



**ассистент, к.х.н., Малахова Юлия Николаевна**

**Практическое занятие (семинар) 2**

**Физико-химия полимеров и их растворов**

**Для 4 курса групп ХЕБО-01-13, ХЕБО-02-13, ХХБО-01-13**



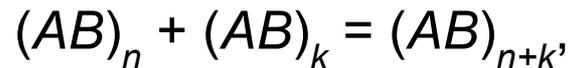
## Содержание:

1. Примеры к семинару 1 по молекулярным массам.
  - 1.1. Поликонденсация.
  - 1.2. Реакция присоединения.
2. Методы измерения молекулярных масс.
  - 2.1. Осмометрия.



## Поликонденсация

Пусть в мономере  $AB$  с молярной массой  $M_{\text{мон}}$  есть две функциональные группы  $A$  и  $B$ , тогда  $B$ -группа молекулы из  $n$  звеньев, может прореагировать с  $A$ -группой молекулы из  $k$  звеньев, с образованием молекулы из  $(n + k)$  звеньев:



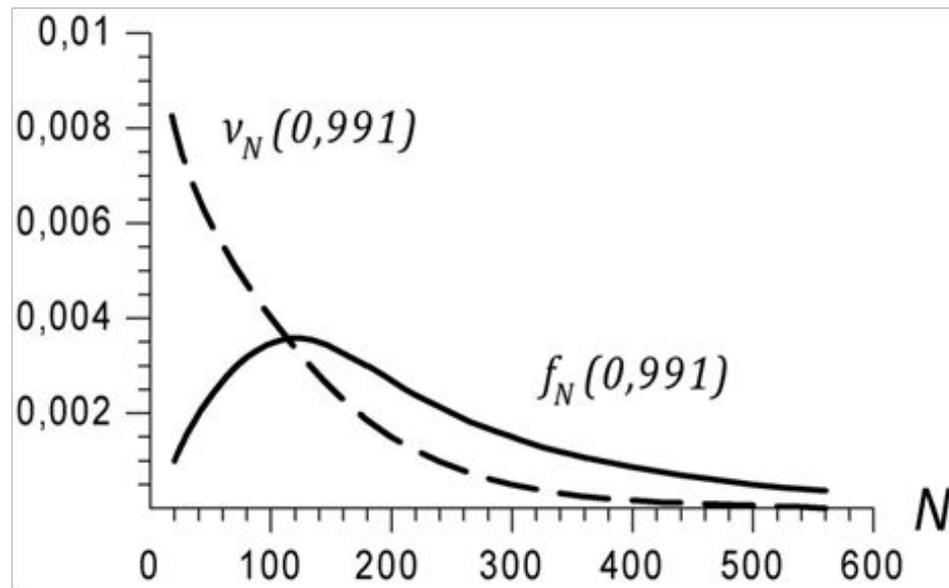
где  $n + k = N$ .

Вероятность того, что группы прореагировали ( $p$ ) – отношение числа образовавшихся связей к максимально возможному числу связей в реакции – степень конверсии  $p = n/N$ . Вероятность того, что группы не прореагировали, для каждой функциональной группы равна  $(1 - p)$ . В молекуле из  $N$  звеньев связей, вероятность образования связей равна  $p^{N-1}$ . Выразим вероятность того, что одна функциональная группа прореагирует с другой.

$$n(p, N) = p^{N-1} (1 - p)^2$$



Распределения числовых долей  $v_N(p) = p^{N-1} (1 - p)$  и весовых долей  $f_N(p) = Np^{N-1} (1 - p)^2$  для линейных поликонденсационных полимеров, представлены на рисунке при степени конверсии 0,991.





Среднечисленную и среднемассовую молекулярные массы можно выразить через молярную массу мономера и степень конверсии.

$$\overline{M}_n = \frac{M_{\text{мон}}}{1 - p}$$

$$\overline{M}_w = \frac{M_{\text{мон}}(1 + p)}{1 - p}$$

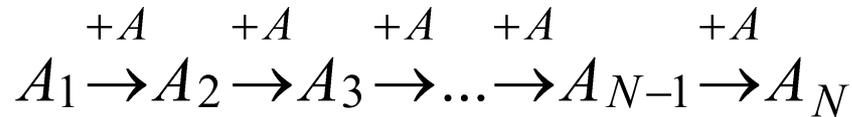
Индекс полидисперсности при полной конверсии.

$$\gamma = \frac{\overline{M}_w}{\overline{M}_n} = 1 + p \rightarrow 2$$



## Реакция присоединения

Мономер присоединяется к растущему радикалу.



Если скорость деполимеризации мала, а обрыв цепи не учитывается, то распределение числовых долей описывается функцией Пуассона.

$$v_N = \frac{(N_n - 1)^{N-1}}{(N_n - 1)!} e^{1-N_n}$$

Выразим индекс полидисперсности (здесь отношение среднемассовой и среднечисленной *степеней* полимеризации).

$$\frac{N_w}{N_n} = 1 + \frac{1}{N_n} - \frac{1}{N_n^2}$$



## Методы измерения молекулярных масс

| Метод                 | Значение ММ |      | $\overline{M}_n$ | $\overline{M}_w$ | Диапазон          | $A_2$ |
|-----------------------|-------------|------|------------------|------------------|-------------------|-------|
|                       | абс.        | отн. |                  |                  |                   |       |
| анализ концевых групп | +           |      | +                |                  | $< 10 \cdot 10^3$ |       |
| осмометрия            | +           |      | +                |                  | $> 20 \cdot 10^3$ | +     |
| криоскопия            | +           |      | +                |                  | $< 30 \cdot 10^3$ | +     |
| эбуллиоскопия         | +           |      | +                |                  | $< 30 \cdot 10^3$ | +     |
| светорассеяние        | +           |      |                  | +                | $10^4 - 10^7$     | +     |
| вискозиметрия         |             | +    |                  |                  | $< 10^6$          |       |
| ГПХ                   |             | +    | +                | +                | $10^3 - 10^7$     |       |
| ГПХ + вискозиметр     |             | +    | +                | +                | $10^3 - 10^6$     |       |
| ГПХ + светорассеяние  | +           |      |                  | +                | $10^4 - 10^7$     |       |
| MALDI-TOF-MS          | +           |      | +                | +                | $< 10^6$          |       |

$A_2$  – второй вириальный коэффициент



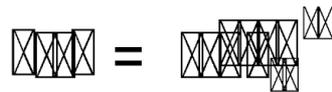
Существует много методов определения средних молекулярных масс и ММР.

Среднечисленную ММ часто определяют при помощи анализа концевых групп (обычно ядерно-магнитно-резонансная (ЯМР) и инфракрасная (ИК) спектроскопия).

Также среднечисленную ММ можно определить, изучая коллигативные свойства разбавленного раствора полимера: осмотическое давление, повышение температуры кипения (эбуллиоскопия), понижение температуры замерзания (криоскопия).

Среднемассовая ММ измеряется светорассеянием, причем используется как видимый свет (поляризованный), так и рентгеновское или нейтронное излучения.

Визкозиметрия позволяет оценить средневязкостную ММ по уравнению Марка-Куна-Хаувинка





Полное ММР, включающее молекулярные массы высоких степеней усреднения, измеряется гель-проникающей хроматографией (ГПХ). Полимерный раствор продавливается через колонки с различной пористостью (постепенно уменьшающейся), затем каждая фракция проходит через необходимые детекторы, при этом непосредственно измеряется гидродинамический объем, а молекулярная масса оценивается по стандарту (обычно полистирол).

Лазерная десорбционно-ионизационная масс-спектрометрия с участием матрицы: MALDI-TOF-MS (matrix-assisted laser desorption-ionization mass spectroscopy) позволяет получить полное ММР исследуемого полимера. Полимер рассредоточен в матрице вещества, поглощающего ультрафиолет (УФ) после высушивания раствора этой смеси в вакуумной камере. При облучении УФ-лазером, полимеры поглощают из материала матрицы энергию и испаряются (десорбируются) в виде ионов. Ионы полимера попадают на электрод детектора в порядке возрастания их масс, и амплитуда всплеска зависит от количества молекул. Метод MALDI-TOF-MS измеряет абсолютное значение массы, в отличие от ГПХ.



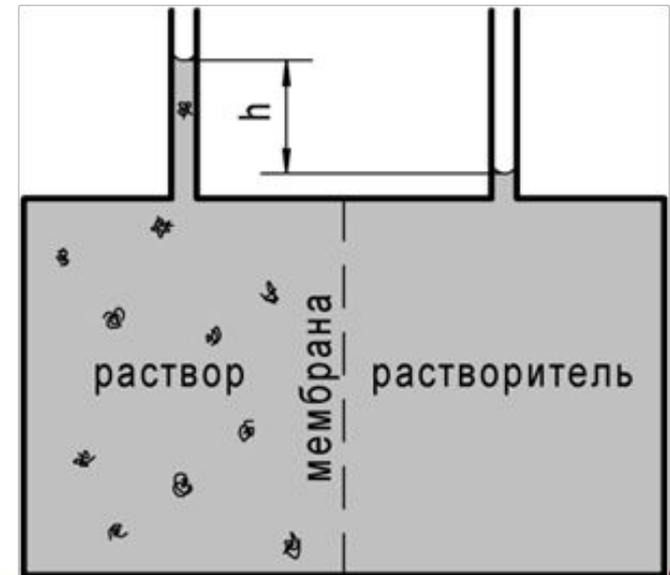
## Осмометрия

**Осмотическое давление** – термодинамическое коллигативное свойство, измеряемое по разнице свободных энергий полимерного раствора и чистого растворителя. Растворитель и раствор полимера разделяются полупроницаемой мембраной, пропускающей молекулы растворителя, но задерживающей полимерные макромолекулы.

### Схема мембранного осмометра

Увеличение свободной энергии при смешении полимера с растворителем обуславливает приток растворителя до выравнивания давлений.

Осмотическое давление можно выразить через разность высот  $h$  как  $\pi = \rho gh$ , где  $\rho$  – плотность растворителя,  $g$  – ускорение свободного падения.





Поскольку молекулы полимера в разбавленных растворах не взаимодействуют между собой и не проникают через мембрану, можно выразить их давление аналогично давлению молекул идеального газа:  $p = nkT$ , где число молекул в растворе полимера будет равно  $n = cN_A / M_{\text{полимер}}$ ,  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  [Дж/(моль·К)] – константа Больцмана,  $T$  – абсолютная температура [К], следовательно:

$$\pi = \frac{cN_A kT}{M_{\text{полимер}}}$$

Для монодисперсного полимера осмотический коэффициент в бесконечно разбавленных растворах выражают:

$$\lim_{c \rightarrow 0} \frac{\pi}{c} = kT \frac{N_A}{M_{\text{полимер}}} = \frac{RT}{M_{\text{полимер}}}$$

где  $R = kN_A = 8.31$  [Дж/(моль·К)] – универсальная газовая постоянная.



Для полидисперсного полимера следует учесть вклад в осмотическое давление макромолекул различных молекулярных масс  $M_i$  и концентраций  $c_i$ :

$$\lim_{c \rightarrow 0} \frac{\pi}{c} = \frac{RT}{c} \sum_i \frac{c_i}{M_i} = \frac{RT}{M_n}$$

В осмотическое давление полимеров вносит вклад взаимодействие между макромолекулами  $i$  и  $j$ , определяемое как  $A_{ij}c_i c_j RT$ , где  $A_{ij}$  – второй вириальный коэффициент между  $i$  и  $j$ .

$$\pi = RT \left( \frac{c_i}{M_n} + \sum_i \sum_j A_{ij} c_i c_j + \dots \right) = RT \left( \frac{c}{M_n} + A_2 c^2 + \dots \right)$$

Коэффициент  $A_2$  – среднемассовый второй вириальный коэффициент.

$$A_2 \equiv \frac{1}{c^2} \sum_i \sum_j A_{ij} c_i c_j$$



Измерение осмотического давления разбавленных растворов полимеров позволяет определить среднечисленную молекулярную массу полидисперсного образца.

Для этого необходимо экстраполировать значения осмотического коэффициента, измеренные при разных низких концентрациях, к нулевой предельной концентрации

$$\frac{\pi}{cRT} = f(c)$$

$$\frac{\pi}{cRT} = \frac{1}{M_n} + A_2c$$

Таким образом, среднечисленная молекулярная масса определяется из величины отрезка, отсекаемого на оси ординат, а второй вириальный коэффициент – из наклона прямых.



**Спасибо за внимание!**