# ИНЖЕНЕРИЯ АВ-СОПОЛИМЕРОВ

**А. Р. ХОХЛОВ**
*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

## ENGINEERING OF AB-COPOLYMERS

A. R. KHOKHLOV

*The notion of model AB-copolymers with a protein-like primary sequence is introduced. The procedure for obtaining such copolymers is described and their properties in comparison with the properties of random AB-copolymers are discussed. The generalization of this notion leads to the concept of engineering the AB-copolymers and to a discussion of the mechanisms of molecular evolution.*

*Вводится представление о модельных АВ-сополимерах с белковоподобной первичной последовательностью. Описываются процедура получения таких сополимеров и их свойства в сравнении со свойствами случайных АВ-сополимеров. Обобщение этого рассмотрения приводит к понятию инженерии АВ-сополимеров и обсуждению механизмов молекулярной эволюции.*

www.issep.rssi.ru

© Хохлов А.Р., 2000

## БЕЛКОВОПОДОБНЫЕ АВ-СОПОЛИМЕРЫ. ПОЛУЧЕНИЕ

Полимерные макромолекулы состоят из молекулярных групп – звеньев, соединенных в длинную цепочку ковалентными химическими связями. Если все звенья одинаковые, то цепочка полностью однородна и называется гомополимером. Если же в цепи присутствуют звенья двух или более сортов, то такой полимер называется сополимером. В статье речь пойдет об АВ-сополимерах, состоящих из звеньев двух сортов: А и В.

Последовательность звеньев вдоль по цепи называется первичной структурой сополимера. В случае АВ-сополимера речь идет о последовательности двух букв, то есть о тексте в двухбуквенном алфавите.

Понятие первичной структуры пришло из молекулярной биофизики. Дело в том, что наиболее важные биополимеры – макромолекулы белков и ДНК – являются сополимерами. Белковые цепи состоят из звеньев 20 различных сортов, а цепи ДНК содержат звенья четырех возможных сортов. Соответственно первичная структура этих биополимеров – это тексты в 20- или 4-буквенном алфавите. По сути в этих текстах содержится вся информация о функционировании этих биополимеров в живых системах (а в первичной структуре макромолекулы ДНК еще и вся наследственная информация, но это уже другая история). В частности, последовательность звеньев в цепях глобулярных белков (их первичная структура) определяет участки формирования так называемых $\alpha$-спиралей и $\beta$-складок (вторичную структуру), а также пространственное расположение звеньев друг относительно друга в глобулярной конформации (третичную структуру).

Возвращаясь к АВ-сополимерам, рассмотрим возможные их типы, которые обычно обсуждаются в научной литературе. Прежде всего это блок-сополимеры с блочной первичной структурой, состоящей из длинных чередующихся последовательностей А- и В-звеньев. Часто рассматриваются случайные сополимеры, первичная структура которых представляет собой случайную АВ-последовательность. В реальных АВ-сополимерах мы часто имеем дело с ситуацией, когда

первичная последовательность не полностью случайна, поскольку при синтезе цепи вероятность присоединения А-звена после А не совпадает с таковой для присоединения А-звена после В. В этом случае получаются АВ-последовательности с короткомасштабными корреляциями вдоль по цепи, задающими определенную степень микроблочности первичной структуры.

Можно ли сопоставлять первичные структуры АВ-сополимеров, когда имеются всего два типа звеньев, с таковыми для глобулярных белков? В первом приближении да, поскольку, несмотря на то что существует 20 возможных типов звеньев для белков, наиболее важное различие между ними состоит в их сродстве к молекулам воды. Водные растворы – это та среда, в которой функционируют глобулярные белки, и некоторые из белковых звеньев являются гидрофильными, а другие – гидрофобными. Другими словами, примерно половина типов звеньев любит контактировать с молекулами воды (эффективная энергия такого контакта отрицательна), тогда как звенья других типов избегают контактов с водой (такому контакту соответствует положительная энергия). Мы можем в очень грубом приближении приписать индекс А первому типу звеньев (то есть гидрофильным звеньям), а индекс В – второму типу (гидрофобным звеньям). Тогда получим некоторую АВ-последовательность, соответствующую первичной структуре глобулярного белка, и сможем сравнивать эту последовательность с первичными структурами обычных синтетических АВ-сополимеров, описанных выше.

Такое сравнение показывает, что белковоподобные АВ-последовательности являются намного более информативными и специфичными. Это обстоятельство поясняется на рис. 1. В глобулярных белках гидрофильные А-звенья (изображены зеленым на рис. 1) покрывают главным образом поверхность глобул, контактируя с водой и придавая макромолекуле устойчивость относительно межмолекулярной агрегации, а гидрофобные В-звенья (выделены красным на рис. 1) формируют плотное ядро глобулы, куда молекулы воды практически не проникают. Очевидно, что требование того, чтобы в плотном глобулярном состоянии АВ-сополимера А-звенья находились на поверхности, а В-звенья – в ядре, является весьма жестким, то есть оно удовлетворяется только для ничтожно малой доли всех возможных первичных последовательностей. Более того, так как А/В-корреляции, введенные таким образом, зависят от конформации глобулы как целого (то есть от третичной структуры), они должны быть охарактеризованы как дальние (в отличие от короткомасштабных корреляций, которые возникают при синтезе обычного АВ-сополимера; см. выше).

АВ-последовательности белковых молекул сформировались в ходе молекулярной эволюции. Интересно поставить следующий вопрос: можно ли создать в лаборатории синтетический АВ-сополимер с крупномасштабными корреляциями первичной структуры, аналогичными белковым? То есть АВ-последовательность должна быть такова, чтобы в наиболее плотной глобулярной конформации все А-звенья были на поверхности, а В-звенья составляли ядро глобулы. Назовем такой АВ-сополимер *белковоподобным*. Такие сополимеры должны обладать интересными свойствами, например не выпадать в осадок при формировании плотной глобулы. Некоторые другие особенности поведения белковоподобных АВ-сополимеров будут рассмотрены ниже.

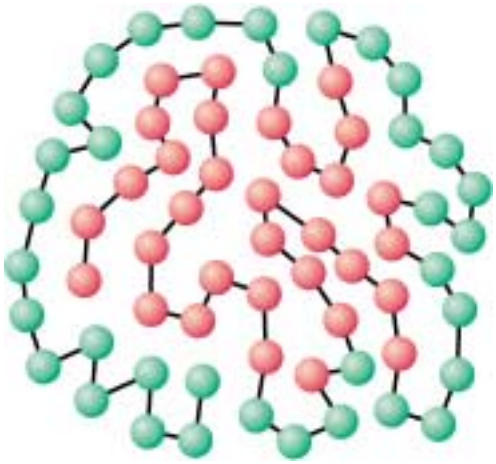

**Рис. 1.** Схематическое представление глобулярного белка. Гидрофобные звенья выделены красным цветом, гидрофильные – зеленым

Проще всего реализовать белковоподобные АВ-последовательности в компьютерном эксперименте. Основные этапы соответствующей процедуры показаны на рис. 2. Отметим, что при попытке синтезировать реальный белковоподобный АВ-сополимер в химической лаборатории придется пройти через те же этапы.

**Этап 1.** Рассматривается обычный гомополимерный клубок, набухающий в хорошем растворителе (рис. 2, *а*).

**Этап 2.** Включается сильное притяжение между всеми мономерными звеньями и формируется гомополимерная глобула (рис. 2, *б*). Конечно, термин “включается” годится только для компьютерного эксперимента, в реальном лабораторном эксперименте под включением притяжения следует понимать скачок температуры, добавление плохого растворителя и т.д.

**Этап 3.** Этот шаг намного легче реализовать в компьютерном эксперименте. Мы просто берем моментальную фотографию глобулы и раскрашиваем звенья,

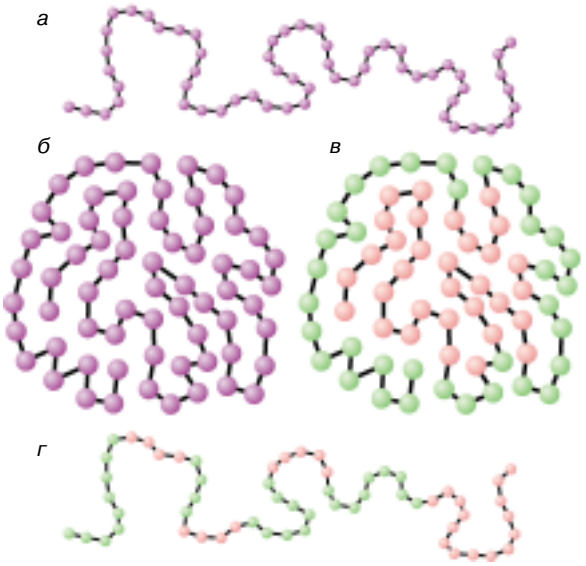


**Рис. 2.** Схема построения первичной последовательности для белковоподобного АВ-сополимера

лежащие на поверхности и в ядре в разные цвета, то есть приписываем индекс А звеньям, которые оказались лежащими на поверхности глобулы, и называем эти звенья гидрофильными (зеленые звенья на рис. 2, *в*), и приписываем индекс В звеньям, попавшим в ядро глобулы, и называем их гидрофобными (красные звенья на рис. 2, *в*). После этого фиксируем получившуюся первичную структуру. В реальном лабораторном эксперименте раскрашивание поверхности может быть выполнено с помощью химического реагента, вступающего в химическую реакцию с мономерными звеньями и преобразующего их из гидрофобных в гидрофильные или заряженные. Если количество этого реагента достаточно мало, то реакцией будут затронуты только лежащие на поверхности мономерные звенья, а ядро останется гидрофобным. Другой важной чертой этого процесса является достаточно большая скорость реакции раскрашивания и достаточно медленная межмолекулярная реакция, которая всегда присутствует при условиях, когда формируются глобулы. Для замедления агрегации могут быть использованы, например, модификаторы вязкости (загустители) (см. мою статью "Восприимчивые гели" в "Соросовском Образовательном Журнале". 1998. № 11. С. 138–142).

**Этап 4** (рис. 2, *г*). Этот последний шаг необходим для компьютерной реализации. Включается однородное сильное притяжение между мономерными звеньями и вводятся потенциалы взаимодействия для А- и В-звеньев. После этого белковоподобный АВ-сополимер готов для исследования в компьютерном эксперименте.

## БЕЛКОВОПОДОБНЫЕ АВ-СОПОЛИМЕРЫ. СВОЙСТВА

Как уже отмечалось, сополимеры с белковоподобными АВ-последовательностями должны обладать комплексом свойств, существенно отличающихся от свойств, например, случайных АВ-сополимеров. Проиллюстрируем это несколькими примерами.

### Переход клубок–глобула

Рассмотрим прежде всего, как происходит переход клубок–глобула в белковоподобных АВ-сополимерах. Вообще переходом клубок–глобула называется в науке о полимерах конформационный переход, происходящий с макромолекулой в разбавленном растворе при постепенном увеличении сил притяжения звеньев. Тогда при некотором критическом значении сил притяжения конформация рыхлого набухшего макромолекулярного клубка становится термодинамически невыгодной, макромолекула конденсируется на себя и образуется плотная глобулярная конформация. Переход клубок–глобула может осуществляться и в сополимерах: например, белки-ферменты функционируют в водной среде живой клетки в глобулярной конформации, а под воздействием некоторых химических агентов они могут денатурировать и переходить к конформации неупорядоченного клубка.

Мы рассмотрим результаты по компьютерному моделированию перехода клубок–глобула в белковоподобном АВ-сополимере, который происходит при увеличении притяжения гидрофобных В-звеньев (в то время как для гидрофильных А-звеньев растворитель остается все время хорошим, то есть между этими звеньями притяжение не вводится). Белковоподобная АВ-последовательность генерировалась путем покраски половины звеньев вблизи центра инерции глобулы в красный цвет, то есть этим звеньям были приписаны гидрофобные свойства, остальные звенья были покрашены в зеленый цвет, то есть считались гидрофильными. Сравнивались результаты по переходу клубок–глобула для АВ-сополимеров с полученными белковоподобными последовательностями и для случайных АВ-сополимеров с той же долей гидрофобных В-звеньев. Компьютерный эксперимент проводился так называемым методом Монте-Карло, который позволяет получать результаты для термодинамически равновесного состояния системы на основе анализа случайной выборки конформаций.

На рис. 3 представлена температурная зависимость средней энергии притяжения гидрофобных В-звеньев в расчете на одно мономерное звено $\langle U/N \rangle$ (рис. 3, *а*) и производной этой величины по температуре $d\langle U/N \rangle/dT$, то есть теплоемкости (рис. 3, *б*), для АВ-сополимеров с

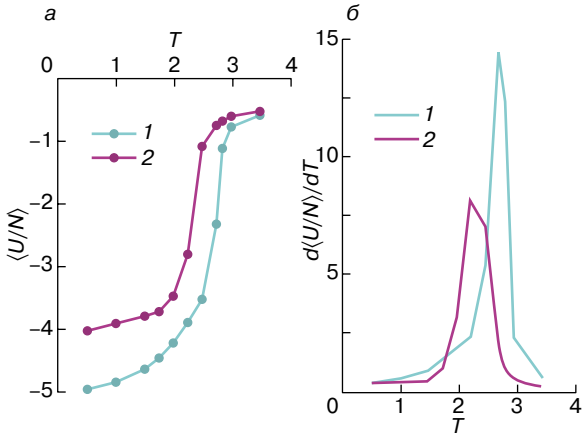


**Рис. 3.** Температурная зависимость средней энергии притяжения B-звеньев в расчете на звено $\langle U/N \rangle$ (*а*) и теплоемкости $d\langle U/N \rangle/dT$ (*б*) для AB-сополимеров из $N = 512$ звеньев с белковоподобной (*1*) и случайной (*2*) первичной структурой. Температура и энергия даны в безразмерных условных единицах

белковоподобной и случайной первичной структурой, состоящих из $N = 512$ мономерных звеньев. Видно, что с уменьшением температуры и для белковоподобной и для случайной цепи наблюдается переход от клубкового к глобулярному состоянию, что проявляется в резком увеличении (по модулю) отрицательной энергии взаимодействия гидрофобных B-звеньев в узком температурном интервале, а также в наличии пика на зависимости теплоемкости от температуры в этом же интервале. В то же время легко отметить, что переход клубок–глобула для белковоподобного сополимера происходит при более высоких температурах, чем для случайного сополимера с тем же A/B-содержанием (то есть для перевода белковоподобного сополимера в глобулярное состояние нужны меньшие силы притяжения B-звеньев). Также можно видеть, что переход для сополимера с белковоподобной AB-последовательностью является более резким. Этот эффект особенно хорошо иллюстрируется рис. 3, *б*: пик теплоемкости для белковоподобного AB-сополимера гораздо более узкий и выраженный.

Различия в поведении случайных и белковоподобных AB-сополимеров проявляются не только в равновесных, но и в кинетических свойствах. Например, изучение кинетики сворачивания глобулярной конформации под воздействием силы притяжения гидрофобных B-звеньев показало, что белковоподобные AB-сополимеры формируют глобулу с плотным ядром из B-звеньев гораздо быстрее, чем случайные сополимеры.

Таким образом, можно сделать общий вывод, что для белковоподобных AB-сополимеров переход клубок–глобула происходит при более высоких температурах, является более кооперативным и имеет более быструю кинетику, чем для случайных сополимеров с тем же A/B-составом, а получающаяся глобула оказывается более стабильной.

В чем причина этих эффектов? Для ответа на этот вопрос рассмотрим морфологию глобулы, то есть типичную ее структуру для белковоподобного и случайного сополимеров. На рис. 4 показаны типичные мгновенные фотографии в глобулярной конформации. Как всегда, гидрофобные звенья выделены красным цветом, а гидрофильные – зеленым. Видно, что для белковоподобного AB-сополимера почти все гидрофобные звенья оказываются сосредоточенными в плотном компактном ядре; гидрофильные звенья в это ядро практически не проникают. Это плотное ядро стабилизируется длинными петлями из гидрофильных звеньев. В то же время ядро глобулы случайного AB-сополимера

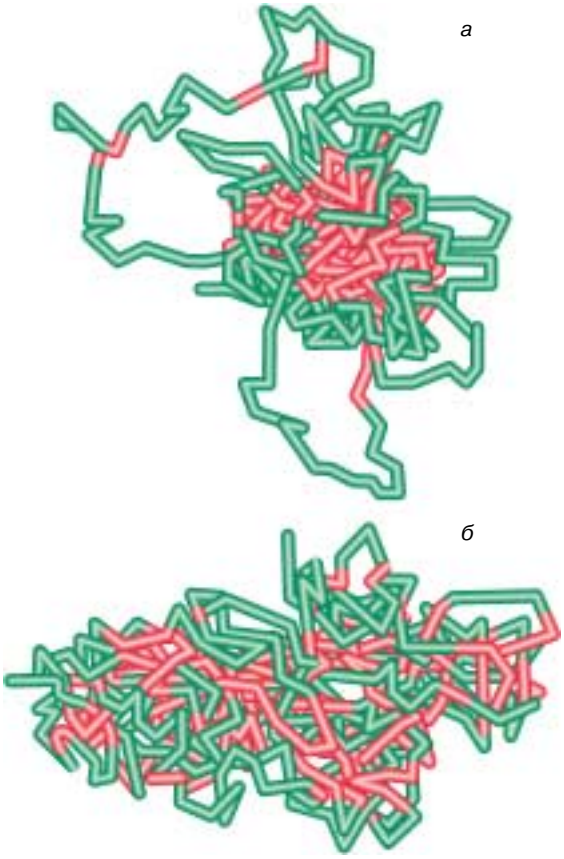


**Рис. 4.** Типичные мгновенные фотографии в глобулярной конформации для AB-сополимеров с белковоподобной (*а*) и случайной (*б*) первичной структурой. Гидрофобные звенья выделены красным цветом, гидрофильные – зеленым

гораздо больше и более рыхлое. Часть гидрофильных звеньев находится внутри ядра, а те из А-звеньев, которые находятся на поверхности, образуют столь короткие А-петли, что они, по-видимому, не смогут предотвратить агрегацию нескольких глобул случайного сополимера. Таким образом, можно ожидать, что глобулы белковоподобного сополимера будут стабильны в растворе (подобно глобулярным белкам), тогда как глобулы случайных сополимеров будут агрегировать и выпадать в осадок.

Достаточно очевидно, что единое плотное ядро, которое получается в глобуле для цепи с белковоподобной АВ-последовательностью, – это то самое ядро, которое существовало на мгновенной фотографии глобулы (рис. 2, *в*) в момент покраски. Будем называть глобулу на рис. 2, *в* материнской. Ясно, что ядро материнской глобулы просто воспроизвелось (или проявилось) на рис. 4, как только мы включили притяжение красных В-звеньев. Другими словами, можно сказать, что белковоподобный АВ-сополимер унаследовал некоторые свойства материнской глобулы, которые в подходящий момент проявились. Память о материнской глобуле была заложена в крупномасштабных корреляциях в первичной структуре, которые были заданы в момент покраски, то есть приготовления белковоподобной АВ-последовательности.

Можно заметить, что при обсуждении результатов у нас стали использоваться такие термины, как материнская глобула, наследование, память, которые больше характерны для работ по молекулярной эволюции, чем по физике полимеров. Мы увидим, что это не случайно: обсуждаемые проблемы, возможно, имеют непосредственное отношение к некоторым этапам молекулярной эволюции.

### Адсорбция на границе масло–вода

Следующий пример, иллюстрирующий различие в поведении белковоподобных и случайных АВ-сополимеров, – адсорбция таких сополимеров на границе масло–вода. Когда ученые говорят о границе масло–вода, термин “масло” не стоит понимать буквально. Имеется в виду межфазная граница воды и несмешивающейся с водой органической жидкости. Когда амфифильный полимер (то есть полимер, содержащий гидрофобные и гидрофильные звенья) попадает на такую границу, он немедленно адсорбируется на ней. Действительно, его нахождение на границе очень выгодно: имеется возможность погрузить гидрофобные звенья в органическую жидкость, а гидрофильные – в воду, за счет чего получить термодинамический выигрыш и в том и в другом случае (гидрофобные звенья обычно обладают сродством к большинству органических жидкостей). Такая ситуация изображена на рис. 5, *а*.

Видно также, что для того, чтобы максимальным образом удовлетворить условию, что все гидрофобные звенья контактируют с органической жидкостью, а все гидрофильные – с водой, макромолекула вынуждена распластываться по поверхности. Если исходная конформация макромолекулы (в объеме воды) была глобулярной, то за счет распластывания по поверхности глобула может денатурировать. Эффект денатурации глобулярных белков на границе масло–вода хорошо известен в науке и важен для практики. Например, очень многие вещества, которые мы употребляем в пищу, представляют собой эмульсии масла в воде, причем стабилизируются эти эмульсии денатурированными глобулярными белками, которые не дают капелькам масла слиться воедино и образовать макроскопическую фазу.

Рассмотрим адсорбцию на границе масло–вода для глобул случайных и белковоподобных АВ-сополимеров (типичные конформации таких глобул приведены на рис. 4). На рис. 5 показаны полученные нами в компьютерном эксперименте распределения концентрации А- и В-звеньев в зависимости от удаленности от границы. Видно, что для случайного АВ-сополимера (рис. 5, *а*) для данных условий сегрегация А- и В-звеньев полная, глобула при этом полностью денатурирует и цепь распластывается по поверхности. Что касается белковоподобного АВ-сополимера (рис. 5, *б*), то для тех же условий, что на рис. 5, *а*, наблюдается существенное проникновение гидрофобных В-звеньев в водную фазу. Это связано с тем, что глобула не полностью денатурирует при адсорбции: сохраняется часть материнского ядра, которая холмиком вдается внутрь водной фазы (рис. 5, *б*).

Таким образом, и в этом примере мы видим замечательную устойчивость ядра белковоподобного АВ-сополимера, то есть фактически исходного унаследованного ядра материнской глобулы: для денатурации этого ядра на границе масло–вода требуются гораздо большие энергетические воздействия, чем для денатурации ядра обычного случайного АВ-сополимера.

### О поведении расплава белковоподобных АВ-сополимеров

Постараемся теперь спрогнозировать, какой будет конформация в концентрированной системе многих цепей белковоподобных АВ-сополимеров при отсутствии растворителя. Если мы находимся выше температуры стеклования для А- и В-компонентов и полимерные цепи могут свободно двигаться друг относительно

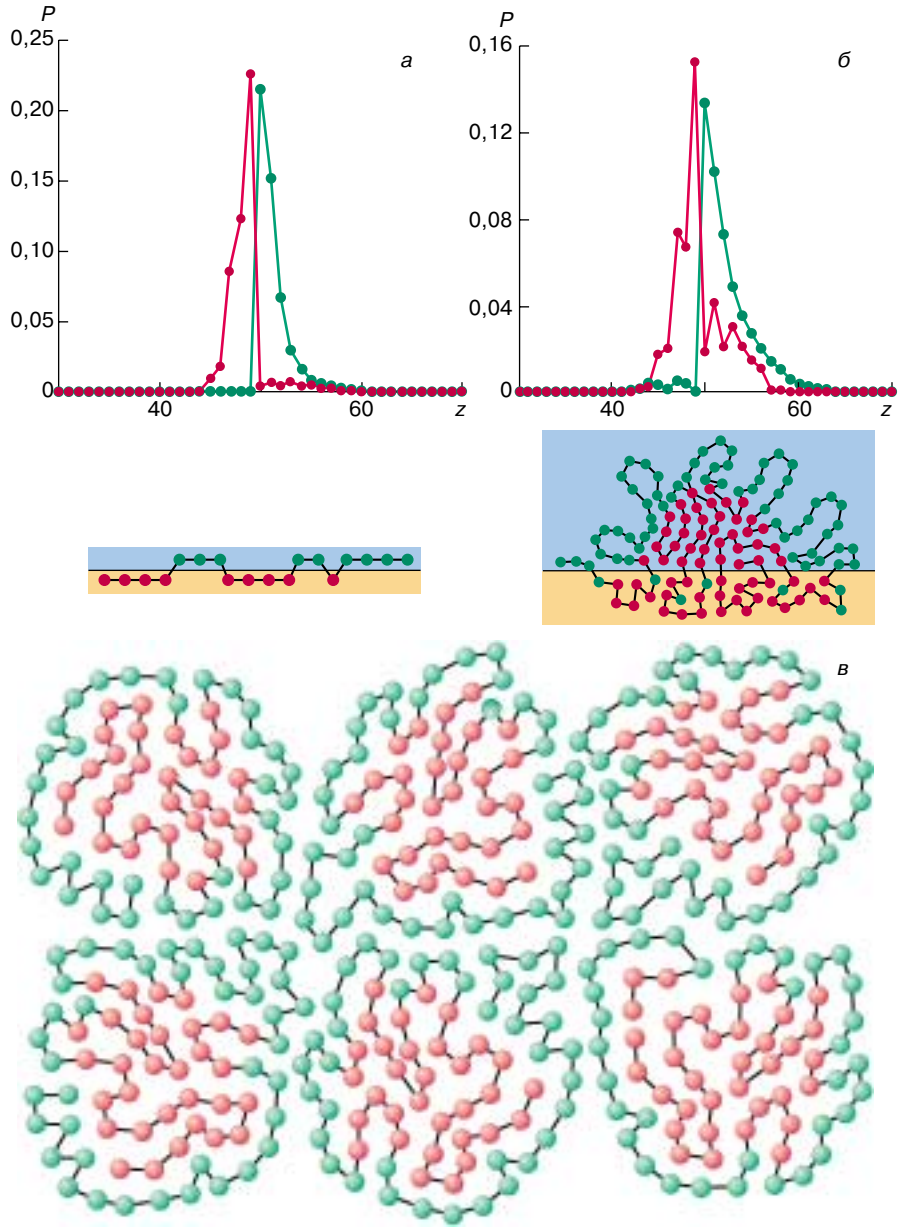


**Рис. 5.** Распределения концентрации А- и В-звеньев, адсорбированных на границе масло–вода, в зависимости от удаленности от границы и схематичное изображение типичной конформации для случайных (*а*) и белковоподобных (*б*) АВ-сополимеров, *в* – возможная микроструктура сегрегированных глобул для расплава белковоподобных АВ-сополимеров

друга, то такая система называется в науке о полимерах расплавом.

Гидрофобные В-звенья и гидрофильные А-звенья обычно не только взаимодействуют по-разному с водой, но и отталкиваются друг от друга. Поэтому в расплаве АВ-сополимеров должно наблюдаться явление, получившее название микрофазного расслоения: красные и зеленые звенья должны объединяться друг с другом, образуя красные и зеленые микроостровки, или агрегаты, при этом мажорный компонент (соответствующий большему содержанию звеньев данного сорта в цепи) обычно образует непрерывную матрицу с вкраплениями минорного компонента. Для случайных АВ-сополимеров это будут случайно расположенные микроостровки.

Что касается АВ-сополимеров с белковоподобной первичной последовательностью, то мы уже имели возможность убедиться в том, что ядро материнской глобулы обладает замечательной способностью проявляться в самых разнообразных ситуациях. Это может быть так и в данном случае. Ситуация, которая при этом может получиться, изображена на рис. 5, *в*. Куски одной и той же цепи, составляющие ядро материнской глобулы, так удачно подогнаны друг под друга (это обеспечивается методом генерирования белковоподобной АВ-последовательности, изложенным в начале статьи), что наиболее термодинамически выгодное микрофазное расслоение соответствует воспроизведению материнских ядер.

Таким образом, мы получаем микроструктуру сегрегированных незацепленных полимерных цепей, поддерживаемую ядрами материнских глобул (рис. 5, *в*). Если такую систему действительно удастся создать, у нее должны быть очень интересные свойства. В частности, в расплаве, изображенном на рис. 5, *в*, цепи оказываются практически полностью незацепленными друг за друга. Кроме того, известно, что высокая вязкость полимерных расплавов связана в основном с наличием зацеплений цепей. Таким образом, расплав, показанный на рис. 5, *в*, должен обладать аномально низкой вязкостью (по сравнению с вязкостью обычных полимерных расплавов для цепей данной длины).

Впрочем, следует подчеркнуть еще раз, что структура типа показанной на рис. 5, *в* пока в реальных лабораторных экспериментах не наблюдалась.

## НЕКОТОРЫЕ ОБОБЩЕНИЯ. ИНЖЕНЕРИЯ АВ-СОПОЛИМЕРОВ

В двух предыдущих разделах мы рассматривали получение и свойства белковоподобных АВ-сополимеров. Первичная структура таких сополимеров генерируется путем специальной раскраски звеньев в материнской глобулярной конформации.

Однако первичную АВ-последовательность со специальными дальними корреляциями можно получить не только на основе глобулярной конформации. По сути дела, любая специфическая конформация полимерной цепи может играть роль материнской. Приведем некоторые примеры такого рода.

1. Предположим, что мы имеем гомополимерную цепь, адсорбированную на поверхности, и что эта поверхность катализирует химическую реакцию с участием адсорбированного звена, в ходе которой модифицированное звено приобретает еще большее сродство к поверхности. Тогда после десорбции получаем АВ-сополимер, настроенный на адсорбцию. Для такого АВ-сополимера критическое значение энергии притяжения красных звеньев к поверхности, приводящее к адсорбции, будет меньше, чем для случайного сополимера с тем же A/B-составом.

2. Аналогичную процедуру раскраски можно осуществить для цепи, адсорбированной не на плоской поверхности, а на сферической коллоидной частице. Тогда в конечном итоге получаем АВ-сополимер, настроенный на адсорбцию капли или частицы определенного размера. Такой сополимер можно назвать молекулярным дозатором. Действительно, при контакте с жидкостью, обладающей сродством к красным звеньям, такой сополимер будет адсорбировать каплю этой жидкости, объем которой соответствует объему материнской коллоидной частицы. Именно для такого объема все красные звенья окажутся в контакте с каплей абсорбированной жидкости и выигрыш в эффективной энергии в расчете на звено будет максимальным. Если же такой молекулярный дозатор приводится в контакт с совокупностью сферических коллоидных частиц разных размеров, он будет выбирать частицы, совпадающие с материнскими.

3. Возможны и другие примеры такого рода. Например, можно рассмотреть цепь, образующую складки в составе кристаллита в частично кристаллическом полимере. Тогда реагент, поступающий через аморфные области, будет реагировать со звеньями на поверхности кристаллита. В результате получится АВ-сополимер, свойства которого зависят от формы и размеров кристаллита.

Во всех этих примерах мы генерируем АВ-последовательности, используя специфическую материнскую конформацию полимерной цепи и раскрашивая специальным образом звенья в этой конформации. Процесс получения таких АВ-последовательностей можно назвать инженерией АВ-сополимеров. Здесь мы используем аналогию с устоявшимся в молекулярной биофизике термином “белковая инженерия”, под которым подразумевается процедура подбора наперед заданной первичной последовательности в белковых молекулах. Здесь мы также генерируем АВ-последовательность с определенными свойствами, но не путем пристраивания звена к звену, как в молекулярной биофизике, а гораздо грубее, используя химические превращения звеньев в специфических для гомополимерной цепи конформациях.

Важно отметить, что во всех приведенных примерах происходит запоминание определенных черт материнской конформации. Эти черты далее проявляются уже в других условиях. Такая взаимосвязь, по-видимому, может служить элементарной моделью одного из механизмов молекулярной эволюции: полимер приобретает первичную структуру в материнских условиях, а затем использует содержащуюся в первичной структуре настроенность на выполнение определенных функ-

ций уже в других условиях. Говоря еще грубее, полимер учится в материнских условиях, а затем использует приобретенные знания во взрослой жизни.

Возможность понимания фундаментальных принципов молекулярной эволюции на ее ранних этапах делает чрезвычайно актуальными дальнейшие исследования инженерии АВ-сополимеров.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Гросберг А.Ю.*, *Хохлов А.Р.* Физика в мире полимеров. М.: Наука, 1989. 206 с.

2. *Grosberg A.Yu.*, *Khokhlov A.R.* Giant Molecules: Here and There and Everywhere ... N.Y.: Acad. Press, 1997. 244 c.

3. *Кабанов В.А.* // Успехи химии и физики полимеров. М.: Химия, 1973. С. 283–296.

4. *Гросберг А.Ю.* // Успехи физ. наук, 1997. Т. 167, № 2. С. 129–166.

5. *Шульц Г.*, *Ширмер П.* Принципы структурной организации белков. М.: Мир, 1982.

*Рецензенты статьи* В.П. Шибаев, А.А. Берлин

* * *

Алексей Ремович Хохлов, профессор, доктор физико-математических наук, зав. кафедрой физики полимеров и кристаллов физического факультета МГУ, зав. лабораторией физической химии полимеров Института элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН, действительный член Российской Академии наук. Область научных интересов – физика полимеров, статистическая физика макромолекул, физическая химия ионсодержащих полимеров, полимерных жидких кристаллов, полимерных гелей, ассоциирующих полимеров, компьютерное моделирование полимерных систем. Автор более 300 научных работ, в том числе шести книг.