Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет
им. акад. И. П. Павлова

Кафедра общей и биоорганической химии

Растворы высокомолекулярных соединений (ВМС)

Высокомолекулярные соединения (ВМС)

— соединения, которые содержат более 1000 атомов, соединённых ковалентными связями.

Большинство ВМС имеют цепное строение

1) их макромолекулы содержат большое количество многократно повторяющихся участков — элементарных (мономерных) звеньев, соединённых в длинные цепи;

2) в настоящее время все ВМС называют полимерами, хотя изначально термин «полимеры» применяли только к продуктам полимеризации мономеров;

3) макромолекулы могут быть гибкими или образовывать компактные структуры.

Физико-химические характеристики ВМС

Агрегатное состояние ВМС

твёрдое

жидкое (аморфное)

Температура кипения ВМС выше температуры их разложения!

~~Газообразное состояние~~

стеклообразное

атомы, входящих в состав цепи, совершают колебательные движения около положения равновесия

высокоэластичное

колебательные движения звеньев, вследствие чего цепь может изгибаться

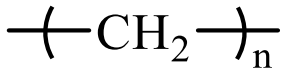
вязкотекучее

подвижность всей молекулы.

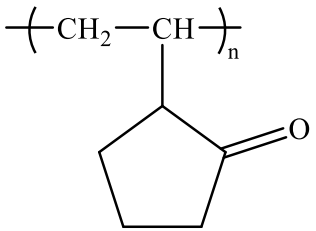
Классификация ВМС

1. По химическому составу

а) органические

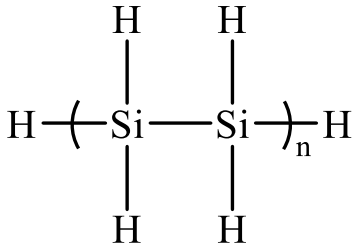


полиэтилен



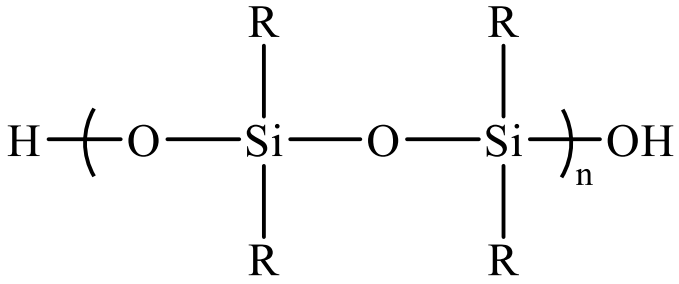
поливинилпирролидон

б) неорганические



полисилан

в) элементорганические



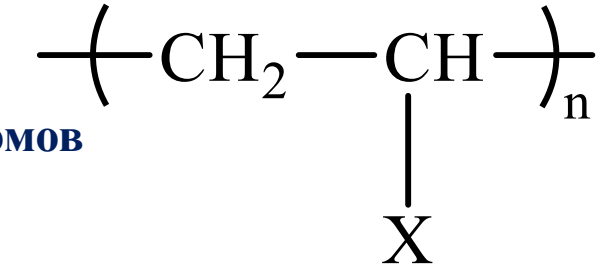
полисилоксан

Классификация ВМС

2. По природе атомов основной цепи

а) **гомоцепные**

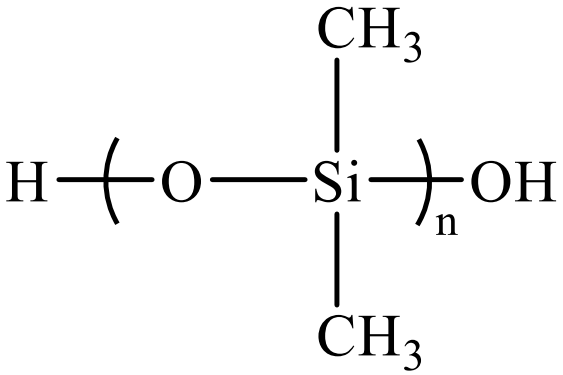
X — атом/группа атомов



б) **гетероцепные**

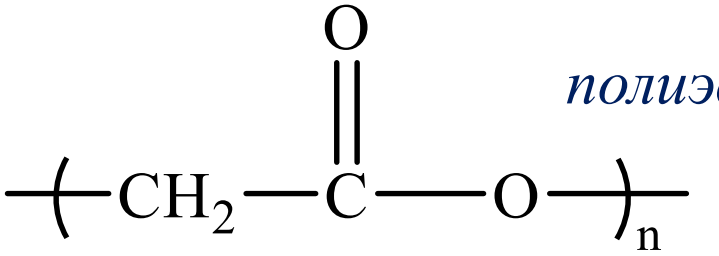
(основная цепь состоит из разных атомов)

Биополимеры, а также синтетические полимеры



полидиметилсилоксан

полиэфиры

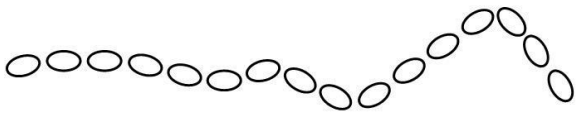


полиэтиленгликоль

Классификация ВМС

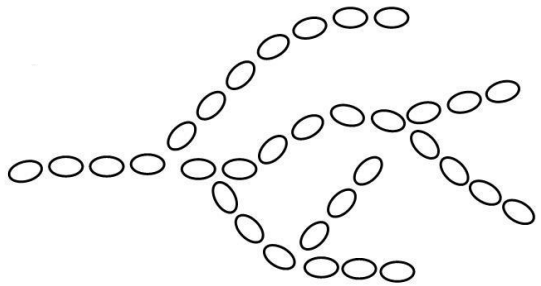
3. По строению

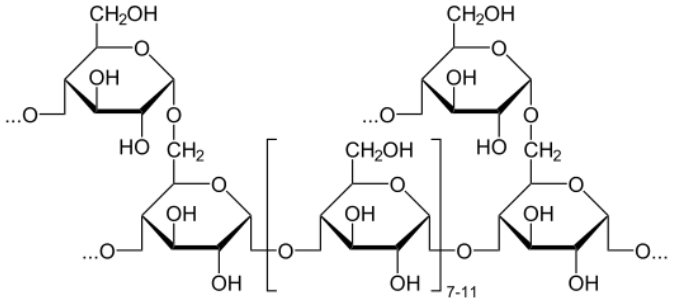
а) линейные



Амилоза

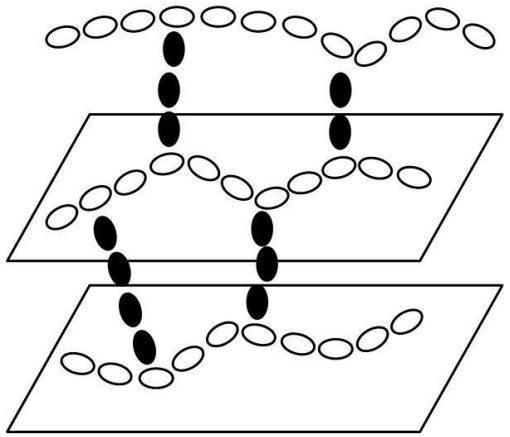
б) разветвлённые

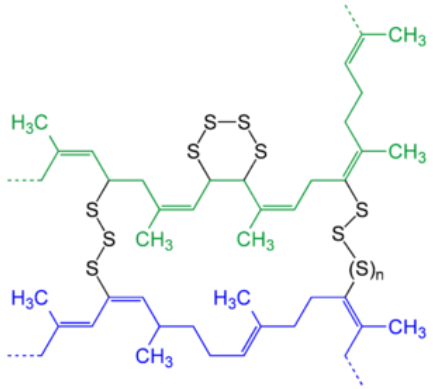




Гликоген

в) сшитые



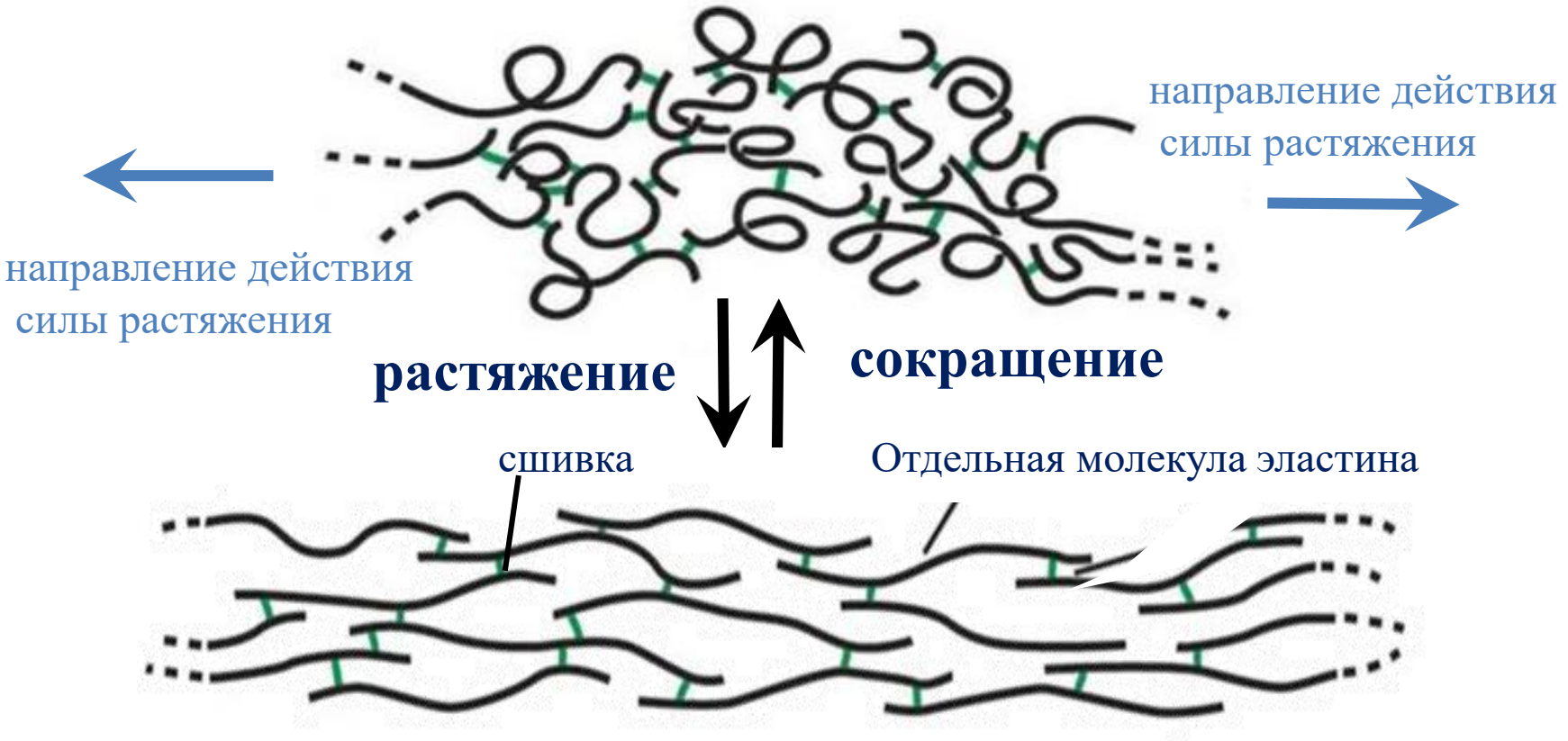


Резина

Сшивки могут располагаться в плоскости или в пространстве
(трёхмерносшитый полимер)

Некоторые сшитые полимеры теряют эластичность
и становятся жёсткими.

Потеря эластичности коллагена и эластина отрицательно сказывается на кровоснабжении, потому что эти белки входят в состав кровеносных сосудов. Артерии и артериолы становятся толще, труднее растягиваются, внутри сосудов образуются трещины и они хуже реагируют на импульсы нервной системы.



Классификация ВМС

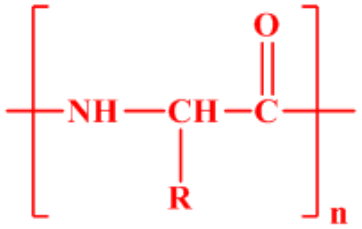
4. По происхождению

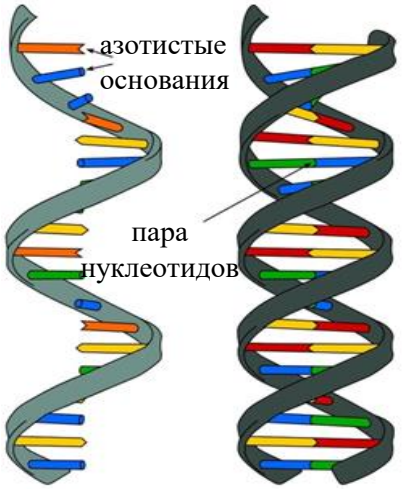
а) **природные** (природный каучук и различные биополимеры)

Биополимеры — это природные полимеры, вырабатываемые клетками живых организмов и участвующие в их жизнедеятельности

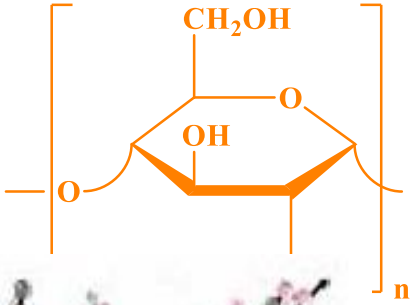
информационные
(полипептиды, белки, РНК, ДНК)

неинформационные
(полисахариды)





РНК **ДНК**



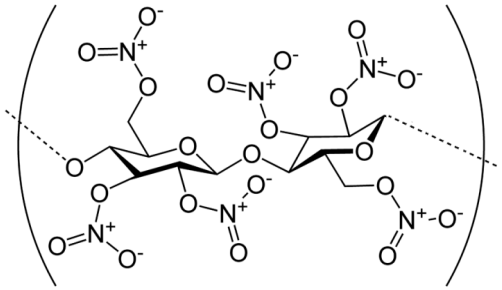
Гиалуроновая кислота

Классификация ВМС

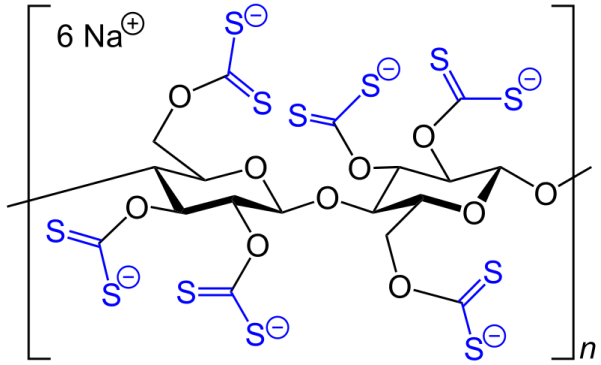
5. По происхождению

б) искусственные

(химически модифицированные природные полимеры)

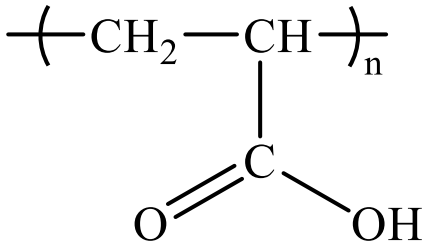


Нитроцеллюлоза

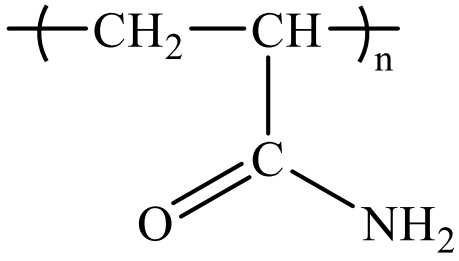


Вискоза

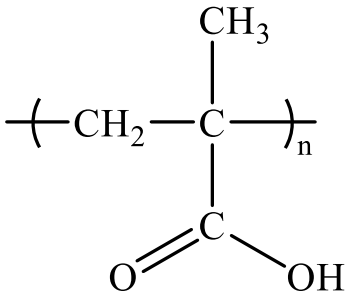
в) синтетические



Полиакриловая кислота



Полиакриламид



Полиметакриловая кислота

Классификация ВМС

6. По отношению к нагреванию

а) термопластичные (термопласты)

В мягком состоянии термопластичному полимеру (например, полиэтилену) можно придать нужную форму, которая при охлаждении сохранится

твёрдый полимер $\underset{\text{охлаждение}}{\overset{\text{нагревание}}{\rightleftarrows}}$ ***мягкий полимер***

б) термореактивные (реактопласты)

При нагревании они необратимо отверждаются за счёт образования поперечных сшивок и никогда больше не размягчаются.

реактопласт $\xrightarrow{\text{нагревание}}$ ***необратимое отверждение***

Классификация ВМС

7. По растворимости в воде

а) ***водорастворимые***

содержат полярные (гидрофильные) группы

б) ***водонерастворимые***

содержат неполярные (гидрофобные) группы

Сшитые полимеры не растворяются ни в воде, ни в других растворителях, они могут только набухать

Классификация ВМС

8. По воздействию на организм

- биоинертные
- биоактивные
- биосовместимые
- биозамещаемые
- гемосовместимые
- тромборезистентные (атромбогенные)
- биодеградируемые

Специфические свойства, обусловленные цепным строением макромолекул ВМС

- волокно- и плёнкообразующие свойства;
- эластичность (обратимость деформации при малых нагрузках);
- отличие в процессе растворения и свойствах растворов.

Многие свойства растворов ВМС зависят от молекулярной массы макромолекул

Понятие *молекулярных* ***масс*** *ВМС и низкомолекулярных соединений (НМС)* ***различаются.***

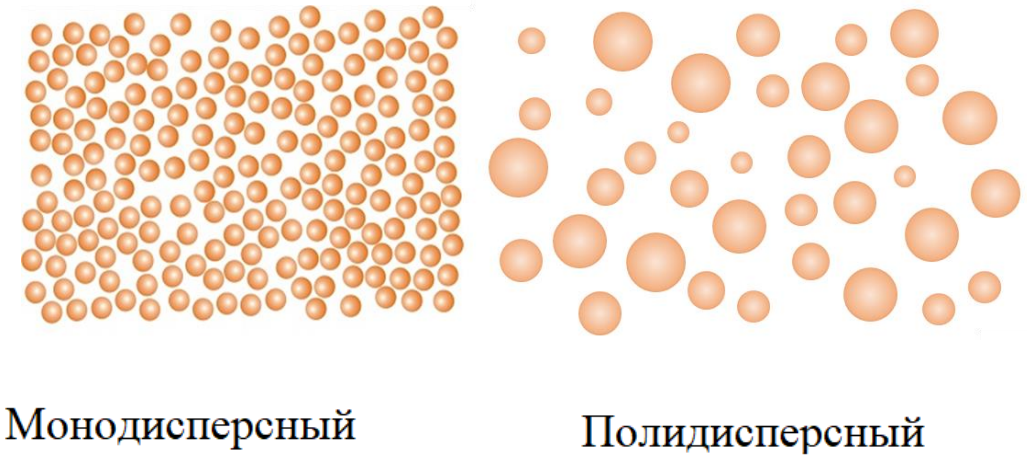
Для ВМС (особенно, продуктов полимеризации) не выполняется закон постоянства состава, так как они, как правило, состоят из макромолекул с различной молекулярной массой и представляют собой смеси полимергомологов* и поэтому являются полидисперсными.

*__Полимергомологами__ называют ряд полимерных веществ одинакового строения, отличающиеся только по молекулярным массам.

Полидисперсность полимеров

Неоднородность по размерам и структуре характеризуют понятием «*полидисперсность по молекулярной массе*» (или «макромолекулярная полидисперсность»).

Полидисперсность по молекулярной массе — соотношение количеств макромолекул различной молекулярной массы в образце.



Молекулярные массы синтетических полимеров представляют собой **среднестатистические** величины в отличие от НМС и зависят от метода определения.

Молекулярная масса ВМС

Различают

» среднечисловую $(\overline{M}_n)$

$$\overline{M}_n = \frac{\sum M_i \cdot n_i}{\sum n_i} = \frac{M_{зв.} \sum i \cdot n_i}{\sum n_i}$$

» среднемассовую (средневесовую) $(\overline{M}_\omega)$

$$\overline{M}_\omega = \frac{\sum M_i \cdot m_i}{\sum m_i} = \sum M_i \cdot \omega_i = \frac{\sum M_i^2 \cdot n_i}{\sum M_i \cdot n_i}$$

» средневязкостную $(\overline{M}_V)$ из данных по вязкости

молекулярные массы ВМС

$$K_M = \frac{\overline{M}_\omega}{\overline{M}_n} \geq 1$$

так как $\overline{M}_\omega > \overline{M}_n$

Коэффициент полидисперсности ***(K_M)*** характеризует молекулярно-массовое распределение молекул, то есть степень однородности молекул:

Для монодисперсных (биологических) полимеров K_M=1.
При узком распределении K_M = 1,01–1,05.
В промышленности чаще всего получают полимеры с K_M = 3–10.

Средневязкостная $(\overline{M}_V)$ молекулярная масса

Её определяют **вискозиметрическим** методом и рассчитывают по уравнению ***Марка — Куна — Хаувинка***

$$[\eta] = K \cdot \left(\overline{M}_V\right)^{\alpha}$$

характеристическая вязкость

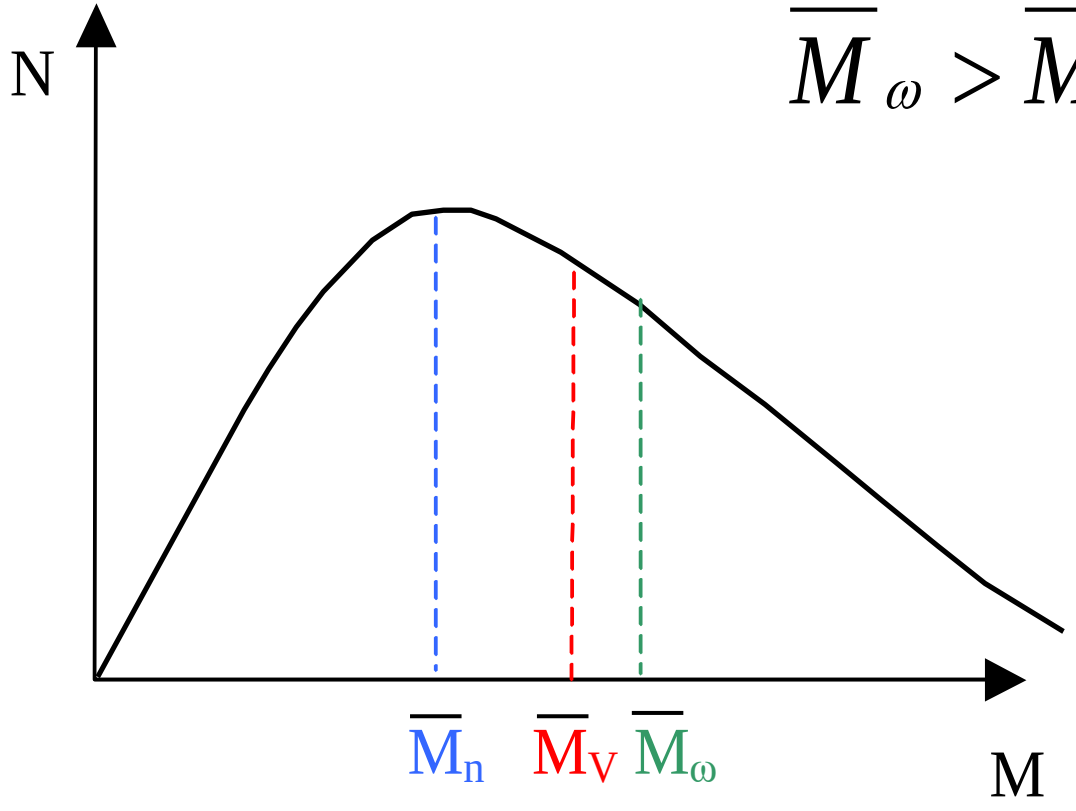
K и **α** — константы, которые **зависят** от природы конкретной системы **полимер-растворитель и температуры**

Для хороших растворителей типично значение $\alpha = 0{,}8$
Для гибких полимеров $0{,}5 \leq \alpha \leq 0{,}8$
Для абсолютно жёстких полимеров $\alpha = 2{,}0$

K и **α** определяются из градуировочного графика в координатах $[\eta] = f(M_V)$, построенного по данным для полимеров с известной молярной массой.

Средневязкостная молекулярная масса полимера ближе к его среднемассовой, чем к среднечисловой молекулярной массе, так как вязкость зависит, в том числе, и от размеров частиц.

$$\overline{M}_{\omega} > \overline{M}_{V} > \overline{M}_{n}$$



Сравнение растворов НМС и ВМС

Признак сравнения	Коллоидные растворы (растворенное вещество образует мицеллы)		Истинные растворы (растворённое вещество диспергировано до молекул и ионов)	
	НМВ	ВМС	НМВ	ВМС
Размеры частиц	**от 10^{-9} до 10^{-7} м**	больше 10^{-7} м	от 10^{-11} до 10^{-10} м	**от 10^{-9} до 10^{-7} м**
	Сопоставимы		**Могут отличаться в 1000 раз**	
Сродство к растворителю	Лиофобны	Лиофильны		
В водных растворах гидратная оболочка в изоэлектрической точке	Отсутствует	Сохраняется		
Оптические свойства	Четкий конус Тиндаля	Размытый конус Тиндаля	Оптически пусты	Размытый конус Тиндаля

Истинные растворы ВМС имеют двойственные свойства.

С одной стороны

это гомогенные термодинамически устойчивые обратимые системы, которые образуются самопроизвольно, и где растворённое вещество хорошо взаимодействует с растворителем;

С другой стороны

по размеру молекул они соответствуют золям, что делает их похожими на гидрофобные коллоидные растворы: частицы медленно диффундируют, не проникают через диализные мембраны, под влиянием внешних факторов способны осаждаться из растворов, рассеивать свет и т.д.

Влияние ВМС на устойчивость коллоидных растворов низкомолекулярных веществ

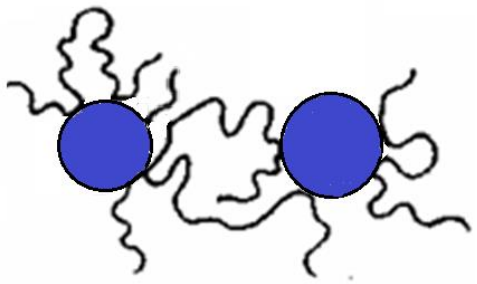
Коллоидная защита.

Условия успешной коллоидной защиты:

1. Использование ВМС дифильного строения (например, некоторых белков: желатины, альбуминов, казеина)
2. Концентрация должна быть достаточна для создания мономолекулярного защитного слоя из макромолекул.

(При **не**достаточной концентрации ВМС в их присутствии устойчивость коллоидных растворов уменьшается: в результате агрегации частиц, что приводит к флокуляции).

Флокуляция (от лат. flocculi – клочья, хлопья), вид коагуляции, образование рыхлых хлопьевидных агрегатов (флокул) из мелких частиц дисперсной фазы.



Взаимодействуя одновеменно с несколькими частицами сразу, макромолекула полимера обеспечивает укрупнение и коагуляцию частиц.

Подобно растворам НМС растворы ВМС делятся на растворы электролитов и неэлектролитов

Неэлектролиты:

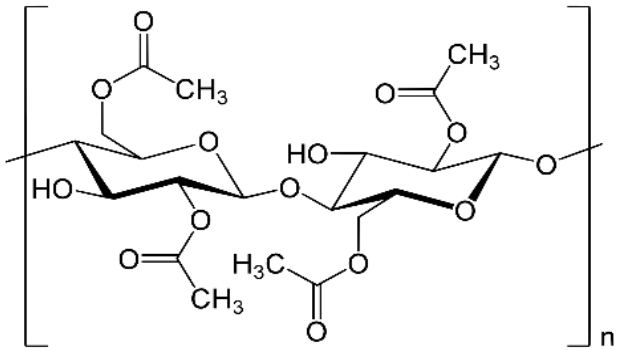
$$-\!\left(CH_2-CH=CH-CH_2\right)\!-_n$$

бутадиеновый каучук

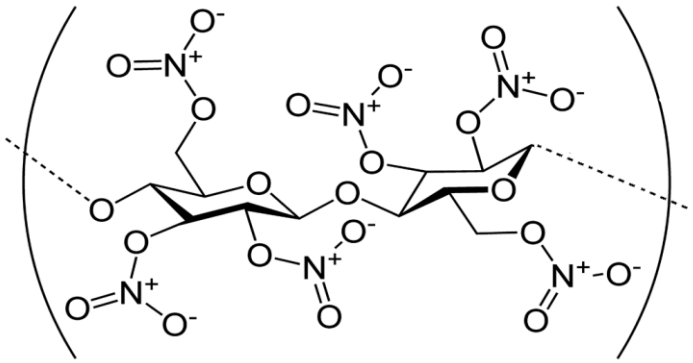
Электролиты:

ВМС, содержащие ионогенные группы:

- *карбоксильную группу* –COOH,
- *сульфогруппу* –SO_3H
- *аминогруппу* –NH_2 и другие.



ацетилцеллюлоза



нитроцеллюлоза

Важнейшие растворы высокомолекулярных электролитов — водные растворы белков.

Белки являются полиамфолитами (то есть проявляют амфотерные свойства) за счет наличия в их молекулах *ионогенных групп*, способных к диссоциации.

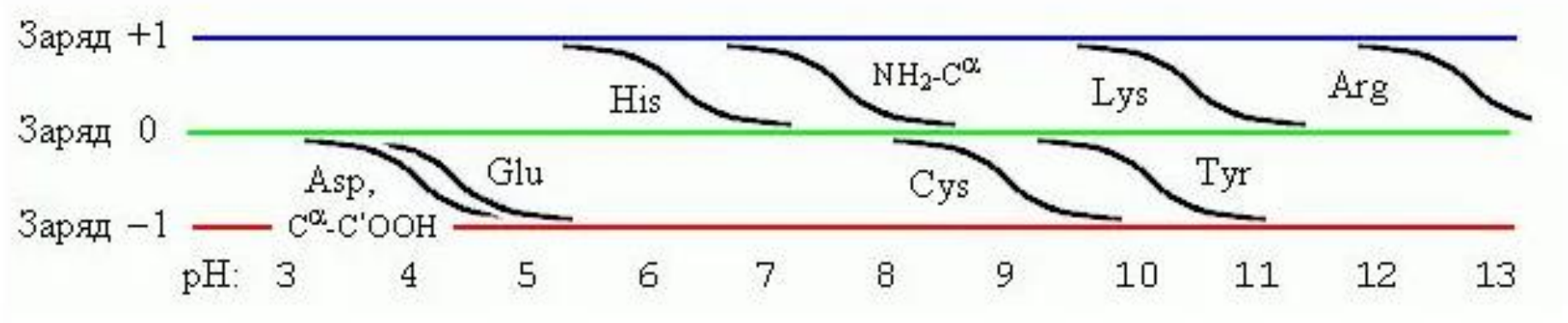
Ионогенные группы:

- осно́вная ($-NH_2$,$-COO^-$ и др.)
- кислотная ($-COOH$, $-NH_3^+$ и др.).

Молекула белка имеет электрический заряд, обусловленный диссоциацией ионогенных групп, например:

$$(H_3N^+)_x\text{-(белок)-}(COOH)_y \rightleftarrows (H_3N^+)_x\text{-(белок)-}(COO^-)_y \rightleftarrows (H_2N)_x\text{-(белок)-}(COO^-)_y$$

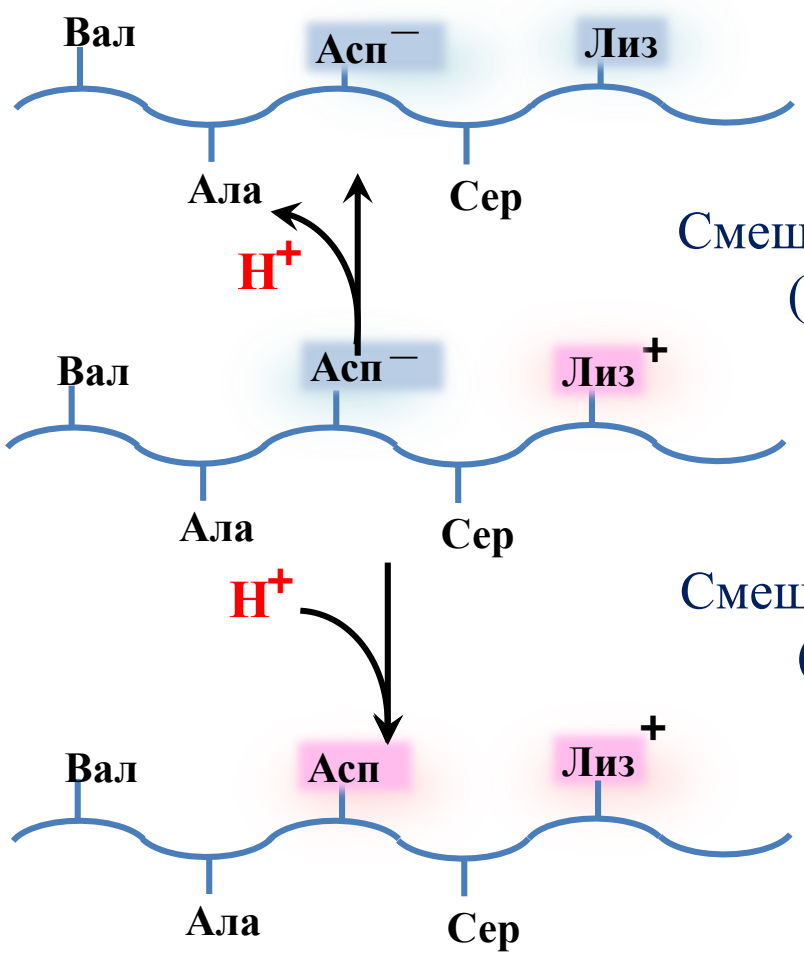
Заряженность боковых ионогенных групп, а также N- и C- концов
(которые на схеме обозначены знаками NH_2-C^α и C^α-C'OOH, соответственно)
природных белков при различных pH:



Задание: показать изменение заряда фрагмента пептида, состоящего из остатков Вал-Ала-Асп-Сер-Лиз при различных значениях pH среды.

Ответ: *Валин, аланин и серин* — нейтральные аминокислоты, *аспарагиновая кислота* — кислая аминокислота, *лизин* — осно́вная.

При изменении pH среды, заряд фрагмента пептида, будет меняться следующим образом:



pH 9

q<0

Смещение pH в *щелочную область*
(недостаток катионов H^+)

pH 6–7

q=0

Смещение pH в *кислую область*
(избыток катионов H^+)

pH 3

q>0

Изоэлектрическая точка (ИЭТ) белка – это такое значение pH, при котором в белковой молекуле находится *равное количество разноименных зарядов* и её ***общий заряд равен нулю***, обозначается **p*I***.

Характеристики изоэлектрического состояния белков:

- Степень гидратации макромолекулы **минимальна**

Пептидных групп много, но являясь незаряженными, они гидратируются слабо, поэтому в изоэлектрическом состоянии гидратная оболочка сохраняется, но тонкая.

- Устойчивость водных растворов пептидов и белков **минимальна**

Отклонение от значений p*I*:

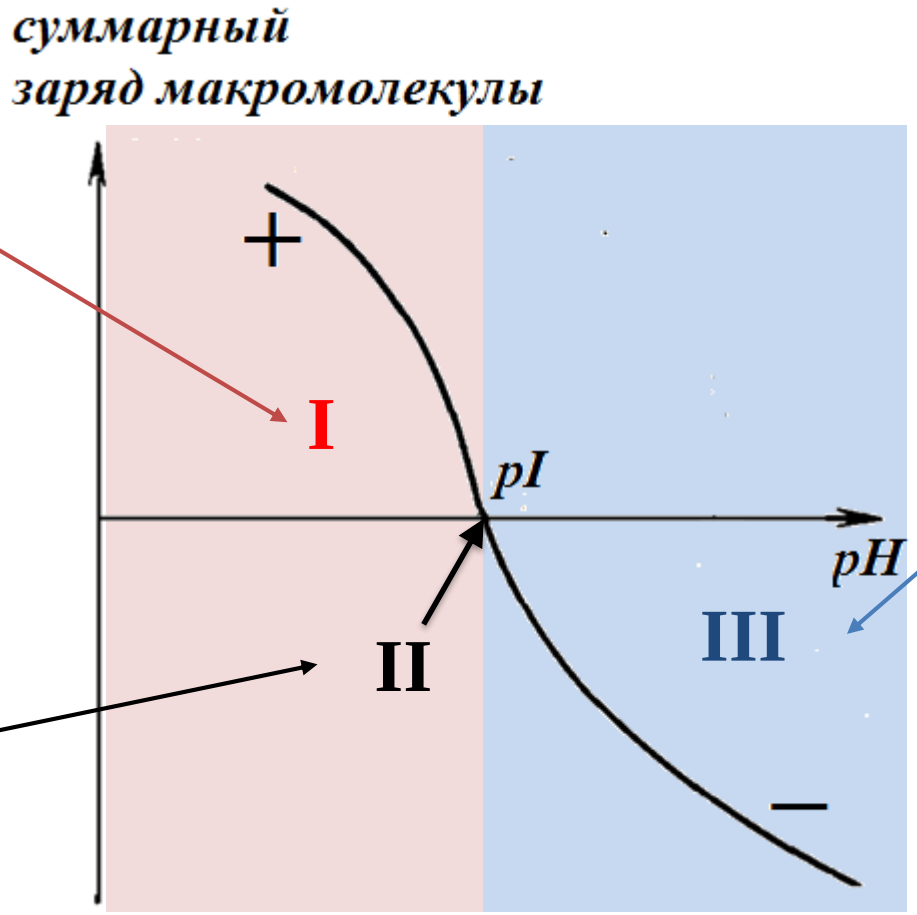
- При **небольшом отклонении pH белков от p*I*** степень гидратации и толщина гидратной оболочки увеличивается, поэтому увеличивается и устойчивость растворов ВМС
- При **значительном отклонении pH белков от p*I*** происходит денатурация белков

Ионизация амфотерной молекулы белка в зависимости от pH

Три области pH раствора белка, определяющие его свойства:

I. pH < p*I*
избыток протонов, белок максимально протонирован и заряжен положительно

II. pH = p*I*
количество ионизированных групп минимально, суммарный заряд белка равен нулю



III. pH > p*I*
недостаток протонов, все кислотные группы депротонированы, белок заряжен отрицательно

Состояние и поведение макромолекул белков при разных значениях pH

Признак сравнения	Кислотность среды		
	pH<p*I* близкое к p*I*	**pH=p*I***	**pH>p*I* близкое к p*I***
Степень гидратации	Увеличиваются при отклонении pH от p*I*	минимум	Увеличиваются при отклонении pH от p*I*
Растворимость в воде			
Степень набухания в воде			
Скорость высаливания	Уменьшаются при отклонении pH от p*I*	максимум	Уменьшаются при отклонении pH от p*I*
Скорость гелеобразования (желатинирования)			
Суммарный заряд макромолекулы	**Положительный** Увеличивается при отклонении pH от p*I*	равен нулю	**Отрицательный** Увеличивается при отклонении pH от p*I*
Адсорбция на ионитах	Адсорбируется на **катионитах**	Не адсорбируется на ионитах	Адсорбируется на **анионитах**
Направление движения макромолекулы при электрофорезе	Движется к **катоду**	Электрофорети-чески неподвижна	Движется к **аноду**

Устойчивость и степень гидратации водных растворов биополимеров

Устойчивость водных растворов биополимеров определяется:

- ***гидратацией макромолекул***, которые содержат большое количество гидрофильных групп
- ***зарядом макромолекул***

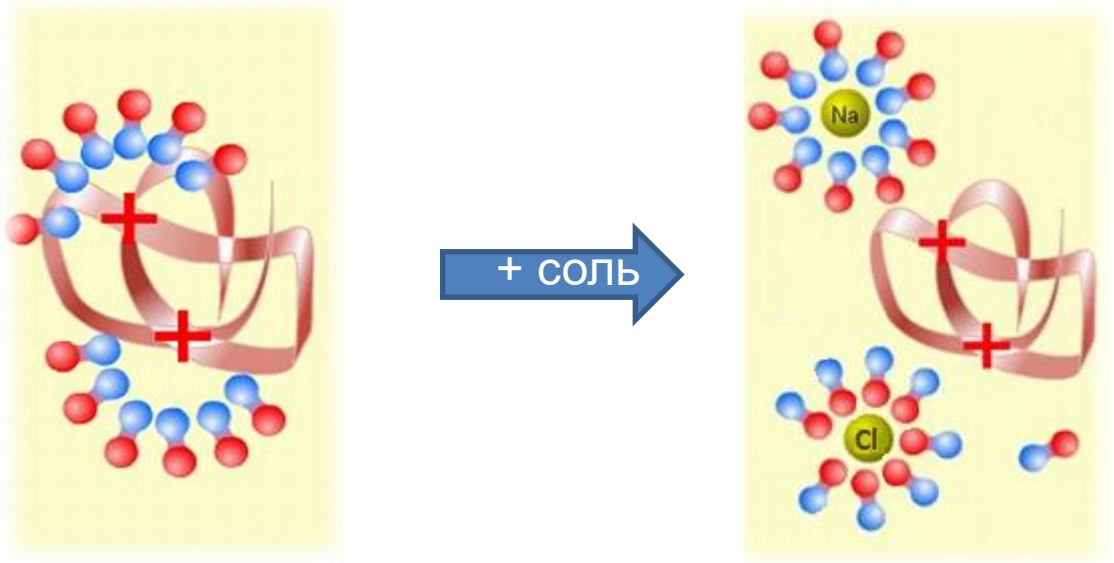
Степень гидратации макромолекул полиэлектролитов зависит от:

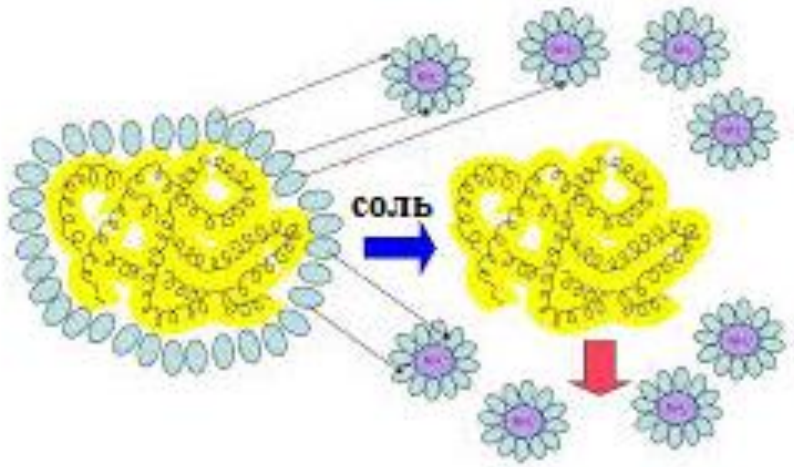
- от **количества гидрофильных групп** в составе макромолекулы
- от **полярности** этих групп

Высаливание

Высаливание — осаждение макромолекул ВМС из водных растворов под действием ***высоких концентраций солей*** в результате дегидратации и разрушения гидратных оболочек.

Высаливающее действие ионов определяется их способностью связывать воду.





Сравнение высаливания и коагуляции

Признак сравнения	*Коагуляция*	*Высаливание*
Количество добавленного электролита	малое	значительное* *(часто с образованием концентрированного раствора электролита)*
Подчинение правилу Шульце-Гарди	подчиняется	не подчиняется
Обратимость процесса	необратим	обратим

** на 3–5 порядков больше обычных порогов коагуляции*

В основе механизма высаливания ВМС лежит процесс дегидратации

Высаливающим действием обладают не только соли, но также все вещества, способные взаимодействовать с растворителем и, тем самым, понижать растворимость ВМС.

Например, ацетон и спирт хорошо высаливают желатину из ее водных растворов так как они легко связываются с водой и, тем самым дегидратируют частицы желатины.

Ряды Гофмейстера

Лиотропные ряды катионов

$Li^+, Na^+, K^+, Rb^+, Cs^+$

$Mg^{2+}, Ca^{2+}, Sr^{2+}, Ba^{2+}$

Увеличение степени гидратации катиона

Лиотропные ряды анионов

В нейтральной среде выделяют 2 группы анионов:

F^-, SO_4^{2-}, цитрат$^{3-}$,тартрат$^{2-}$,CH_3COO^-, Cl^- ,NO_3^-, Br^-, I^-,CNS^-

Увеличение степени гидратации аниона

Увеличение способности к адсорбции

В нейтральной среде выделяют две группы анионов:

1 группа

анионы, стоящие ***левее хлорид-иона***

-хорошо гидратируются

-плохо адсорбируются

-вызывают высаливание белков из нейтральных растворов, лишая белки их гидратной оболочки.

2 группа

анионы, стоящие ***правее хлорид-иона***

-плохо гидратируются

-хорошо адсорбируются

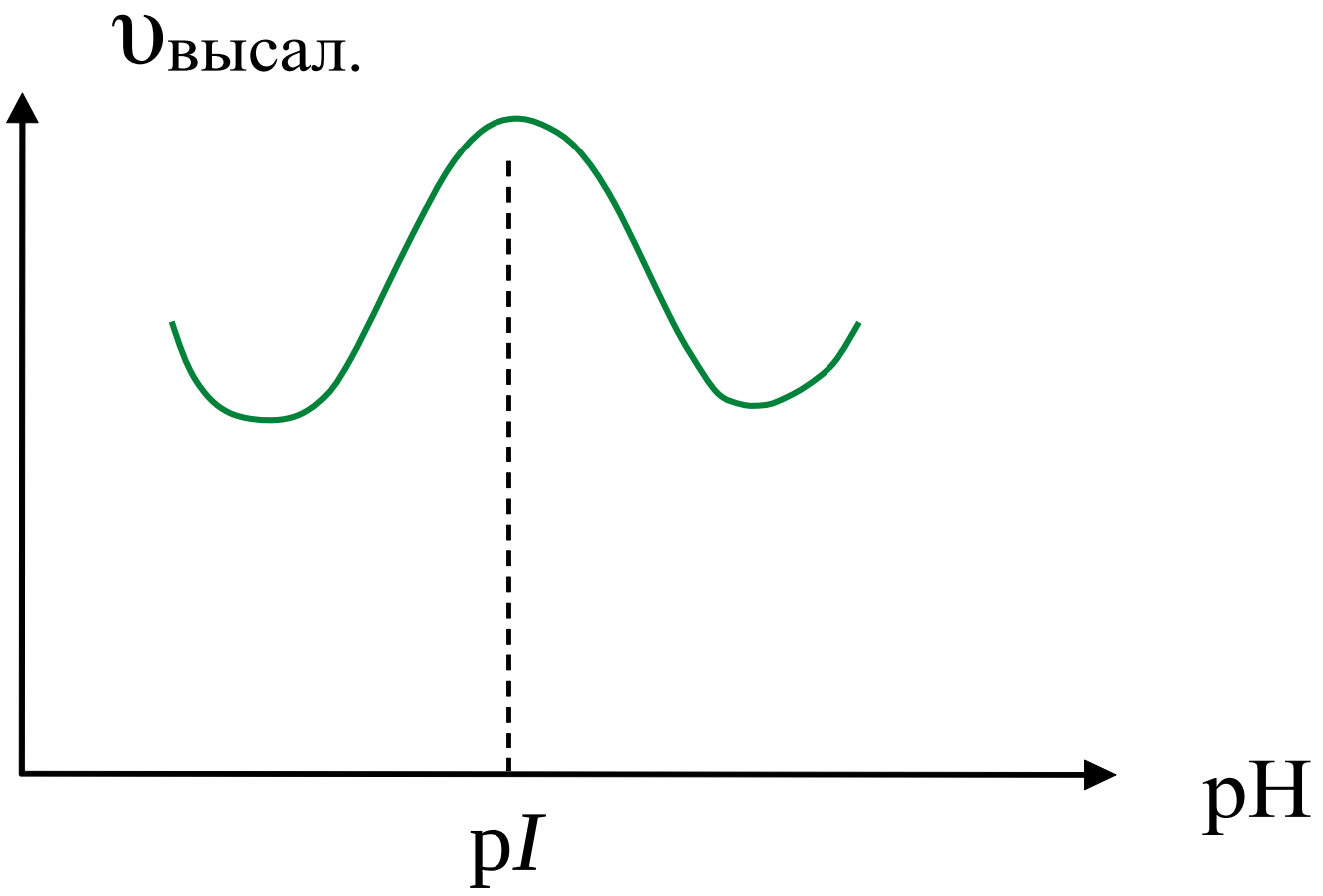
-увеличивают устойчивость растворов белка, они закрепляются на поверхности белка вместе со своей тонкой гидратной оболочкой, увеличивая заряд белка и собственную гидратную оболочку белка

В сильнокислой и сильнощелочной средах

ЛЮБЫЕ анионы уменьшают термодинамическую устойчивость водных растворов ВМС

и вызывают высаливание

Влияние pH на скорость высаливания растворов белков
и других ВМС, характеризующихся изоэлектрическим состоянием
связано с изменением толщины гидратной оболочки этих ВМС зависящей от степени ионизации
соответствующих групп



Влияние кислотности среды на свойства полиамфолитов: степень гидратации, степень набухания и растворимость в воде.

Признак сравнения	**Кислотность среды**		
	pH<p*I* близкое к p*I*	**pH=p*I***	**pH>p*I* близкое к p*I***
Сродство к воде (степень гидратации)	Увеличиваются при отклонении pH от p*I*	Минимальны	Увеличиваются при отклонении pH от p*I*
Растворимость в воде			
Степень набухания*) в воде			
Скорость высаливания*)	Уменьшается при отклонении pH от p*I*	Максимальна	Уменьшается при отклонении pH от p*I*
Скорость гелеобразования (желатинирования)*)			
Суммарный заряд макромолекулы	**Положительный** Увеличивается при отклонении pH от p*I*	Равен нулю	**Отрицательный** Увеличивается при отклонении pH от p*I*
Направление движения макромолекулы при электрофорезе	Движется к катоду	Электрофоретически неподвижна	Движется к аноду

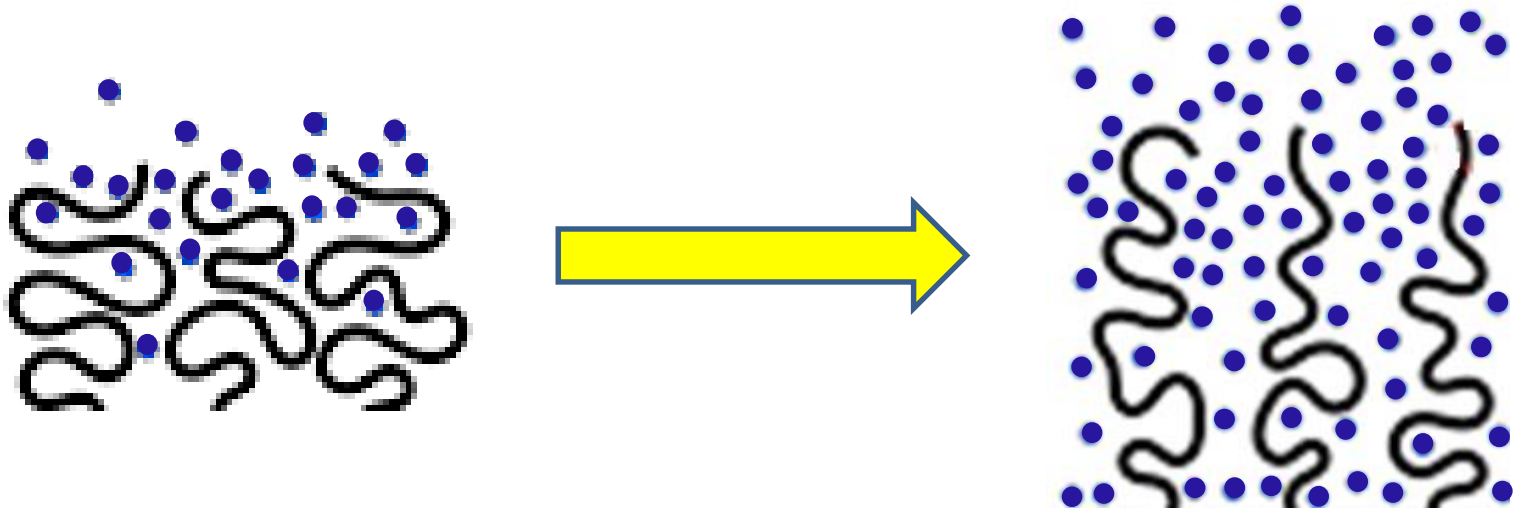
Особенности образования растворов ВМС

Растворение полимера протекает самопроизвольно, если имеется сродство между компонентами раствора.

Растворению образца ВМС часто предшествует процесс **набухания.**

Набухание – это самопроизвольный процесс увеличения массы и объёма образца ВМС в результате поглощения низкомолекулярного растворителя из окружающей среды, которое сопровождается взаимодействием молекул растворителя с макромолекулами ВМС.

Причина набухания: различие в размерах и подвижности макромолекул ВМС и молекул низкомолекулярного растворителя



Термодинамика процесса набухания

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S < 0,\ \Delta H < 0,\ \Delta S \approx 0$$

Начало набухания: *(специфическое взаимодействие ВМС и растворителя с образованием новых межмолекулярных связей — сольватация)*

Заключительная стадия:

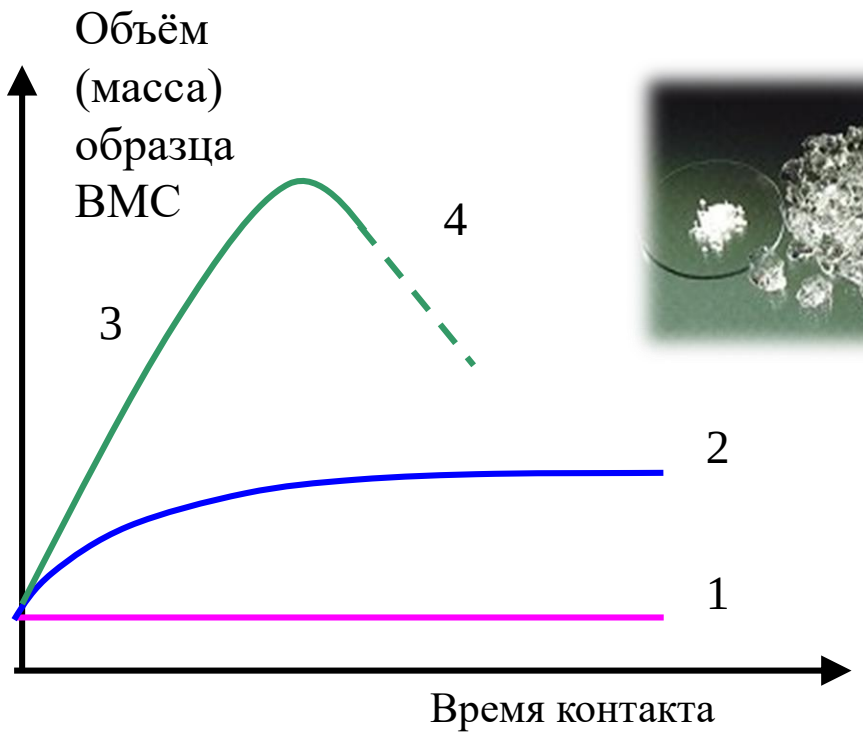
(процесс сольватации закончился)

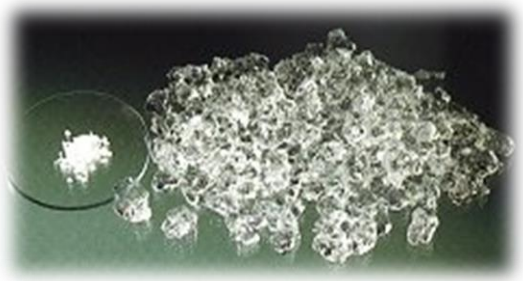
$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S < 0,\ \Delta H \approx 0,\ \Delta S > 0$$

Более упорядоченная система → Менее упорядоченная система

Причина: частичное высвобождение макромолекул (ограниченное набухание) или переход их в раствор.

Зависимость массы (объёма) образца ВМС от времени контакта с растворителем





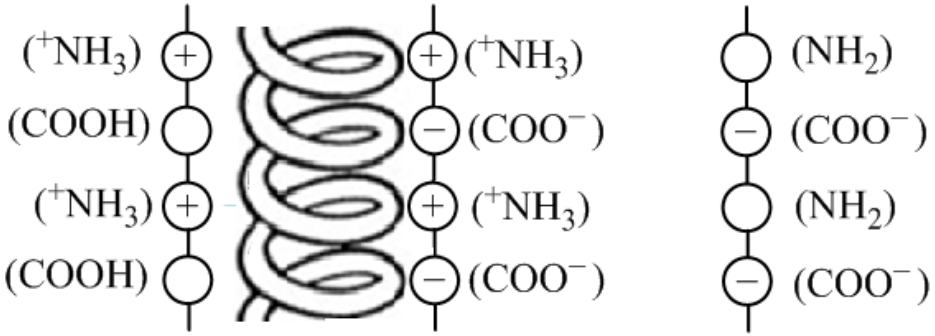
1. **отсутствие набухания и растворения;**
2. **ограниченное набухание образца ВМС, не содержащего низкомолекулярных фракций;**
3. **неограниченное набухание;**
4. **растворение.**

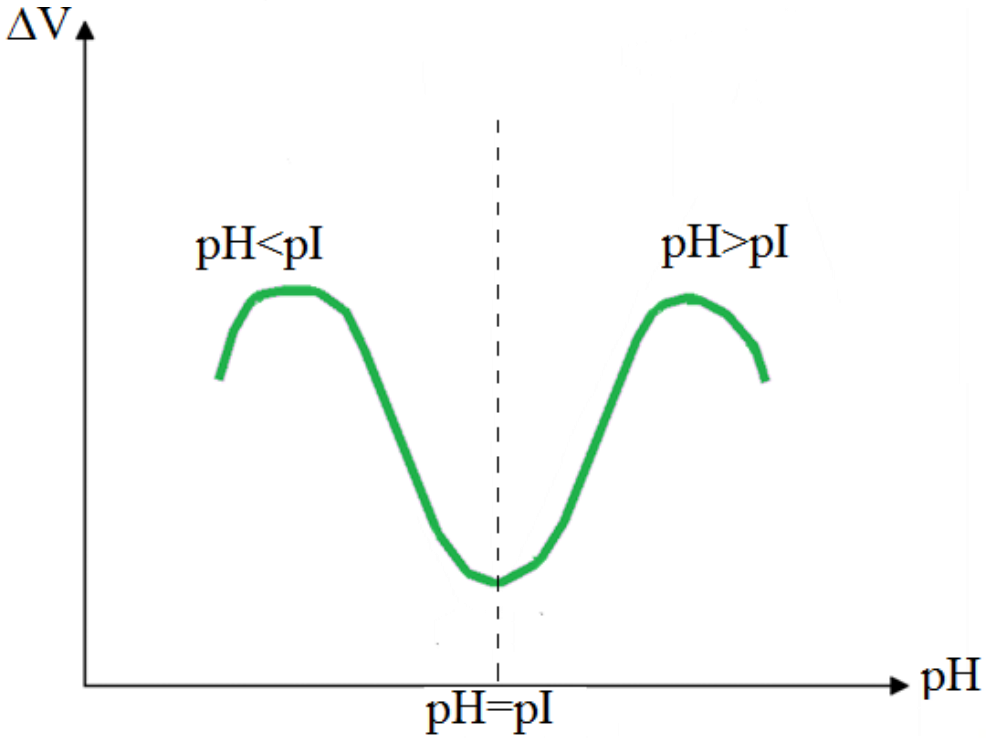
Тип набухания зависит от:

— природы образца ВМС и растворителя (работает «принцип подобия»),
— от условий, например, от температуры

Сшитые полимеры набухают ограниченно, причём степень набухания зависит от степени сшивки.

Влияние pH среды на набухание белков





Степень набухания (α) может быть рассчитана

по **изменению объёма** образца ВМС: $$\alpha_V = \frac{V - V_o}{V_o},$$	где V и V_o - объемы набухшего и исходного полимеров.
по **изменению массы** образца ВМС: $$\alpha_m = \frac{m - m_o}{m_o},$$	где m и m_o - массы набухшего и исходного полимеров.

Набухание происходит при

- Регенерации тканей
- Образовании отёков
- Воспалении
- Проникновении кислых жидкостей в ткани
- Ожоге крапивой
- Укусах насекомых

Это происходит вследствие изменения кислотности тканей.

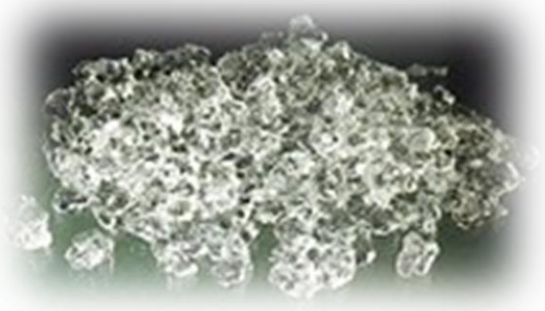
Желатинирование

Желатинирование (гелеобразование, застудневание) – процесс превращения раствора ВМС в гель в результате образования внутренних структур (застывшей сетки полимера) за счёт взаимодействия макромолекул.

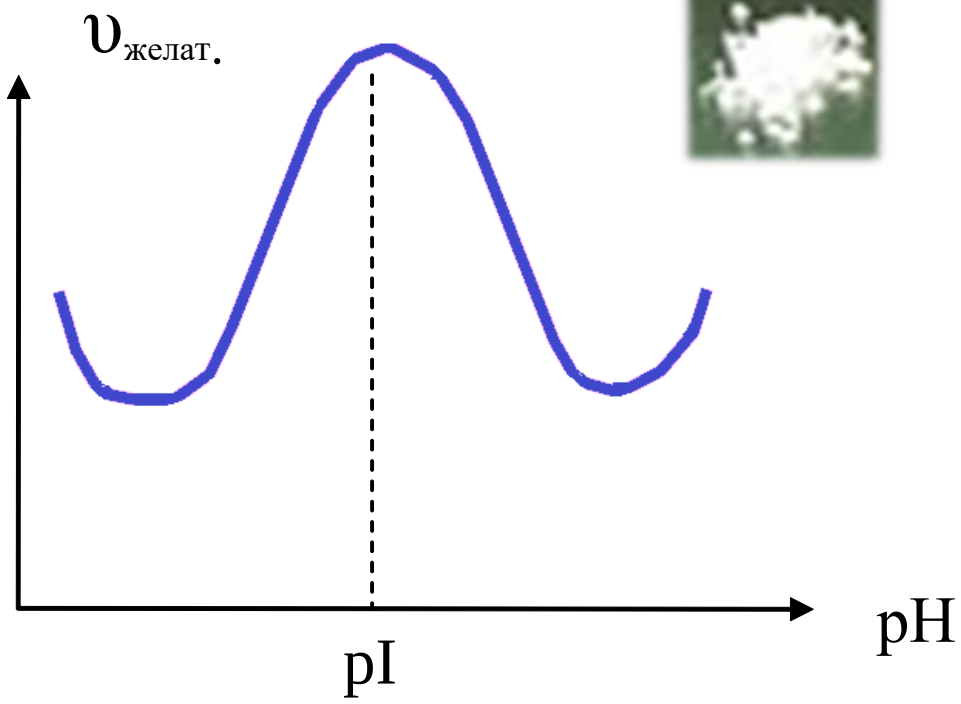
Образование эластичных гелей

возможно в результате протекания двух взаимно противоположных процессов:

Раствор ВМС —желатинирование→ гель ←ограниченное набухание— ксерогель



Влияние кислотности среды на скорость желатинирования →



Свойства гелей

1. Гели, содержащие электролиты, обладают хорошей **электропроводностью**

2. Наблюдается **периодичность** протекания химических реакций в концентрированных гелях

3. Тиксотро́пия — способность некоторых гелей ОБРАТИМО разжижаться при механическом воздействии и самопроизвольно восстанавливать свои свойства в состоянии покоя.

4. Синерезис (это изменение свойств (старение) гелей и студней с течением времени, связанное с потерей ими текучести и сопровождающееся сжатием образца и «выпрессовыванием» растворителя из структуры геля.

5. Эффект памяти формы (для концентрированных гелей).

Влияние электролитов на скорость набухания и желатинирования

$$Li^+, Na^+, K^+, Rb^+, Cs^+$$

F^-, SO_4^{2-}, CH_3COO^-, Cl^- ,NO_3^-, Br^-, I^-,CNS^-

Увеличение степени гидратации иона

υ набухания ↓ υ желатинирования ↑

Анионы, способные адсорбироваться на поверхности макромолекул (I^-, CNS^-), замедляют процесс желатинирования и способствуют стабилизации растворов ВМС.

Влияние температуры
на процессы набухания, желатинирования и высаливания

- связано с усилением теплового движения макромолекул и молекул растворителя при увеличении температуры.
- Таким образом, при ↑t° ↑υнаб. , но ↓υвысал. и ↓υжелат.

Границы температурного диапазона существования растворов ВМС:

Нижняя граница :
температура замерзания растворителя

Верхняя граница:
температура разрушения ВМС (для белков – температура денатурации)

Вопрос:

При какой температуре будет происходить более интенсивное набухание образца ВМС: 5 °С, 25 °С, 50 °С? А белка?

Вопрос:

При каком значении pH среды (3,0; 4,6; 6,2) будет происходить более интенсивное набухание белка казеина молока (p*I* 4,6)?

Вопрос:

В каком случае будет быстрее идти набухание белка в нейтральной среде:

а) в чистой воде или в растворе, содержащем сульфат натрия?

б) в чистой воде или растворе, содержащем иодид натрия?

Вопрос: ацетат какого металла (натрия, калия или лития) обладает бóльшим высаливающим действием на водный раствор белка?

Вопрос: При каком значении pH среды (2,5; 5,4 или 7,4) будет происходить более интенсивное высаливание фибриногена крови (p*I* 5,4) из раствора?

Вопрос: В присутствии какой соли натрия (хлорида, сульфата или ацетата) будет происходить более интенсивное желатинирование раствора ВМС в нейтральной среде?

Вопрос: При каком значении pH среды (3,2; 5,5; 6,9) будет происходить более интенсивное желатинирование раствора миозина мышц (p*I* 5,5)?

Вопрос: При каком значении pH среды

(pH > p*I*, pH = p*I*, pH < p*I*)

происходит более сильный синерезис полиамфолита?

Вязкость растворов ВМС

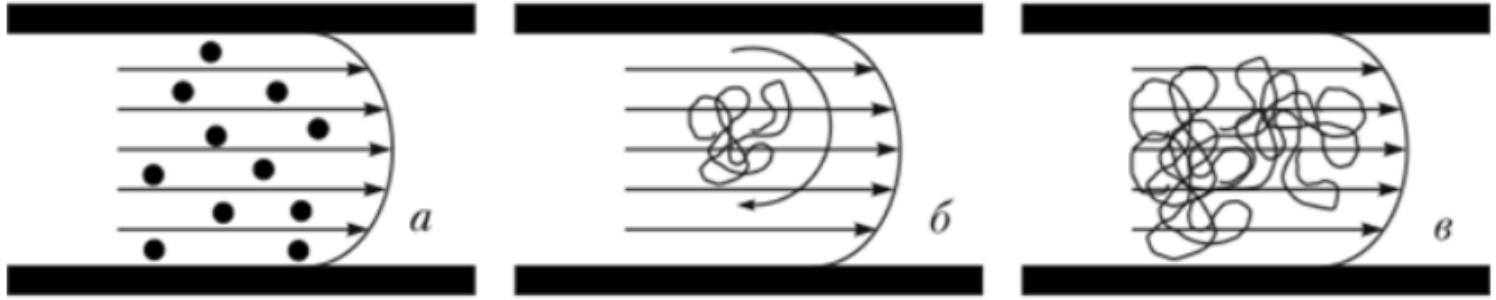
Вязкость — свойство жидкости, обусловленное силами внутреннего трения при её течении, зависящего от интенсивности сцепления между молекулами.

Количественной характеристикой вязкости является ***коэффициент вязкости*** (η), часто называемый просто вязкостью раствора.

Вязкость растворов ВМС

Вязкость растворов ВМС аномально высока - на 10-12 порядков выше вязкости низкомолекулярных жидкостей (даже разбавленные растворы являются вязкотекучими жидкостями.)

Это связано с большими размерами макромолекул и их повышенной гибкостью. Макромолекулы, находясь сразу в нескольких слоях движущейся жидкости, как бы сшивают их, кроме того, постоянное изменение конформаций макромолекулы, так же производит тормозящий эффект.



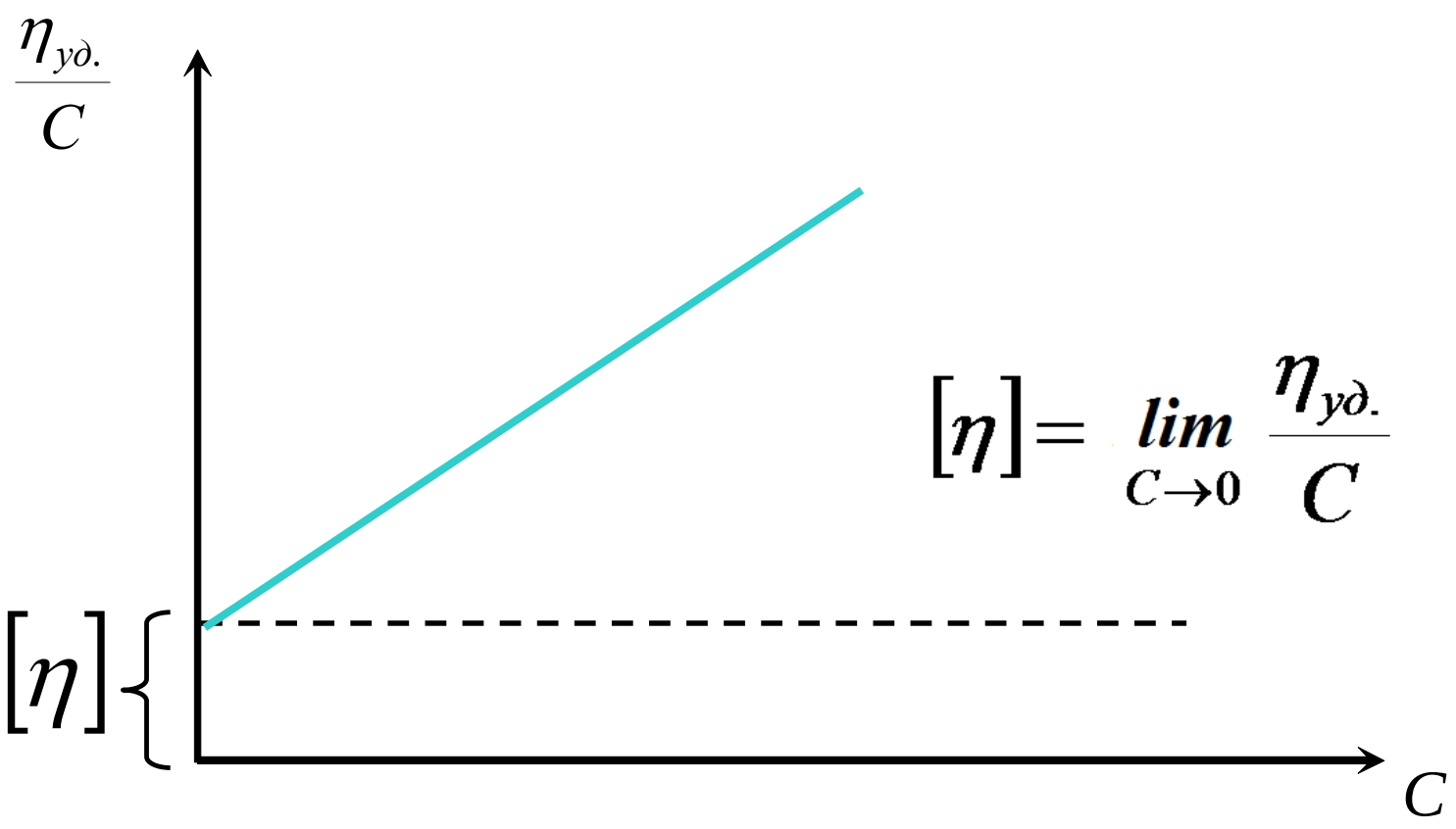
а – раствор низкомолекулярного вещества

б – разбавленный раствор ВМС

в – концентрированный раствор ВМС

Приведенная вязкость ($\eta_{уд}/C$) раствора ВМС при бесконечном разбавлении (при $C \to 0$) равна характеристической вязкости

Характеристическая вязкость полимера связана только с *вращательным движением* молекулы в потоке, а также *упруго-вязкими деформациями*, которые могут происходить с макромолекулами полимера.



Осмотическое давление растворов ВМС

В отличие от НМС осмотическое давление ВМС обычно очень мало вследствие большóй молекулярной массы макромолекул.
Однако, при концентрациях ВМС 10 – 12 %, осмотическое давление становится значительным.
Причём при равных концентрациях π(р-ра ВМС)>π(р-ра ВМС).

Это в значительной мере связано с гибкостью макромолекул, которые ведут себя, как несколько коротких молекул, так как достаточно свободно перемещаются и меняют свои конформации.

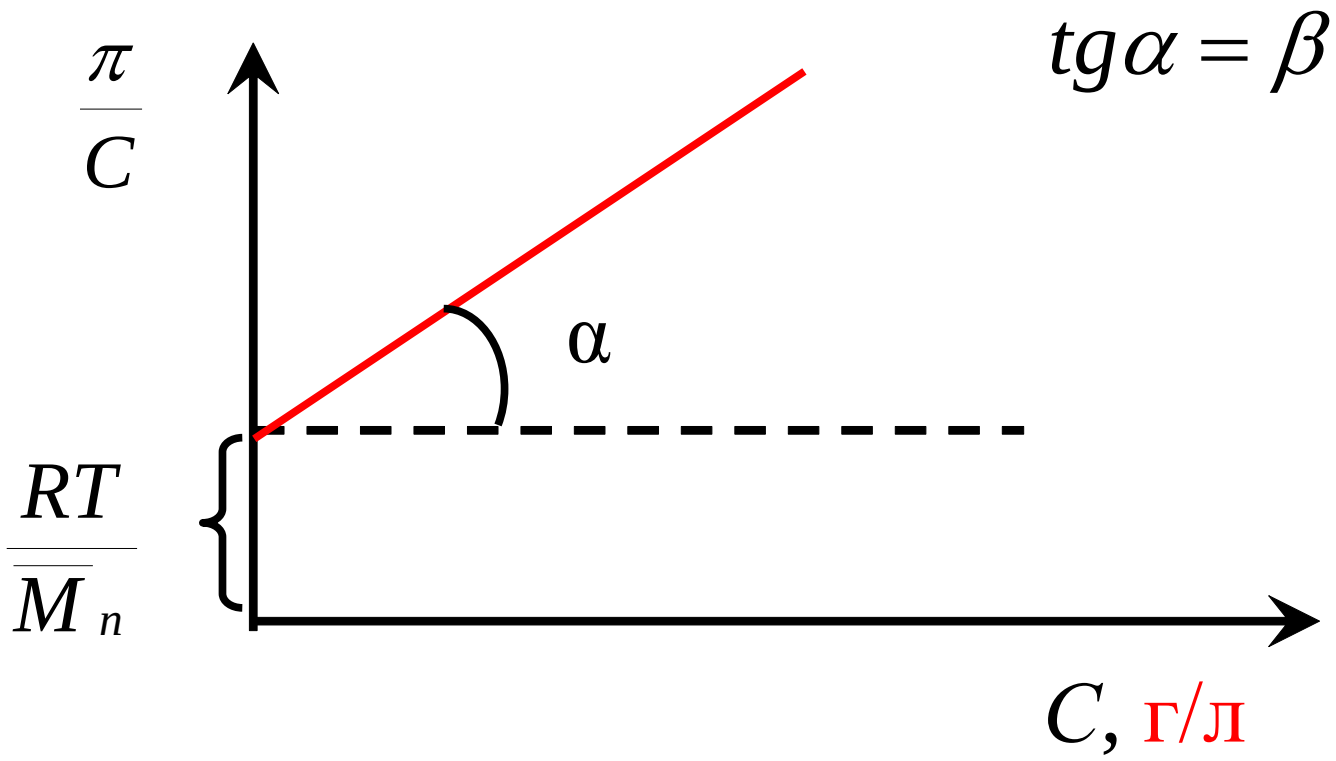
Эти особенности учитывает *уравнение Галлера:*

$$\pi = \frac{C}{\overline{M}_n} \cdot RT + \beta \cdot C^2$$

Уравнение Галлера

где: π- осмотическое давление раствора ВМС, атм;
C - массовая концентрация ВМС, г/л);
β- коэффициент, учитывающий форму и гибкость макромолекул в растворе

Зависимость приведенного осмотического давления (π/C) от концентрации ВМС в растворе



Часть осмотического давления крови обусловленного ВМС, в основном белками, называется *онкотическим* (или коллоидно-осмотическим) давлением

π (крови)=740 – 780 кПа,

0,5% этого давления приходится на осмотическое давление белков (*наибольший вклад вносят альбумины*)

π (белков)=2,5 – 4,0 кПа

Онкотическое давление мало́, но играет исключительно важную роль в обмене водой между кровью и тканями