сорта с образованием кристаллической клатратной фазы энергетически более выгодна, чем существование исходных веществ порознь в присутствии им при данных условиях агрегатном состоянии.

Поскольку химические взаимодействия существенно более сильные, чем межмолекулярные, то казалось бы, что именно валентное взаимодействие определяет структуру молекул в хозяйской и гостевой подсистемах и диктует системе в целом, образовывать или нет надмолекулярные соединения. Однако разница в энергии химического и межмолекулярного взаимодействий не столь велика (примерно полтора-два порядка), чтобы обратное влияние межмолекулярного взаимодействия на строение молекул не было заметным. Посмотрим, насколько оно может быть существенным.

### КОНТАКТНАЯ КОНФОРМЕРИЯ, ТАУТОМЕРИЯ, ИЗОМЕРИЯ

Профессор химфака МГУ П.М. Зоркий с сотрудниками [3], анализируя структуры гомомолекулярных кристаллов, обнаружили интересное явление: химически одни и те же молекулы могут находиться в кристалле в разных конформациях. Например, в кристалле октаметиленициклотетрасилазана (схема 1) половина молекул находится в форме кресла, а другая половина — в форме ванны, менее энергетически выгодной для молекулы в свободном состоянии. Таким образом, выигрыш энергии при упаковке разных конформаций оказывается более весомым, чем проигрыш при переходе половины молекул в невыгодную конформацию. Получается как бы надмолекулярное соединение 1 : 1 из химически идентичных, но отличающихся геометрией молекул.

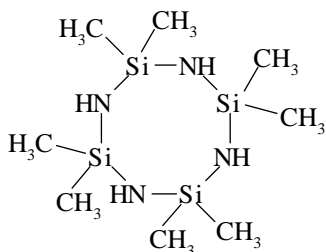


Схема 1

Этому явлению авторы дали удачное название — контактная конформерия. Более того, было обнаружено несколько веществ, кристаллические фазы которых состоят из молекул в разных таутомерных формах. Одним из таких примеров могут служить кристаллы 2-аминобензойной кислоты (схема 2).

В клатратных соединениях, в которых β-дикетонат (схема 3) выступает в качестве хозяина, его молекула имеет *транс*-конфигурацию<sup>1</sup>, тогда как при отсутствии гостя кристаллы компонента-хозяина состоят из *транс*- и *цис*-изомеров<sup>2</sup> (схема 3, а и б соответственно) в соотношении 1 : 1, то есть образуется надмолекулярное соединение (фаза), аналогичное рацематам. Таким образом,

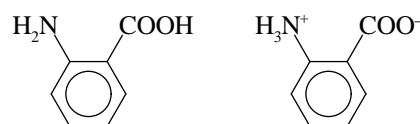


Схема 2

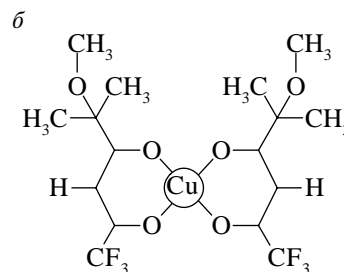
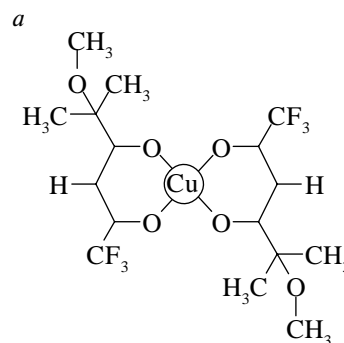


Схема 3

<sup>1</sup> Синтез и структурные исследования этих соединений проводились Д.В. Солдатовым в лаборатории профессора Дж. Рипмеестера (Канадский совет по науке, Оттава, 1997 год).

<sup>2</sup> Изомеры отличаются от конформеров тем, что переходы от изомера к изомеру сопровождаются, как правило, разрывом связей и крайне затруднены, тогда как у конформеров (и таутомеров) кинетические барьеры невелики и при комнатных температурах в газовой или жидкой фазе равновесие между ними устанавливается достаточно быстро.

требования оптимальной упаковки (невалентные взаимодействия) приводят уже к серьезным изменениям в строении молекулы (при сохранении ее состава и молекулярного веса). В данном случае можно говорить о контактной изомерии.

### СТАБИЛИЗАЦИЯ МОЛЕКУЛ

При упаковке сложных молекул в кристаллическую структуру действуют два противоречивых начала: ван-дер-ваальсово взаимодействие стремится упаковать молекулы плотнейшим образом, тогда как сама молекула пытается сохранить форму с наиболее выгодной ориентацией своих фрагментов. В общем случае эти два начала не совпадают, поэтому структура гомомолекулярного кристалла представляет собой некий компромисс, при котором и молекула в той или иной мере искажена, и упаковка не является плотнейшей.

**Дополнительная стабилизация устойчивых молекул при клатрации.** Очевидно, что в гетеромолекулярном кристалле можно подобрать молекулы с такой геометрией, при которой упаковка наиболее выгодных их конформаций будет решаться гораздо проще. На схеме 4 показана комплексная молекула  $[\text{NiPy}_4(\text{NCS})_2]$  (где Py – пиридин) в собственной кристаллической фазе (а) и в клатратной  $[\text{NiPy}_4(\text{NCS})_2] \cdot 2\text{Py}^1$  (б). Видно, что комплексная молекула хозяина в своей собственной кристаллической фазе более напряженная, чем в клатратной: в ней все соответствующие связи Ni–N более длинные (более слабые), угол Ni–N–C с изотиоцианатом в угоду требованиям упаковки заметно искажен

<sup>1</sup> Нужно заметить, что пиридин в клатрате выполняет две совершенно различные функции: записанный в квадратных скобках является лигандом, связанным через атом азота с атомом никеля координационной связью. Молекулы Py, вынесенные за квадратные скобки, являются гостевыми (не связаны никакими валентными связями в комплексе и могут быть замещены, например, молекулами бензола).

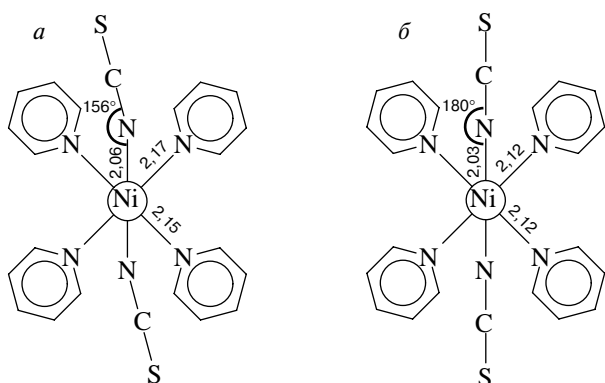
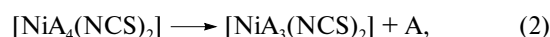


Схема 4

(156°), тогда как в клатрате он имеет свое естественное значение 180°. Аналогичные явления наблюдаются в подавляющем большинстве клатратных систем (например, в клатратах мочевины, тиомочевины, рассмотренного выше β-дикетоната меди (см. схему 3), клатратах гидрохинона и т.д.).

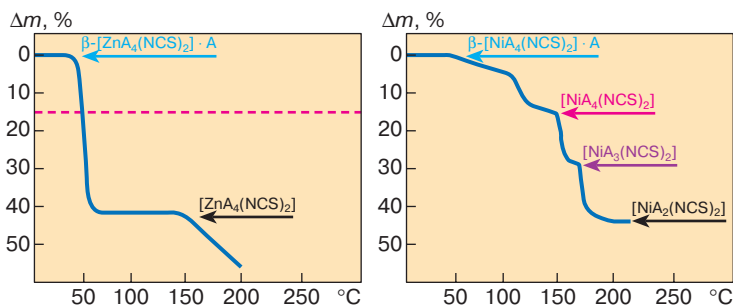
**Стабилизация неустойчивых молекул-хозяев.** До сих пор мы рассматривали случаи, когда молекулы хозяина вполне устойчивы и могут существовать в своей собственной кристаллической фазе (так называемая α-фаза или α-модификация [2]). Но, как выяснилось в последнее время, имеется достаточно примеров, когда каркас хозяина построен из молекул, которые неустойчивы и не могут построить свою собственную кристаллическую фазу. На рис. 1 показана температурная зависимость потери веса клатратов  $[\text{ZnA}_4(\text{NCS})_2] \cdot \text{A}$  и  $[\text{NiA}_4(\text{NCS})_2] \cdot \text{A}$ , где A – 4-метилпиридин (здесь метилпиридин бифункционален, так же как и пиридин в соединении  $[\text{NiPy}_4(\text{NCS})_2] \cdot 2\text{Py}$ ). Оба клатрата имеют одинаковую структуру с тетрагональной элементарной ячейкой. В случае клатрата никелевого комплекса разложение клатрата и комплекса идет ступенчато по реакциям:



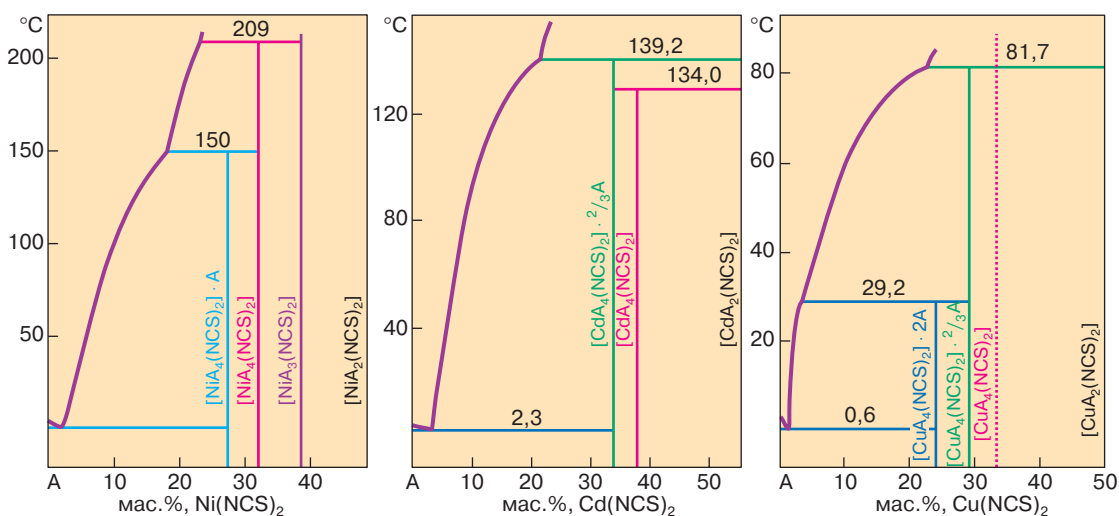
Сначала удаляется гость<sup>2</sup>, в некотором интервале устойчива фаза хозяина  $[\text{NiA}_4(\text{NCS})_2]$ , которая затем последовательно теряет два лиганда. Иначе обстоит дело с клатратом цинкового комплекса, который имеет такую же структуру, как и никелевый клатрат. При удалении гостя сразу же разлагается и хозяйский комплекс  $[\text{ZnA}_4(\text{NCS})_2]$  (на рис. 1 место, где должна была быть ступенька хозяина, показано красной прерывистой прямой) и комплекс  $[\text{ZnA}_3(\text{NCS})_2]$ , то есть реакции, аналогичные (1) и (2), отсутствуют и разложение сразу идет до комплекса  $[\text{ZnA}_2(\text{NCS})_2]$ . Отсюда следует, что хозяйский комплекс  $[\text{ZnA}_4(\text{NCS})_2]$  может существовать в кристалле только при совместной кристаллизации с гостем, при его невалентной поддержке. Это явление получило название “контактная стабилизация молекул”.

Еще более увлекательная картина наблюдается в системе, где в качестве центрального атома выступает медь(II). Контактная стабилизация здесь приводит к реализации не одной, а двух сильно различающихся конформаций молекулы хозяина. Действительно, как

<sup>2</sup> Удаление гостя идет в две стадии: сначала гость удаляется из β-каркаса (линейный участок кривой), но когда степень заполнения полостей становится ниже 70%, каркас схлопывается в α-модификацию хозяина, не включающую молекулы гостя, и удаление метилпиридина идет быстрее.



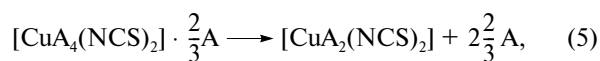
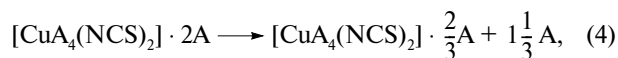
**Рис. 1.** Кривые потери веса клатратов  $[\text{ZnA}_4(\text{NCS})_2] \cdot \text{A}$  и  $[\text{NiA}_4(\text{NCS})_2] \cdot \text{A}$  (где А – 4-метилпиридин) в зависимости от температуры



**Рис. 2.** Фазовые диаграммы бинарных систем 4-метилпиридин (А) – роданид металла(II). Вертикальные линии указывают состав образующихся в системе соединений. Комплекс-хозяин выделен красным цветом. В медной системе хозяин не кристаллизуется; состав, который должен быть у этого комплекса, показан прерывистой линией

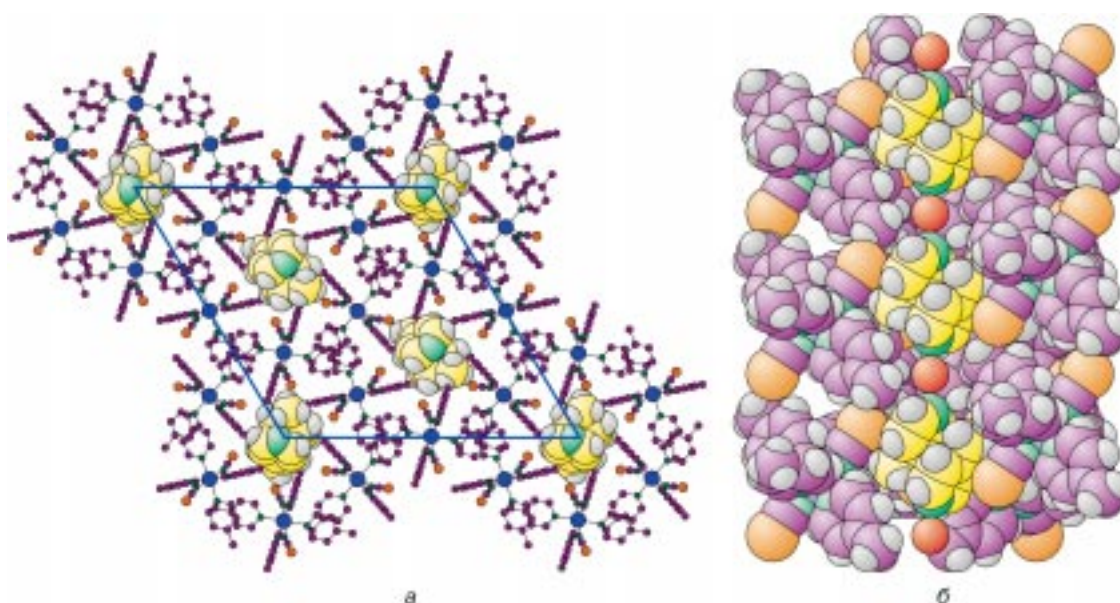
видно из рис. 2, на котором приведены фазовые диаграммы бинарных систем 4-метилпиридин – роданид металла(II), в системе  $\text{Cu}(\text{NCS})_2$  – 4-метилпиридин образуются два соединения:  $\text{CuA}_{4,7}(\text{NCS})_2$  и  $\text{CuA}_6(\text{NCS})_2$ . Как показали структурные исследования, оба соединения являются клатратами на базе хозяйского комплекса  $[\text{CuA}_4(\text{NCS})_2]$ , но сам хозяйский комплекс нестабилен. Нет таких температурных и концентрационных условий, при которых он был бы устойчив в своей собственной кристаллической фазе. В системе с роданидом меди состав гипотетического хозяйского комплекса показан красной прерывистой линией. Как видно из рис. 2, никакая фаза с этим составом не образуется. Но в присутствии гостя образуются два клатратных соединения: зеленые кристаллы  $[\text{CuA}_4(\text{NCS})_2] \cdot \frac{2}{3}\text{A}$  тригональной сингонии (в дальнейшем зеленый клатрат) и

синие моноклинные кристаллы  $[\text{CuA}_4(\text{NCS})_2] \cdot 2\text{A}$  (синий клатрат). Удаление 4-метилпиридина идет по реакциям

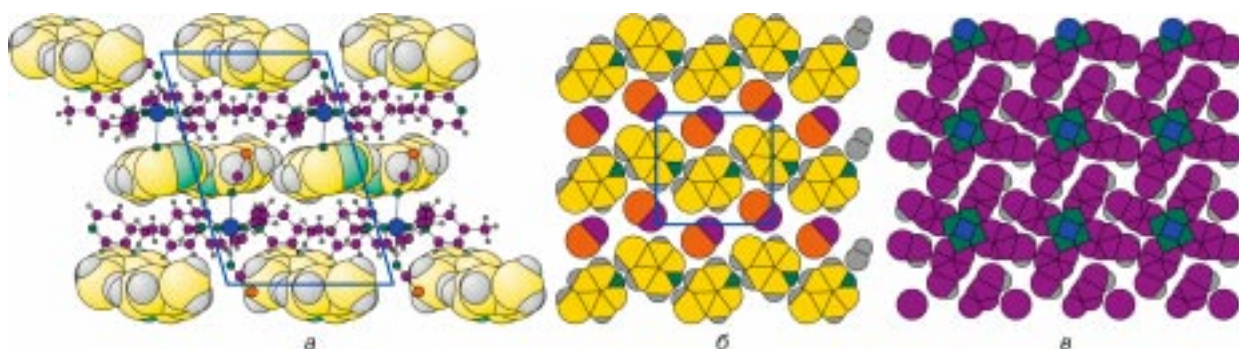


то есть реакция, аналогичная реакции (1), отсутствует, как и при разложении цинкового клатрата.

Чтобы обеспечить хорошую упаковку как в зеленом (рис. 3), так и в синем клатрате (рис. 4), молекула хозяина при переходе от клатрата к клатрату претерпевает драматические изменения (рис. 5), что, в частности, проявляется в резком изменении окраски. В зеленом клатрате комплексная молекула центросимметрична,



**Рис. 3.** Кристаллическая структура зеленого клатрата  $[\text{CuA}_4(\text{NCS})_2] \cdot \frac{2}{3} \text{A}$ : а – вид, перпендикулярный к направлению оси канала. Атомы хозяйской молекулы показаны маленькими кружками, атомы гостя даны в ван-дер-ваальсовых размерах; б – фрагмент структуры, показывающий расположение гостевых молекул в полостях. Молекулы и гостя и хозяина даны в ван-дер-ваальсовых очертаниях: углерод хозяина окрашен в сиреневый цвет, гостя – в желтый, азот – в зеленый, сера – в светло-коричневый, водород – серый, медь – синий

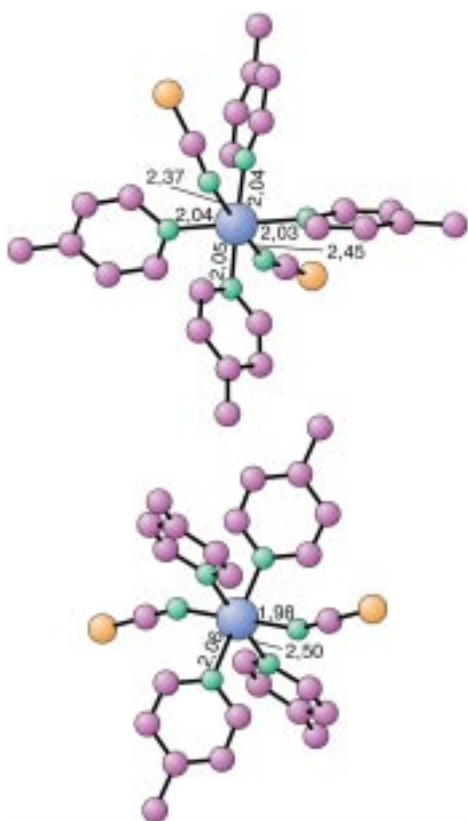


**Рис. 4.** Кристаллическая структура синего клатрата  $[\text{CuA}_4(\text{NCS})_2] \cdot 2\text{A}$ : а – фрагмент структуры (выделена элементарная ячейка). Атомы хозяйской молекулы показаны маленькими кружками, атомы гостя даны в ван-дер-ваальсовых размерах; б – сечение кристаллической структуры, проходящее через центры гостевых молекул 4-метилпиридина; в – сечение кристаллической структуры, проходящее через центры атомов меди хозяйских молекул. Раскраска атомов та же, что и на рис. 3

четыре атома азота (два от метилпиридина и два от изотиоцианата) находятся на относительно близком расстоянии, причем самая короткая связь (1,98 Å) – с азотом изотиоцианата. Два метилпиридина находятся на значительном расстоянии (2,50 Å, что, однако, меньше суммы ван-дер-ваальсовых радиусов рассматриваемых атомов)<sup>1</sup>. В синем клатрате молекула хозяина

асимметрична, четыре атома азота метилпиридина находятся на коротком расстоянии (~2,04 Å), тогда как длинные (2,37 и 2,45 Å) Cu–N-связи – именно с азотом

<sup>1</sup> Для меди(II) ярко выражена псевдооктаэдрическая координация, которую иногда даже обозначают (4 + 2), указывая на то, что четыре лиганда находятся на коротком расстоянии, а с двумя связь ослаблена.



**Рис. 5.** Строение хозяйской молекулы  $[\text{CuA}_4(\text{NCS})_2]$  в синем (а) и зеленом (б) клатратах. Обозначения цвета см. на рис. 3. Атомы водорода не показаны

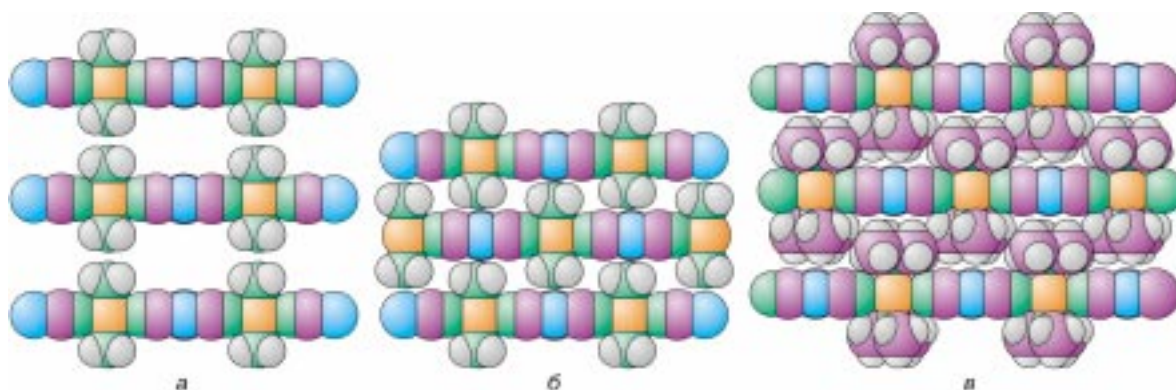
изотиоцианата. Ослабление координационной  $\text{Cu-N}$ -связи с изотиоцианатом при переходе от зеленого к синему клатрату отражается не только в видимой области

спектра, но и в инфракрасной его части. Валентные колебания  $\text{C-N}$ -связи изотиоцианата в зеленом клатрате выражаются волновым числом  $\nu(\text{CN}) = 2090 \text{ см}^{-1}$ , что характерно для координированного через атом азота изотиоцианата. В синем клатрате  $\nu(\text{CN}) = 2043 \text{ см}^{-1}$ , что ближе к роданид-иону (в  $\text{KNCS}$   $\nu(\text{CN}) = 2030 \text{ см}^{-1}$ ).

Мы видим, что упаковка существенно влияет на строение молекулы хозяина, кардинально меняя ее свойства. В синем клатрате структура представляет собой плотно уложенные в слои хозяйские молекулы (4-метилпиридиновые лиганды лежат в плоскости слоя), как показано на рис. 4, а, в. Изотиоцианатные лиганды направлены в межслоевое пространство, в котором располагаются гостевые молекулы метилпиридина (рис. 4, б). Чтобы обеспечить оптимальную упаковку, изотиоцианатные лиганды сильно искривлены и оттянуты от центрального атома.

В зеленом клатрате хозяйские молекулы располагаются таким образом, что образуются каналы переменного диаметра, в широкой части которых расположено по две молекулы гостевого 4-метилпиридина, а в узкой – молекулы воды. И здесь нужно отметить еще одну интересную особенность, связанную не с химической природой составляющих фазу молекул (она одна и та же в обоих клатратах), а с ее строением. Так, синий клатрат совершенно индифферентен к воде, тогда как зеленый, в структуре которого, как мы видели, имеются полости соответствующего размера, обладает высокой осушающей способностью. Получение безводного зеленого клатрата требует особых мер по осушке исходных реагентов.

Промежуточная картина наблюдается в системе  $\text{Cd}(\text{NCS})_2$ -4-метилпиридин (см. рис. 2). Хозяйский



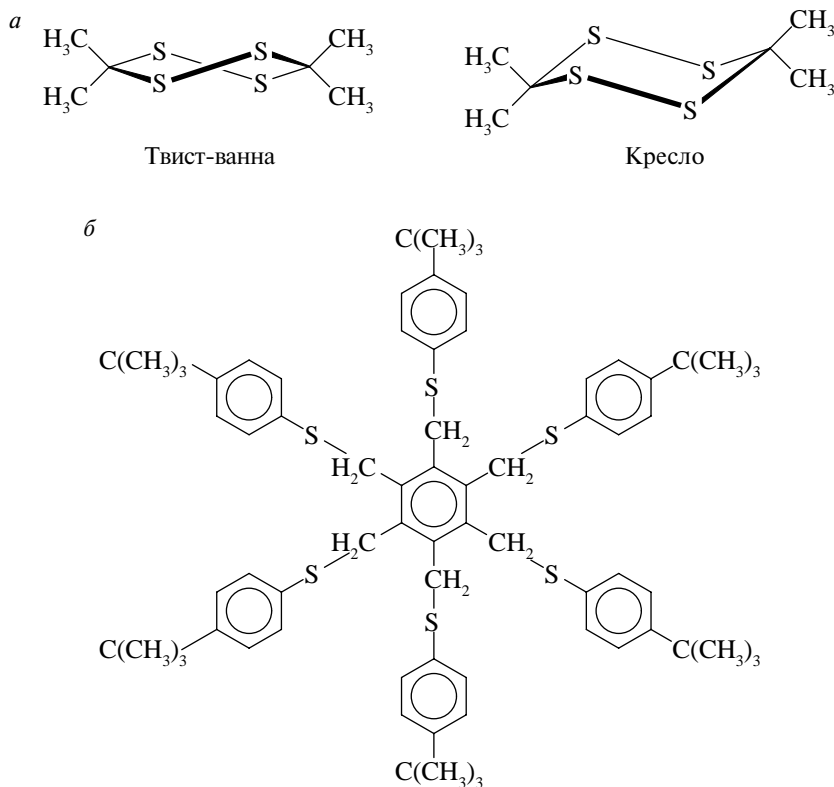
**Рис. 6.** Фрагменты структур соединений Гофмана-Ивамото: а – каркас клатрата  $[\text{Ni}(\text{CN})_4\text{Cd}(\text{NH}_3)_2] \cdot 2\text{C}_6\text{H}_6$ , из которого удален гость; б – гипотетическая наиболее плотная структура, которую можно было бы построить из хозяйских слоев  $[\text{Ni}(\text{CN})_4\text{Cd}(\text{NH}_3)_2]$ ; в – реальная структура комплекса  $[\text{Ni}(\text{CN})_4\text{Cd}(\text{NMe}_3)_2]$ , где Me – метил (координаты атомов этой структуры были любезно предоставлены проф. Т. Ивамото и проф. С. Нашикиори, Токийский университет)

комплекс  $[\text{CdA}_4(\text{NCS})_2]$  существует при обычных условиях, но температура разложения его в собственной фазе ( $134^\circ\text{C}$ ) на  $5^\circ$  ниже температуры разложения в клатрате  $[\text{CdA}_4(\text{NCS})_2] \cdot \frac{2}{3}\text{A}$ . Иными словами, в интервале температур  $134\text{--}139^\circ\text{C}$  хозяйский комплекс  $[\text{CdA}_4(\text{NCS})_2]$  существует только благодаря контактной стабилизации гостем.

Наглядно контактную стабилизацию можно продемонстрировать на соединениях Гофмана–Ивамото [2]. Один из типичных хозяйских каркасов  $[\text{Ni}(\text{CN})_4\text{Cd}(\text{NH}_3)_2]$  показан на рис. 6, а. Атом никеля по квадрату окружен четырьмя атомами углерода цианида, атом кадмия имеет октаэдрическую координацию (с четырьмя атомами азота от циано-группы и двумя – от аммиака). Образуются слои из ковалентно связанных атомов. В клатратных соединениях эти слои располагаются друг над другом, как показано на рис. 6, а, а полости, образующиеся между  $\text{NH}_3$ -группами, эффективно заполняются молекулами гостя, как, например, молекулами бензола (см. рис. 5 в [2]). Но описанный выше каркас хозяина неустойчив без гостя. Даже если попытаться уложить слои из  $[\text{Ni}(\text{CN})_4\text{Cd}(\text{NH}_3)_2]$ -фрагментов наиболее компактным способом, то получается

относительно рыхлая структура (рис. 6, б). Однако если аммиак заменить на триметиламин, то в образующемся комплексе  $[\text{Ni}(\text{CN})_4\text{Cd}(\text{NMe}_3)_2]$  получается прекрасно упакованная структура (рис. 6, в). Этот комплекс вполне устойчив. Более того, он потерял способность образовывать клатраты. Роль гостя в данном случае успешно выполняют объемные группы триметилamina. Здесь можно говорить о контактной самостабилизации.

**Стабилизация молекул гостей.** Стабилизация неустойчивых молекул и их конформаций может происходить не только в хозяйской подсистеме клатрата. Молекула 3,3,6,6-тетраметил-S-тетратиана в растворе находится предпочтительно в форме твист-ванны (см. схему 5, а), тогда как в полости клатратного каркаса из молекул гекса-хозяина (см. схему 5, б) находится в форме кресла. Хорошо известная в аналитической химии синяя реакция иода с крахмалом обусловлена образованием полииодидной молекулы в молекулярных каналах амилозы крахмала (рис. 2 в [2]). Стабилизация неустойчивой без хозяина полимерной гостевой молекулы из атомов иода происходит при невалентной поддержке ее стенками канала. При этом химическая природа атомов стенки не играет существенной роли (тот же эффект достигается, если каналы построены из



**Схема 5**

молекул поливинилового спирта). Важно, чтобы не было химического взаимодействия между гостем и хозяином.

Стабилизация молекул гостей при клатрации может быть связана с разделением молекул друг от друга. Таким образом удается предотвратить цепные реакции и благодаря этому удлинить жизнь радикалов на несколько порядков. Крайне неустойчивый тринитроглицерин легко детонирует как в жидком, так и твердом состоянии. Но никакими ухищрениями не удается взорвать клатрат тринитроглицерина с  $\beta$ -циклодекстрином (в качестве хозяина), где каждая молекула тринитроглицерина расположена в отдельной полости, с атомами которой нет никаких валентных взаимодействий [4]. Стабилизация молекул обеспечивается также ограниченным объемом полости, препятствующим удалению продуктов распада. Так, молекула триметиламина в полости клатрасила (клатрасилы – клатраты, каркас которых построен из  $\text{SiO}_2$  на ковалентных связях) не претерпевает никаких изменений после выдержки при  $950^\circ\text{C}$  в течение трех часов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Контактная стабилизация молекул в своем крайнем проявлении – это стабилизация молекул, неустойчивых в собственной фазе (и, следовательно, не существующих в виде индивидуального вещества), за счет невалентного контактирования с молекулами другого сорта, другой геометрии с образованием надмолекулярной фазы (или надмолекулы). Тем более надмолекулярные процессы могут влиять на выбор конформации, таутомера или изомера той или иной молекулы. Проводя аналогию между ролью атома в химии и молекулы в супрамолекулярной химии (как кирпичиков, из которых создается соответствующая постройка), нужно это иметь в виду. Действительно, если никакими химическими ухищрениями нельзя превратить один элемент в другой (вспомним неудачи алхимиков), то с помощью надмолекулярных процессов можно стабилизировать несуществующую молекулу, радикально изменить ее строение и свойства, то есть как бы формировать кирпичик в процессе кладки.

Уже сейчас ясно, что надмолекулярные процессы (и контактная стабилизация, в частности) играют чрезвычайно важную роль в живой природе. Приведем только один пример. Гемоглобин, глобулярный белок с линейными размерами порядка  $55 \text{ \AA}$ , представляет собой надмолекулу, состоящую из белка четвертичной

структуры глобина, который, в свою очередь, состоит из четырех полипептидных субъединиц, связанных между собой лишь межмолекулярными силами. Каждая полипептидная субъединица имеет карман, в котором располагается (опять же без валентных связей) гем – железопорфириновый комплекс. В полости глобина стабилизируется такая конформация гема, в которой имеется гидрофобный карман, вмещающий молекулу кислорода (или углекислого газа) и предохраняющий  $\text{Fe(II)}$  от окисления, хотя молекула кислорода имеет контакт с атомом железа. В свободном геме  $\text{Fe(II)}$  необратимо окисляется молекулярным кислородом до  $\text{Fe(III)}$  [5]. Таким образом, чтобы решить проблему доставки кислорода к тканям организма, Природа вынуждена была создать такое достаточно сложное надмолекулярное образование, как гемоглобин, который по объему более чем в 6000 раз превышает объем молекулы кислорода. Стабилизация структуры гемоглобина и его функционирование обеспечиваются разными механизмами, основанными как на ковалентных, так и межмолекулярных взаимодействиях. Среди них контактная стабилизация играет не последнюю роль.

Автор выражает глубокую благодарность Е.В. Грачеву за помощь в оформлении рисунков.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пожарский А.Ф. Супрамолекулярная химия // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 9. С. 32–47.
2. Дядин Ю.А. Супрамолекулярная химия: Клатратные соединения // Там же. 1998. № 2. С. 79–88.
3. Зоркий П.М., Разуامةва А.Е. О существовании в органических кристаллах молекул, имеющих разное строение // Журн. структур. химии. 1979. Т. 20, № 3. С. 463–466.
4. Davies J., Kemula W., Powell H., Smith N. Inclusion Compounds: Past, Present, and Future // J. Inclusion Phenom. 1983. Vol. 1, № 1. P. 3–44.
5. Блюменфельд Л.А. Гемоглобин // Соросовский Образовательный Журнал. 1998. № 4. С. 33–38.

Рецензент статьи Г.В. Лисичкин

\* \* \*

Юрий Алексеевич Дядин, доктор химических наук, профессор кафедры неорганической химии факультета естественных наук Новосибирского государственного университета, зав. лабораторией клатратных соединений Института неорганической химии СО РАН. Область научных интересов – клатратные соединения, супрамолекулярная химия. Автор около 200 научных публикаций, двух монографий и двух учебных пособий.