

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	12
Раздел 1. ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ	
Глава 1. ИСТОКИ ХИМИИ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ	18
Идея о макромолекуле	18
Экспериментальные доказательства Штаудингера	23
Подтверждения Сведберга, Марка и Мейера	26
Специфические свойства высокомолекулярных соединений	29
Становление самостоятельной науки	29
Глава 2. ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ И ОЛИГОМЕРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ	34
Высокомолекулярные соединения	34
Олигомерные соединения	35
Классификация олигомеров по происхождению	36
Раздел 2. КЛАССИФИКАЦИЯ И НОМЕНКЛАТУРА ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ	
.....	44
Глава 3. КЛАССИФИКАЦИЯ	46
Происхождение высокомолекулярного соединения	46
Конфигурация цепи в целом	48
Линейные и нелинейные цепи	48
Классификация разветвленных цепей	49
Сшитые цепи	51
Химический состав цепи	52
Вид и взаимное расположение мономерных звеньев в цепи	54
Классификация сополимеров.....	54
Глава 4. НОМЕНКЛАТУРА	58
Номенклатура линейных высокомолекулярных соединений	58
Номенклатура линейных органических высокомолекулярных соединений.....	58
Номенклатура линейных элементоорганических и неорганических	
высокомолекулярных соединений	66
Номенклатура нелинейных высокомолекулярных соединений	67
Раздел 3. СТРУКТУРА МАКРОМОЛЕКУЛЫ	70

Глава 5. МОЛЕКУЛЯРНО-МАССОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ	72
Неоднородность по молекулярной массе	72
Средние значения молекулярной массы	73
Среднечисловая молекулярная масса	73
Среднемассовая молекулярная масса	74
Среднеседиментационная молекулярная масса	74
Средневязкостная молекулярная масса	74
Характеристики неоднородности по молекулярной массе	75
Показатель полидисперсности	75
Кривые молекулярно-числового и молекулярно-массового распределения	76
Методы фракционирования	77
Практическая значимость молекулярно-массовых характеристик	79
Глава 6. КОНФИГУРАЦИЯ МАКРОМОЛЕКУЛЫ	84
Конфигурационные уровни макромолекул с псевдоасимметричными атомами	84
Конфигурация мономерного звена	85
Конфигурация диады	85
Дальний конфигурационный порядок и тактичность	88
Конфигурация цепи в целом	91
Конфигурации макромолекул с асимметричными атомами	92
Дитактичность	93
Конфигурационные уровни макромолекул с центрами л-диастереомерии	94
Влияние конфигурации макромолекул на фазовую структуру и свойства высокомолекулярных соединений	97
Глава 7. КОНФОРМАЦИЯ МАКРОМОЛЕКУЛЫ	102
Конформационные уровни макромолекул	102
Конформация мономерного звена	102
Конформация диады	104
Дальний конформационный порядок	104
Конформация цепи в целом	108
Глава 8. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ГИБКОСТЬ МАКРОМОЛЕКУЛЫ	114
Модель свободно сочлененной цепи	114
Модель с фиксированными валентными углами	122
Модель заторможенного вращения	123
Вывод функции распределения расстояний между концами свободно сочлененных цепей	125
Глава 9. СЕГМЕНТ МАКРОМОЛЕКУЛЫ	140
Сегмент Куна	140
Факторы, определяющие термодинамическую гибкость	142
Конфигурация основной цепи	142
Полярность боковых групп	148
Объем боковых групп	148
Взаимное расположение боковых групп	148
Конфигурация цепи в целом	149
ПРИЛОЖЕНИЯ	154
Приложение 1. ПЕРЕЧЕНЬ ОПРЕДЕЛЕНИЙ	156

Приложение 2. УКАЗАТЕЛЬ РИСУНКОВ	160
Приложение 3. УКАЗАТЕЛЬ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ	162
Приложение 4. УКАЗАТЕЛЬ ТАБЛИЦ	164
Приложение 5. ОСНОВНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ.....	166
Приложение 6. НАЗВАНИЯ И ФОРМУЛЫ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ1	
Приложение 7. СПИСОК ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ ХИМИИ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ	182

Глава 7. КОНФОРМАЦИЯ МАКРОМОЛЕКУЛЫ

Вследствие внутреннего теплового движения, а также под действием внешней энергии — тепловой, химической, механической, электрической и магнитной — макромолекулы способны принимать множество различных форм. Постоянно меняющиеся, «мгновенные», формы называют конформациями. Термин «конформация» произошел от латинского слова *conformis*. Буквальный перевод *conformis* — сходный, подобный.

Конформация макромолекулы — взаимное расположение атомов в макромолекуле, изменяющееся в процессе теплового движения или под действием внешних сил.

Одна конформация переходит в другую путем вращения групп атомов вокруг одинарных связей основной цепи. Цепь данной конфигурации может принимать множество конформаций. Способность цепи к конформационным превращениям характеризует гибкость макромолекулы.

Конформация цепи определяется длинами связей, углами между связями (валентными углами) и углами внутреннего вращения (углами вращения вокруг связей основной цепи). Для обозначения углов внутреннего вращения рекомендуется использовать одну из последних букв греческого алфавита, например ϕ [1].

Как и в случае конфигурации, описывая конформацию макромолекулы, указывают конформационные уровни макромолекулы [2]:

1. конформацию мономерного звена;
2. ближний конформационный порядок — конформация диады;
3. дальний конформационный порядок — конформация блока;
4. конформацию цепи в целом.

Целесообразно обсудить конформационные уровни на примере сравнительно простых виниловых макромолекул.

КОНФОРМАЦИОННЫЕ УРОВНИ МАКРОМОЛЕКУЛ

Конформация мономерного звена

Структура мономерных звеньев виниловых высокомолекулярных соединений аналогична структуре соответствующих молекул низкомолекулярных соединений. Следовательно, описание конформационных изомеров мономерного звена

логично начать с обсуждения конформаций органических низкомолекулярных соединений как простых аналогов.

Предварительно необходимо уточнить терминологию. Термин «конформационный изомер» имеет следующие синонимы:

- конформер;
- поворотный изомер;
- ротамер.

Существует синонимия и в названиях конформаций.

Синперипланарная конформация, обозначаемая буквой латинского алфавита С, называется также *цис-конформацией* или *заслоненной конформацией*. Угол внутреннего вращения $\psi = 0^\circ$ [1].

Антиперипланарная конформация, обозначаемая буквой латинского алфавита «Т», называется также *транс-конформацией* или *заторможенной конформацией*. Углы внутреннего вращения $\psi = \pm 180^\circ$ [1].

Синклиальная конформация, обозначаемая буквой латинского алфавита «G», называется также *гош-конформацией* или *скошенной конформацией* (фр. *gauche* — левый, неуклюжий, косой). Углы внутреннего вращения $\psi = \pm 60^\circ$ [1].

При вращении атомных групп вокруг связей основной цепи по часовой стрелке конформации обозначают знаком «плюс» (например G +), против часовой стрелки — знаком «минус» (например G -).

Указанные конформации представлены на рис. для молекулы 1,2-дихлорэтана $\text{ClH}_2\text{C}-\text{CH}_2\text{Cl}$.

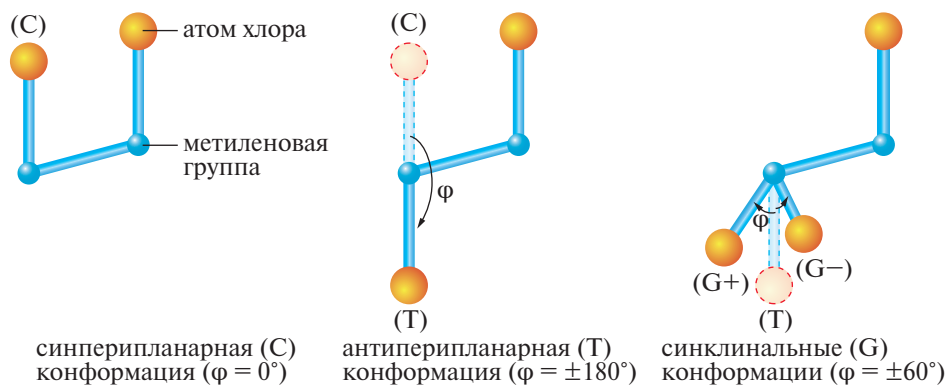


Рис. 13. Конформации молекулы 1,2-дихлорэтана

В синперипланарной конформации, когда $\psi = 0^\circ$, расстояние между атомами хлора минимальное, а в антиперипланарной, когда $\psi = 180^\circ$, — максимальное (рис.). В синклиальных конформациях, когда $\psi = 60^\circ$, между атомами хлора реализуются промежуточные расстояния (рис.). Расстояние между атомами определяет энергию их взаимодействия. Следовательно, синперипланарная конформация соответствует максимуму потенциальной энергии молекулы из-за отталкивания атомов хлора и, значит, неустойчива [3, 4]. Энергетическому минимуму отвечает устойчивая антиперипланарная конформация, при которой один атом хлора повернут вокруг углерод-углеродной связи на угол 180° относительно другого (рис.). Для нивелирования сил отталкивания хлор может также поворачиваться на угол 60° (относительно положения атома хлора в антиперипланарной

(Т) конформации), реализуя синклиальные конформации: $G \pm$, — с промежуточными значениями потенциальной энергии (рис.). Синклиальные конформации менее устойчивы, чем антиперипланарная, но более устойчивы по сравнению с синперипланарной [3, 4]. Согласно П. Дж. Флори [5], в реальной макромолекуле синклиальные изомеры $G +$ и $G -$ обладают разной энергией.

Таким образом, при вращении атомов хлора потенциальная энергия молекулы 1,2-дихлорэтана изменяется, проходя через минимумы и максимумы. Свободу вращения ограничивает энергетическое взаимодействие атомов хлора, обуславливающее *энергетическую предпочтительность* определенной позиции атомов в молекуле [3, 4]. Итак, конформация молекулы 1,2-дихлорэтана представляет собой равновесную смесь сравнительно устойчивых изомеров: Т и $G \pm$.

Экстраполяция приведенных результатов от малых молекул к мономерному звену высокомолекулярного соединения позволяет заключить, что *конформации виниловых звеньев* $—CH_2—CH(R)—$ представляют собой смесь антиперипланарного Т и двух синклиальных $G \pm$ изомеров.

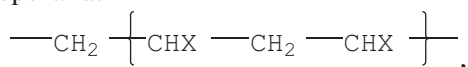
При поглощении макромолекулой тепловой энергии (kT) из внешней среды возможен переход в энергетически невыгодную синперипланарную конформацию (С). Для этого конформационного перехода необходимо преодолеть потенциальный энергетический барьер вращения U_0 . При соотношении $kT > U_0$ реализуется так называемое *незаторможенное вращение*. При соотношении $kT < U_0$ имеет место *заторможенное вращение*. В процессе заторможенного вращения структурный элемент только колеблется относительно положений с минимумом потенциальной энергии: Т и $G \pm$.

Потенциал торможения — потенциальный барьер заторможенного вращения.

Высота потенциала торможения определяется величиной энергии внутри- и межмолекулярного взаимодействий.

Конформация диады

Диада виниловой макромолекулы, выделенная фигурными скобками, сходна с молекулой 1,2-дихлорэтана:



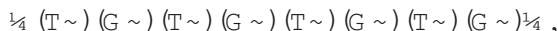
где Х обозначает боковую группу, например Cl.

Соответственно конформация виниловой диады, подобно конформации молекулы 1,2-дихлорэтана, определяется равновесием антиперипланарного (Т) и двух синклиальных ($G \pm$) изомеров.

Дальний конформационный порядок

Дальний конформационный порядок характеризуется последовательностью конформаций большого количества звеньев, диад. Очевидно, что дальний конформационный порядок виниловых макромолекул определяется чередованием антиперипланарного (Т) и двух синклиальных изомеров ($G \pm$). Чередование может быть беспорядочным и закономерным. Беспорядочное чередование характерно для цепей аморфных виниловых высокомолекулярных соединений, закономерное — для кристаллических.

Например, дальний конформационный порядок *изотактических виниловых полимеров в кристаллическом состоянии* описывается последовательностью [1]:



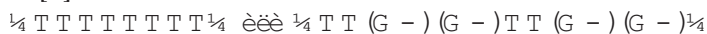
где знак «~» указывает на отклонения от точного значения угла внутреннего вращения ϕ .

На основании рентгеноструктурного анализа Дж. Натта и А. Коррадини [6] определили дальний конформационный порядок изотактического полипропилена в кристаллическом состоянии как регулярное чередование антиперипланарного (Т) и синклинального ($G \pm$) изомеров:



Следует отметить, что все синклинальные изомеры здесь одинаковые — либо только $G +$, либо только $G -$.

Дальний конформационный порядок синдиотактического полипропилена в кристаллическом состоянии реализуется двумя вариантами. Первый вариант — последовательность только из антиперипланарных изомеров; второй — последовательность из регулярно чередующихся пар антиперипланарного и синклинального изомеров [6]:



Взаимное расположение антиперипланарных и синклинальных изомеров предопределяет *пространственную форму* макромолекулы на уровне дальнего конформационного порядка. В частности, рис. иллюстрирует пространственное регулярное чередование антиперипланарного (Т) и синклинального ($G -$) изомеров в изотактической цепи полипропилена.

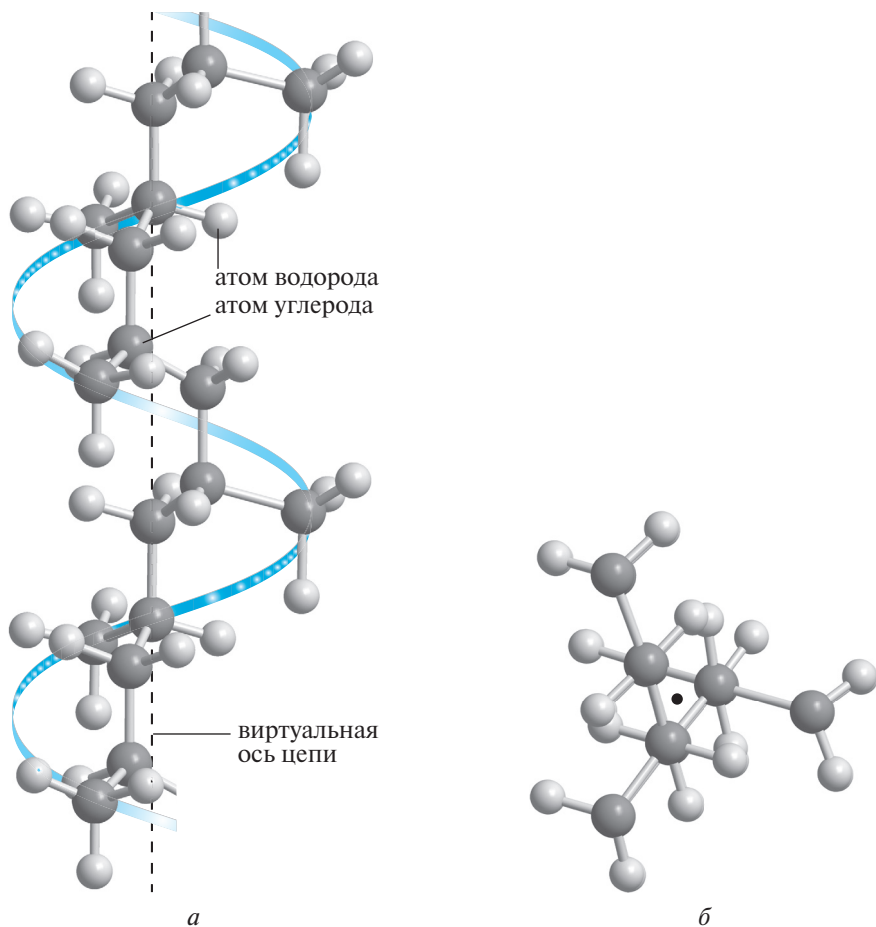


Рис. 14. Схема спирали изотактического полипропилена в двух ортогональных проекциях: вдоль (а) и перпендикулярно (б) оси цепи

Следствием указанного чередования является то, что метильные группы изотактического полипропилена располагаются в пространстве по линии, закрученной в спираль (рис. а). Действительно, если соединить центры С-атомов метильных групп, то соединяющая линия будет спиралью. Причем, четвертая, седьмая, десятая... метильные группы имеют то же относительное пространственное расположение, что и первая (рис. а, б). На один виток спирали приходится три мономерных звена. Именно такая спиральная конформация обеспечивает минимальное взаимодействие метильных групп и тем самым минимизирует внутреннюю энергию макромолекулы $\left[\text{CH}_2\text{CH}(\text{CH}_3) \right]_n$. Все изотактические макромолекулы полимеров в твердом состоянии имеют спиральную конформацию [7].

Для обозначения спиралей используют символ n — число конформационных повторяющихся звеньев, приходящихся на один виток спирали.

Определение термина по IUPAC [1]:

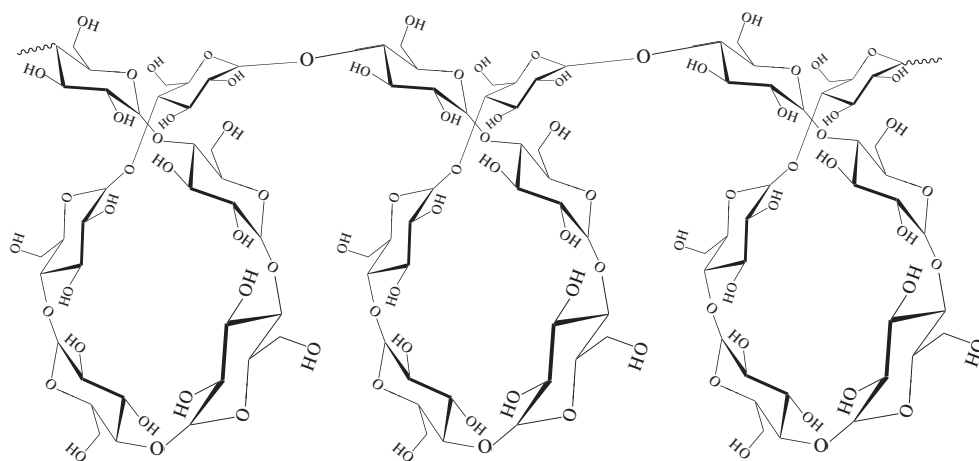
Конформационное повторяющееся звено в кристаллическом высокомолекулярном соединении — наименьшее звено в данной конформации,

которое повторяется с помощью операций симметрии, включающих в себя трансляцию.

Макромолекула изотактического полипропилена представляет собой спираль, для которой $n = 3$.

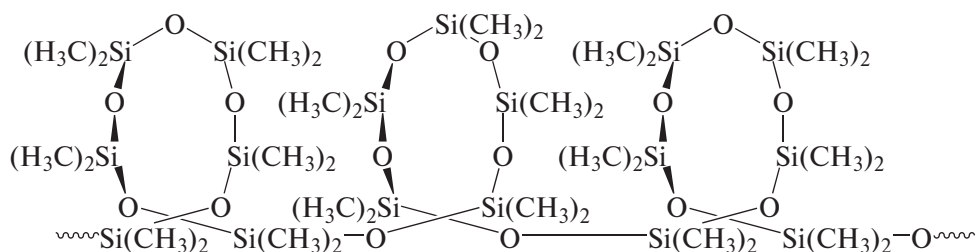
Степень свернутости (или закрученности) спирали обозначается также *классом спирали* Xy , где X — число звеньев, y — число витков. Соответственно макромолекула изотактического полипропилена образует спираль класса 3_1 (рис.).

Здесь уместно отметить, что кристаллограф К. В. Банн постулировал спиральные конформации регулярных виниловых макромолекул еще в 1942 г. [8]. Экспериментальное подтверждение Дж. Натта и А. Коррадини последовало примерно через десять лет. Спираль — типичная конформация стереорегулярных макромолекул разной конфигурации, как-то: ДНК, целлюлозы, амилозы, синдиотактического полипропилена, полиэтиленоксида, цистактического 1,4-полибутадиена, полидиметилсилоксана:



спираль амилозы

В частности, макромолекула амилозы представляет собой спираль, для которой число конформационных повторяющихся звеньев, приходящихся на один виток, равно 6. Это спираль класса 6_1 . При взаимодействии амилозы с йодом в водном растворе молекулы йода входят во внутренние каналы спирали. В результате образуется так называемое соединение включения. Оно имеет синий цвет. Эта цветная реакция используется в аналитических целях для обнаружения как крахмала, так и йода (йодкрахмальная проба). Соединение включения амилоза — йод востребовано также в пищевой промышленности [9]. Йод, включенный в спираль амилозы, теряет неприятный вкус и запах. Добавка крахмала, содержащего соединение включения амилозы, в кондитерские изделия повышает их биологическую активность и расширяет ассортимент кондитерских изделий.



спираль полидиметилсилоксана

В цепи полидиметилсилоксана связь кремний – кислород представляет собой слабый диполь $\text{Si}^{\delta+}-\text{O}^{\delta-}$. В спирали полидиметилсилоксана кремний, являющийся положительным концом диполя, расположен напротив кислорода — отрицательного конца диполя [10].

Конформация цепи в целом

Тепловое движение и внешние факторы вызывают непрерывное изменение формы индивидуальной макромолекулы, и когда речь идет о той или иной конформации цепи в целом, имеется в виду **статистическая конформация**.

Конформация цепи в целом — усредненная по времени и пространству форма, которую макромолекула принимает в результате внутреннего теплового движения и внешних воздействий.

Количественной характеристикой конформации линейной цепи в целом служит среднеквадратичное расстояние между концами цепи: $\bar{h}^2 \propto n^2$. Расстояние между концами характеризует только цепи линейной конфигурации, поскольку разветвленные макромолекулы имеют больше двух концов.

Типичные конформации линейной макромолекулы. Линейные цепи существуют в следующих статистических конформациях:

- клубок;
- глобула;
- складчатая;
- стержень.

Клубок. Клубкообразные, свернутые, формы типичны для *гибких* макромолекул, обладающих выраженной способностью к конформационным переходам, например: цепей полиэтилена, полипропилена, полиметилметакрилата, полидиметилсилоксана. В частности, дальний конформационный порядок в виде беспорядочного чередования антиперипланарного (Т) и двух синклиальных (G ±) изомеров в макромолекуле полиэтилена обуславливает клубкообразную конформацию цепи в целом (рис.).

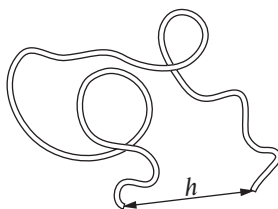


Рис. 15. Конформация клубок

Статистический клубок — совокупность мгновенных свернутых конформаций.

Характерные особенности статистического клубка [11]:

- низкая плотность звеньев;
- флуктуация плотности звеньев в объеме клубка.

Термин «флуктуация (флюктуация)» произошел от латинского слова *fluctuatio*. Буквальный перевод *fluctuatio* — колебание.

Флуктуация — временное, случайное отклонение от равномерного распределения структурных единиц в системе, возникающее в результате теплового движения.

Таким образом, речь идет о *средней* плотности звеньев в объеме макромолекулярного клубка. Конформацию «статистический клубок» для упрощения называют просто «клубок». Средняя плотность клубка убывает с ростом длины макромолекулы. Соответственно для цепей с большой степенью полимеризации клубок — крайне рыхлое образование. Так, если молекулярная масса полимера составляет около 1 000 000, мономерные звенья занимают всего 1 % среднего объема клубка [12]. Клубок — флуктуирующая и, следовательно, очень неоднородная система [11].

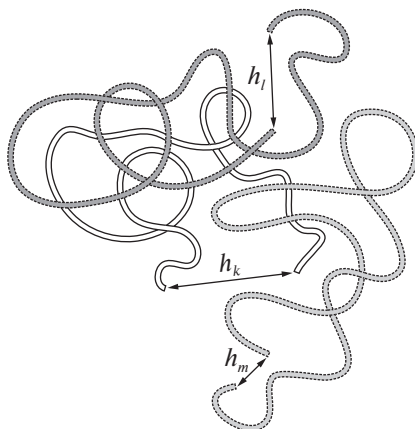


Рис. 16. Множество свернутых клубкообразных конформаций;

$$h_k, h_l, h_m \in [L; n]$$

Если гибкая макромолекула «предоставлена сама себе» (иными словами, отсутствуют силы, заставляющие ее принимать некую особую форму), то мгновенные конформации цепи в подавляющем большинстве окажутся свернутыми (рис.) [8]. В этом можно легко убедиться, бросая с высоты на пол длинную и тонкую веревку, моделирующую гибкую полимерную цепь.

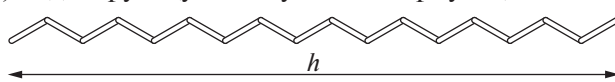


Рис. 17. Конформация стержень

Вероятность того, что веревка на полу вытянется в стержень, когда $h = L$, где L — длина «макромолекулы-веревки», максимально вытянутой без нарушения валентных углов (рис.), или максимально плотно свернется, когда $h = 0$ (рис.), ничтожно мала. Чаще всего упавшая веревка будет принимать рыхлые свернутые

формы с неким промежуточными значением h между концами. Промежуточное значение h характерно для клубкообразной конформации (рис. и).

Приведенные рассуждения носят описательный качественный характер. Количественная оценка вероятности существования гибкой цепи в той или иной конформации приведена в **Главе 8**.

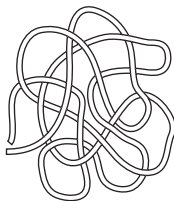


Рис. 18. Конформация глобула

Клубкообразная конформация реализуется в растворах, расплавах и в аморфных телах гибкоцепных соединений. В разбавленном растворе весь свободный объем внутри клубков занят частицами (молекулами, ионами) растворителя. С ростом концентрации раствора клубки проникают друг в друга. Надмолекулярная структура концентрированных растворов, расплавов и аморфных тел гибкоцепных высокомолекулярных соединений представляет собой совокупность перекрывающихся статистических клубков.

Надмолекулярная структура высокомолекулярного соединения — пространственная организация множества макромолекул.

На рис. представлена схема надмолекулярной структуры аморфного полимерного тела из гибких цепей.

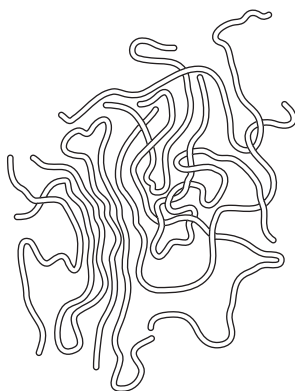


Рис. 19. Совокупность перекрывающихся статистических клубков

В частности, такую структуру имеет атактический полиметилметакрилат (оргстекло), *цис*-1,4-полиизопрен (натуральный каучук). Подобная надмолекулярная организация обуславливает специфическое свойство высокомолекулярных соединений — эластичность.

При одноосном растяжении аморфного линейного гибкоцепного полимера происходит конформационный переход «клубок → стержень», вызванный действием внешней механической силы (рис.).

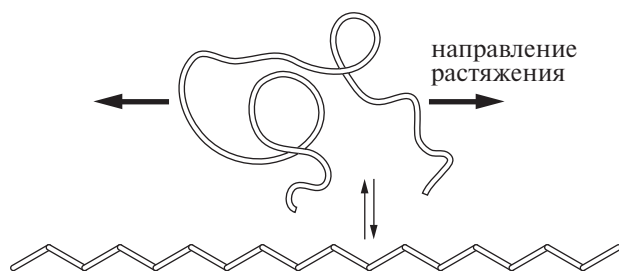


Рис. 20. Конформационный переход клубок → стержень

Согласованные конформационные переходы множества цепей обеспечивают многократное удлинение полимерного тела. Например, конформационные переходы макромолекул натурального каучука обуславливают восьмикратное удлинение образца в процессе его одноосного растяжения.

Глобула. Статистическая глобула (лат. *globulus* — шарик) — конформация гибких макромолекул. Для упрощения слово «статистическая» опускают. Глобула образуется в результате предельного скручивания цепи в компактную сферическую частицу (рис.). Среднеквадратичное расстояние между концами цепи в глобулярной конформации близко к нулю: $\bar{a}^2 \approx n^2 \approx 0$.

Статистическая глобула — совокупность мгновенных предельно свернутых конформаций.

Характерные особенности статистической глобулы [11]:

- высокая плотность звеньев;
- отсутствие больших флуктуаций плотности звеньев в объеме глобулы.

Плотность глобулы значительно выше плотности клубка той же макромолекулы [11].

Условия реализации глобулярной конформации:

- преобладание внутримолекулярного взаимодействия над межмолекулярным;
- низкое термодинамическое сродство высокомолекулярного соединения и растворителя;
- разбавленный высокомолекулярного соединения раствор.

Таким образом, существование глобулы обусловлено выгодностью взаимодействия мономерных звеньев. Сжатие некоторых белковых макромолекул, в частности ферментов, в глобулу объясняется гидрофобным взаимодействием. Примерно половина из 20-ти сомономерных звеньев ферментов является гидрофобной. Во избежание контактов с водой гидрофобные звенья макромолекулы ассоциируют и образуют ядро глобулы. На поверхности глобулы расположены гидрофильные фрагменты макромолекулы.

Конформацию статистической глобулы принимают, например, макромолекулы гемоглобина и гликогена, выполняющие в организме транспортные функции. Глобулярная конформация обеспечивает минимальное трение фрагментов цепи о частицы дисперсионной среды и, следовательно, максимальную скорость транспорта макромолекул в сравнении с альтернативными конформациями — клубком, стержнем.

Глобулярная конформация реализуется в растворах и в аморфных телах гибкоцепных соединений. Совокупность глобул организует глобулярную надмолекулярную структуру.

Складчатая конформация. Это конформация *гибких* макромолекул.



Рис. 21. Складчатая конформация

Возникает в результате поворота фрагментов цепи на 180° и складывания цепи на себя (рис.). Например, такое складывание спирали изотактического полипропилена формирует складчатую конформацию его цепи в целом.

Условие реализации складчатой конформации:

- самопроизвольная кристаллизация гибкоцепных высокомолекулярных соединений.

Совокупность складчатых цепей образует пластинчатые кристаллы гибкоцепных высокомолекулярных соединений (**Глава 10**), в частности, изотактического полипропилена, полиэтилена, полиэтиленоксида, полиэтиленадипината.

Стержень. Синонимичное название — вытянутая конформация (рис.). Среднеквадратичное расстояние между концами цепи в конформации стержень равно контурной длине цепи: $\overline{r_n^2} = L$. Стержень представляет собой предельно упорядоченную конформацию [12].

Условия реализации конформации стержень:

- жесткость цепи;
- принудительное внешнее воздействие.

Жесткие цепи самопроизвольно принимают конформацию стержень в растворах, расплавах, в кристаллах. Гибкие цепи принимают конформацию стержень под действием вынуждающих внешних сил. Принудительным внешним воздействием может быть, например, растягивающее механическое напряжение, о чем уже шла речь при трактовке явления эластичности (рис.). Кроме того, кулоновское отталкивание одноименно заряженных групп в цепи, например полиакриловой кислоты, сильная сольватация макромолекулы частицами растворителя, межмолекулярное взаимодействие в кристалле или в жидком кристалле также способствуют реализации вытянутой конформации.

Конформации стержень имеют, в частности, макромолекулы коллагена, кератина, выполняющие в организме конструкционные функции.

Совокупность параллельно уложенных стержнеобразных цепей формирует надмолекулярные образования, называемые фибриллами (**Глава 10**). Надмолекулярная структура, организованная фибриллами предопределяет высокую механическую прочность полимерного тела. Действительно, именно вытянутые конформации обеспечивают максимальное количество межмолекулярных контактов и, следовательно, большую прочность сцепления макромолекул. Большая прочность сцепления макромолекул обуславливает высокую прочность высокомолекулярного соединения.

Наконец, целесообразно соотнести конформации цепи в целом и фазовые состояния высокомолекулярных соединений. *Кристаллическое* фазовое состояние

может быть организовано макромолекулами в складчатой, вытянутой или глобулярной конформации; *жидкокристаллическое* — цепями в вытянутой конформации; *аморфное* — цепями в конформациях клубок, глобула, стержень.

В завершение темы следует указать, что *конформация макромолекулы есть сумма всех конформационных уровней*. Характеризуя конформацию, например, изотактического полипропилена, указывают все конформационные уровни его макромолекулы.

Конформационные уровни макромолекулы изотактического полипропилена:

5. конформация мономерного звена — равновесие изомеров T и G \pm ;
6. ближний конформационный порядок — равновесие изомеров T и G \pm ;
7. дальний конформационный порядок — спираль класса 3_1 ($n=3$), в которой реализуется последовательность $\frac{1}{4}$ TG TG TG TG $\frac{3}{4}$;
8. конформация цепи в целом — складчатая.

Литература

1. Стереохимические обозначения и определения, относящиеся к полимерам (Рекомендации 1980 г.) // Высокомолекул. соедин. Сер. А. — 1982. — Т. 24, № 1. — С. 198–219.
2. Марихин, В. А. Надмолекулярная структура полимеров / В. А. Марихин, А. П. Мясникова — Л.: Химия, 1977. — 240 с.
3. Бартнев, Г. М. Курс физики полимеров / Г. М. Бартнев, Ю. В. Зеленев. Под ред. С. Я. Френкеля. — Л.: Химия, 1976. — 288 с.
4. Аскадский, А. А. Лекции по физике полимеров / А. А. Аскадский — М.: Физический факультет МГУ, 2001. — 224 с.
5. Флори, П. Статистическая механика цепных молекул / П. Флори; пер. с англ. — М.: Мир, 1971. — 440 с.
6. Коррадини, П., Гуэрра, Г. Процессы стереоспецифической полимеризации и стереорегулярные полимеры. Представления о механизмах и структуре через 40 лет после открытия // Высокомолекул. соедин. Сер. А. — 1994. — Т. 36, № 10. — С. 1588–1608.
7. Гудман, М., Прендреп, Д., Марк, Г. Стереоспецифическая полимеризация // В кн.: Кристаллические полиолефины. Т. 1. Синтез; пер. с англ. — М.: Химия, 1970. — 360 с.
8. Элиас, Г.-Г. Мегамолекулы / Г.-Г. Элиас; пер. с англ. — Л.: Химия, 1990. — 271 с.
9. Гойхман, А. Ш. Высокомолекулярные соединения включения / А. Ш. Гойхман, В. П. Соломко — Киев.: Науква думка, 1982. — 192 с.
10. Электронная версия газеты «Химия» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://him.1september.ru/articlef.php?ID=200304501> — Дата доступа: 03.06.2009.
11. Бартнев, Г. М. Физика полимеров. / Г. М. Бартнев, С. Я. Френкель — Л.: Химия, 1990. — 432 с.
12. Бириштейн, Т. М. Конформация макромолекулы. // Соросовский журнал — 1996. — № 11. — С. 26–29.