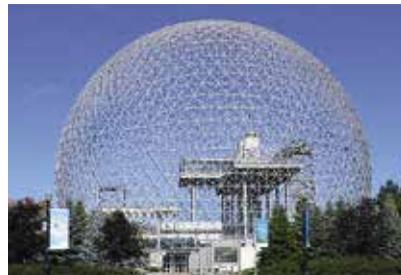


# МЯЧИ и ТРУБКИ, или что такое ФУЛЛЕРЕНЫ

**Фуллерены** – чуть ли не самые известные и необычные вещества из открытых в конце XX века. Мы попытаемся рассказать о том, чем они известны и почему необычны.

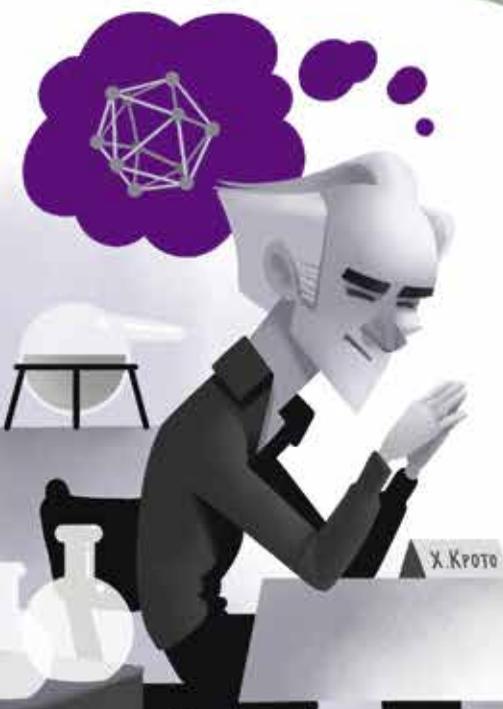
## ДВА ПРЕДИСЛОВИЯ

*История первая.* В 1967 году посетителей Всемирной выставки в Монреале поразил павильон США – здание в форме сферы, собранной из множества треугольников. Его архитектором был изобретатель Ричард Бакминстер Фуллер. Благодаря ему такие купола скоро стали популярными по всему миру – когда-то можно было видеть одну из построек Фуллера и в московском парке «Сокольники». Эти сооружения прочны, легко собираются, хорошо подходят для строительства в ветреных местностях, да и просто красивы. Кстати, похожие конструкции, только поменьше и проще, есть и на многих детских площадках.



*История вторая.* В сентябре 1985 года в Техас приехал британский учёный Харольд Крото. Он изучал химические процессы в атмосфере некоторых звёзд и узнал, что в Техасском университете Райса у профессора Ричарда Смолли есть установка, позволяющая исследовать кластеры (скопления) атомов. Крото, Смолли и их соавтор Роберт Кёрл решили попробовать, не получится ли на этой установке что-нибудь похожее на результаты «звёздных» наблюдений. Взяли графит – всем известный материал карандашного грифеля. Испарили его с помощью лазера, охладили пары и проанализировали... Исследование казалось рядовым, никто и представить не мог, что эти дни изменят не только современную астрономию, но и физику, химию, науку о материалах и даже медицину.

Чтобы понять, какова связь между этими историями и при чём тут фуллерены, понадобится немножко химии и даже математики.



## ЧТО МОЖНО ПОСТРОИТЬ ИЗ УГЛЕРОДА?

Жизнь на Земле устроена так, что главный химический элемент в ней – углерод. Именно он – основа всех биологических молекул. Но в них есть и другие атомы – водород, кислород, азот... А вот какими могут быть структуры, где нет ничего, кроме углерода?

Издавна известны две кристаллические формы углерода – алмаз и графит. В кристаллах алмаза (рис. 1) каждый атом образует одинаковые связи с четырьмя соседями, и получается очень твёрдая и устойчивая структура. В графите (рис. 2) атомы расположены слоями, слабо связанными между собой. Поэтому мы и можем писать графитовыми карандашами – при нажатии часть слоёв остаётся на бумаге.

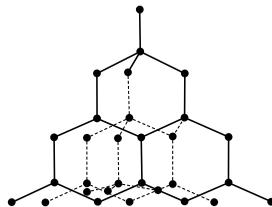


Рис. 1

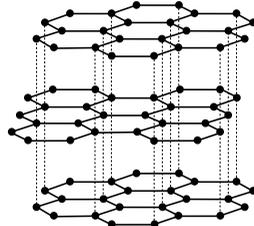


Рис. 2

Оказывается, есть и другие формы углерода. В 60-е годы XX века химики получили карбин – в нём углеродные атомы располагаются в виде линейных цепочек. Примерно тогда же был открыт лонсдейлит – немного изменённый алмаз. А вот отдельная молекула из нескольких десятков атомов углерода казалась продуктом фантазии.

Правда, у некоторых учёных эти фантазии всё же возникали. Ещё в 70-е годы XX века японский исследователь Осава предсказал, что такие молекулы возможны. Но его статью (на японском!) не прочли ни в Европе, ни в Америке. А советские учёные провели теоретические расчёты для воображаемой молекулы из 60 атомов – но статья на русском языке вновь не привлекла внимания. И сейчас споры «кто был первым» так же абстрактны, как споры об открытии Америки: всё равно для европейцев её открыл Колумб, а фуллереновый «материк» для нас открыли Крото, Смолли и Кёрл.

Поставив эксперимент, эти учёные обнаружили, что из паров графита в небольших количествах образуются неизвестные вещества. В основном – вещество, молекула которого состоит (это легко установить) ровно из 60 атомов углерода. Но не было прямых данных о том, как устроена эта молекула. Её надо было придумать.



И была придумана симметричная структура, которая потом подтвердилась (рис. 3). Она, как футбольный мяч, «сшита» из пятиугольников и шестиугольников.

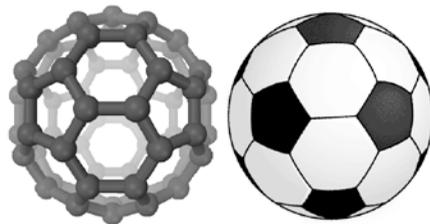


Рис. 3

А вот на мысль о таком строении отчасти натолкнули именно купола Бакминстера Фуллера (в них действительно можно видеть шестиугольники, составленные из треугольников!)<sup>1</sup>. И в его честь вещество назвали *бакминстерфуллереном*. Сначала название вызвало недоумение: «Ведь про этого Фуллера почти никто не знает!». «Теперь узнают», – ответил Крото.

Молекула из 60 атомов – хоть и самый известный, но не единственный фуллерен. Есть целое семейство похожих молекул. Уже в первых опытах было обнаружено и вещество, молекула которого состоит из 70 атомов углерода. Зная про футбольный мяч, придумать возможные варианты здесь было уже проще: достаточно вставить по экватору «поясок» из 10 дополнительных атомов. Только мяч выйдет немного вытянутым – как для регби (рис. 4).

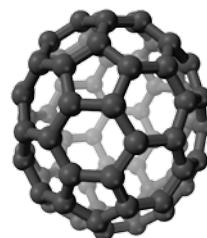


Рис. 4

Дальше дело пошло быстро. Через пять лет после открытия фуллеренов их научились получать в достаточно больших количествах – несколько граммов. Открыли фуллерены с самыми разными количествами атомов углерода. Исследовали их свойства. Нашли их следы в природе – оказывается, они образуются при горении природного газа и разрядах молний. И, наконец, круг замкнулся – фуллерены, открытие которых началось с космических исследований, действительно были обнаружены и в космосе.

### ФУЛЛЕРЕНЫ КАК МНОГОГРАННИКИ

Не только химики, но и математики любят фуллерены – это примеры красивых многогранников, для которых можно делать разные расчёты. Для матема-

<sup>1</sup> Говорят, что И. В. Станкевич – один из учёных, проводивших в 70-е годы XX века расчёты этой молекулы, – предсказал её из своих соображений: «22 здоровых мужика часами пинают футбольный мяч, и с ним ничего не делается. Молекула такой формы должна быть очень крепкой».

тика молекула бакминстерфуллерена – это усечённый икосаэдр (рис. 5), грани которого – правильные пятиугольники и почти правильные шестиугольники. Из каждой из 60 вершин выходит по три ребра, поэтому общее число рёбер –  $60 \cdot 3 / 2 = 90$ . А число граней можно найти по формуле Эйлера  $V - P + G = 2$ , где  $V$ ,  $P$  и  $G$  – соответственно числа вершин, рёбер и граней. Получаем 32 грани, из них 12 пятиугольников и 20 шестиугольников.

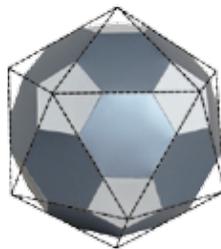


Рис. 5

У других фуллеренов в каждой вершине тоже сходится по три ребра и тоже есть только пятиугольные и шестиугольные грани. Но может быть другое число вершин – поэтому будут другие числа рёбер и граней. Однако можно доказать, что пятиугольных граней всегда будет ровно 12 – попробуйте это сделать.

Самый «маленький» фуллерен содержит 20 атомов углерода и имеет форму додекаэдра, то есть у него только пятиугольные грани. Правда, такая молекула химически малоустойчива и в природе не встречается. Фуллеренов из нечётного числа атомов не существует (подумайте, почему). Оказывается, нет и фуллеренов из 22 атомов. Из 24 атомов – всего один, из 26 – тоже один. А дальше их число растёт очень быстро: ведь пятиугольные и шестиугольные грани могут располагаться как угодно, не обязательно симметрично. Компьютерные расчёты дают, например, 40 вариантов для 40 атомов, 1812 для 60 атомов и почти 300 тысяч для 100 атомов. Конечно, далеко не все эти молекулы получены химиками, да это и не нужно.

### ДРУГИЕ ФОРМЫ

Почему бы не попытаться сделать молекулы не в виде шариков, а в виде длинных трубок из шестиугольников? Такие структуры назвали *нанотрубками*. «Нано-» – потому что их диаметр порядка нанометра, то есть одной миллиардной доли метра. А вот длина может быть очень большой, до миллиметров и даже сантиметров.

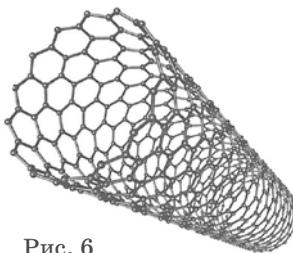
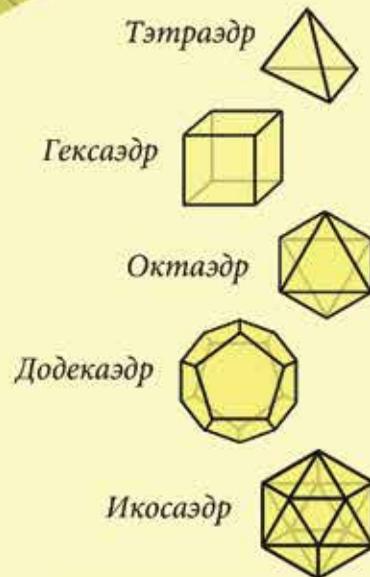


Рис. 6

Дальше – больше. Трубки можно вкладывать друг в друга – тогда говорят о многостенных нанотрубках



$$V - P + G = 2$$



типа «матрёшек». Можно сделать многостенную трубку и по-другому – в форме свитка. Можно снаружи насадить шарик-фуллерен на стенку трубки – такой вырост называют почкой, а можно вложить несколько молекул фуллеренов внутрь трубки, и эта структура, конечно, называется стручком. Можно поместить один фуллереновый шарик внутрь другого и третьего – это нанолуковица. Можно внутри шарика или трубки расположить «начинку» из других атомов (это, в частности, очень важно для медиков, так как помогает доставлять лекарственную начинку в нужное место организма). И чем дальше, тем больше идей.

А если представить себе нанотрубку, которую разрезали вдоль стенки и расправили на плоскости? Получится структура из шестиугольников, похожая на один слой атомов в графите. Такой материал из одного «графитового» слоя существует, он был открыт не так давно и назван графеном. Но это уже другая история.

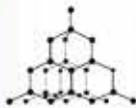
### ЭТО ВСЁ ХОРОШО, А ГДЕ ЖЕ ПОЛЬЗА?

Добавки фуллеренов в чугун, сталь, полупроводники, керамику, полимеры улучшают характеристики этих материалов или придают им новые свойства. Постоянно появляются публикации о возможностях применения фуллеренов в медицине – от ранозаживляющих повязок до средств против СПИДа и опухолей (но, к сожалению, пока мы далеко не всё знаем об их воздействии на организм и о возможных рисках). А если говорить про нанотрубки, то это прежде всего сверхпрочные микроскопические стержни и нити. Вполне возможно, что когда-нибудь из них удастся сделать трос толщиной в волос, который будет удерживать груз в сотни килограммов. Есть и другие удивительные свойства: например, из нанотрубок создано самое чёрное из известных веществ – оно поглощает свет эффективнее, чем самый чёрный уголь. Уже сейчас нанотрубки включаются в состав сложнейших научных приборов, используются в микроэлектронике. Ежегодно появляются сотни изобретений и патентов.

Но технологии получения фуллеренов далеки от идеала. Так что пока фуллерены и нанотрубки в основном остаются материалами будущего, и хоть оно уже не за горами, самые интересные находки ещё впереди.



$C_{60}$   
ФУЛЛЕРЕН



АЛМАЗ



ГРАФИТ



CARBONEUM