

# САМЫЕ МАЛЕНЬКИЕ МАШИНЫ

Осенью каждого года мы узнаём имена новых лауреатов самой престижной научной премии – Нобелевской. Так получилось, что Нобелевских премий по математике нет, а вот к премиям по физике, химии, физиологии и медицине приковано внимание всех учёных.

В 2016 году премию по химии получили француз Жан-Пьер Соваж, голландец Бернард Феринга и шотландец, а ныне американец Джеймс Фрейзер Стодарт – «за проектирование и синтез молекулярных машин». Загадочные слова! Но отчасти понять их суть можно и не зная химии: надо только представлять себе, как устроены молекулы. Попробуем разобраться.

## МОДЕЛИ И КАРТИНКИ

Мельчайшая частица вещества – это его *молекула*.<sup>1</sup> Размер молекулы воды меньше *нанометра*, то есть миллиардной части метра. А число молекул в миллилитре воды сравнимо с числом песчинок в Сахаре и превышает число зёрен пшеницы, съеденных человечеством за всю его историю... Правда, молекула воды – одна из самых маленьких, но и куда более крупные молекулы, такие как белки, всё равно крошечные.

Молекулы состоят из атомов: водорода, кислорода, углерода, азота и других. Но молекула – это ни в коем случае не беспорядочная кучка случайных атомов. Чтобы представить себе ту или иную молекулу, вообразите модель, собранную из конструктора: разные атомы можно представить в виде шариков разных цветов, а соединяющие их силы (ковалентные химические связи) – это стержни (рис. 1). У молекулы каждого вещества не только фиксированный набор шариков, но и своё расположение шариков и стержней. Получается структура в пространстве, имеющая определённую форму: очертания молекулы могут

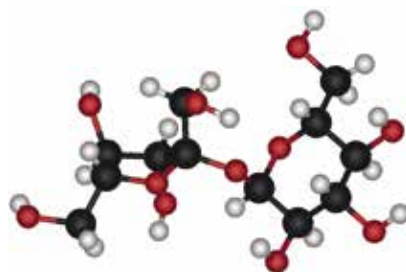


Рис. 1

<sup>1</sup>Это не совсем точно. Например, поваренная соль состоит из заряженных частиц – *ионов*. Но в нашем простом рассказе мы можем забыть об этой неточности.

напомянуть дерево с несколькими ветками, кольцо, короткую или длинную нитку (возможно, скрученную в клубок или намотанную на катушку) и т.д.

Эту трёхмерную картинку можно упрощённо нарисовать на бумаге, заменив шарики буквенными обозначениями атомов, а стержни – чёрточками. Получится *структурная формула* – так химики обычно изображают молекулы. Можно и вовсе убрать буквы – ниже мы так и поступим.

Молекула – не совсем жёсткая конструкция. Связи-стержни могут немного удлиняться и укорачиваться, углы между ними могут меняться, одни части молекулы могут поворачиваться относительно других. Так почему бы не соорудить из молекулы крошечный механизм – добиться того, чтобы одна часть молекулы совершала нужные движения относительно другой? И это будут самые маленькие механизмы в мире.

С большими молекулами у природы всё успешно получается. Так, молекула белка *миозина*, отвечающего за работу мышц, «шагает» вдоль нити из другого белка – *актина*, попеременно переставляя свои «ноги». Есть и другие яркие примеры. Но химики отстают от природы, и со сравнительно небольшими искусственно синтезированными молекулами всё сложнее. Если мы попытаемся значительно изменить форму молекулы, силы внутри неё будут мешать нам. А делать механизм из двух молекул – тоже не выход: в жидкости или в газе, где молекулы движутся довольно свободно, они просто разбегутся в разные стороны. Как же быть?

### СКОВАННЫЕ ОДНОЙ ЦЕПЬЮ

В 1964 году химики впервые получили структуру под названием *катенан*. Но, как часто бывает, основную роль в изучении катенанов сыграли не первооткрыватели, а исследователи, пришедшие позднее. Примерно через 20 лет больших успехов добилась группа Соважа в университете города Страсбурга.

Катенан – это структура, где две молекулы, между которыми нет обычных химических связей, всё же не могут разойтись в пространстве: они сцеплены механически, как два кольца в цепочке (рис. 2, а). Само слово «катенан» и происходит от латинского *catena* – «цепь». А любые структуры из двух или нескольких



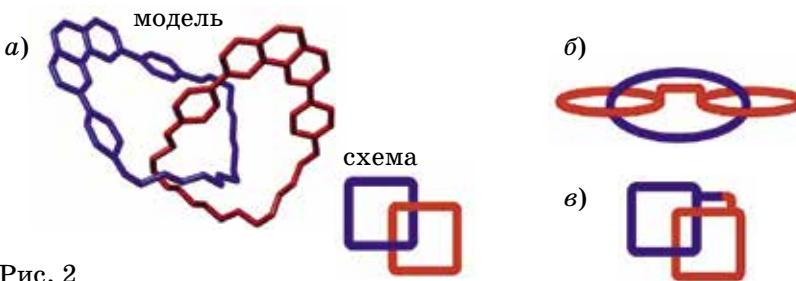


Рис. 2

молекул стали называть *супрамолекулярными*, или надмолекулярными.

В популярной статье мы не можем описать, как химики научились получать сцепленные кольца. Речь идёт о тонкой работе, требовавшей немалой изобретательности: как было сказано в одной газете, Соважу пришлось не легче, чем человеку, который возводит башню из «Лего» в темноте, да ещё и в боксёрских перчатках.

А для нас существенно, что каждое из колец в катенане может довольно свободно двигаться: как поворачиваться вокруг своей оси, так и скользить вдоль второго кольца, при этом оба кольца никак не деформируются. Значит, создать механизм размером с молекулу (ну, с две молекулы) всё-таки реально!

Катенаны могут иметь и более сложное строение: можно соединить несколько колец в цепь или навесить их на одно центральное, как ключи, можно сделать необычные структуры, получившие названия «наручников» (рис. 2, б) или «кренделей» (рис. 2, в), сплести «олимпийские кольца» и т.д. Но перейдём теперь к другим надмолекулярным структурам.

### В ЧЁМ СИЛА? В ГАНТЕЛЯХ!

Если подумать, как ещё можно механически сцепить две молекулы, сразу приходит в голову конструкция типа «кольцо, надетое на гантель» (рис. 3, а). Расширения на двух концах гантели не дают кольцу соскочить, однако между ними оно ездит свободно, а также свободно вращается вокруг оси гантели. Такую конструкцию назвали *ротаксаном*.

Ротаксан отличается от катенана тем, что его, казалось бы, можно расцепить, не разрывая химических связей, – просто деформировав один из концов гантели или растянув кольцо. Но молекулы, из которых состоят реальные ротаксаны, таковы, что на деле конструкция вполне надёжна.

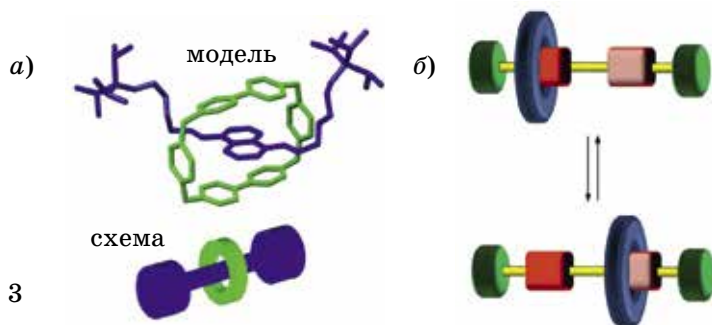


Рис. 3

Идея создания ротаксана возникла у химиков ещё в 1967 году. Но и тут эффективные способы их синтеза появились намного позже, и в их разработке особенно велика заслуга другого нобелевского лауреата – Стоддарта.

Именно из ротаксана Стоддарт изготовил простейшую модель молекулярного переключателя – челнок. В нём кольцо может занимать два разных положения на оси гантели и, соответственно, сдвигаться в ту или другую сторону (рис. 3, б). Если эти положения ещё и химически различны, то можно направленно сдвигать кольцо, просто меняя внешние условия – например, добавляя кислоту.

Как и в случае катенанов, исходную идею можно усложнить: надеть на одну гантель два кольца, или продеть две гантели в одно кольцо, или сцепить две гантели «наручниками», или создать сложные разветвлённые структуры (попробуйте сами их придумать!).

Кстати, именно Стоддарт стал использовать понятные цветные схемы для катенанов, ротаксанов и других надмолекулярных структур (такие, как в этой статье).

### ВЕРТЯ ВИНТОМ, БЕЖАЛ МОТОРЧИК

И всё-таки можно попытаться сделать мотор из одной молекулы. Именно этим путём пошёл Бернارد Феринга в университете города Гронингена (Нидерланды).

Не всякая конструкция, где одна часть вращается относительно другой, будет мотором. Надо, чтобы за счёт поступающей энергии происходило вращение в определённом направлении – как в электромоторе.

Так вот, в 1999 году Феринга и его сотрудники впервые получили молекулярный мотор. В этой молекуле при попеременном нагревании и облучении одна часть поворачивается относительно другой в заданном направлении. А именно, ультрафиолетовое облучение вызывает поворот на 180° вокруг определённой





химической связи, а на стадии нагревания «выворачиваются» группы на концах молекулы, причём так, чтобы следующий поворот был в том же направлении (рис. 4). Затем всё повторяется.

Сейчас уже известно немало молекулярных моторов. Некоторые способны вращаться очень быстро (в отличие от первого мотора Феринги), некоторым не нужно облучение, а хватает химического воздействия. Прогресс не стоит на месте.

### А СМЫСЛ?

Итак, учёные сделали первые шаги к изобретению сверхмалых машин – пока очень примитивных, но они постепенно усложняются. Так, в 2011 году (опять же с участием Феринги) была опубликована статья о «наоавтомобиле» – машинке молекулярных размеров, способной ездить по поверхности металла (рис. 5). Ранее известные молекулы могли лишь беспорядочно «кататься» туда-сюда, а этот автомобиль можно заставить «ехать» в определённом направлении и даже «возить» грузы.

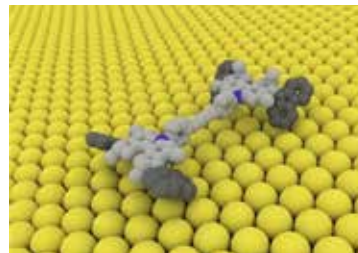


Рис. 5

Используются ли эти сверхмалые машины на практике? Пока ответ – нет. Правда, «моторчик» Феринги уже может вращать стеклянный цилиндр, который намного крупнее его, а «переключатели» Стоддарта могут использоваться для хранения информации. Но всё же это скорее задел на будущее – на то время, когда эти машины, размером в тысячи раз меньше толщины волоса, станут более доступными и совершенными.

И тогда крошечные механизмы могут сыграть огромную роль, например, доставляя лекарства к нужному месту в организме. И как изобретение электромотора изменило мир не сразу, а через десятки лет, так и изобретение молекулярных машин может изменить мир для наших детей и внуков.

Художник Мария Усеинова