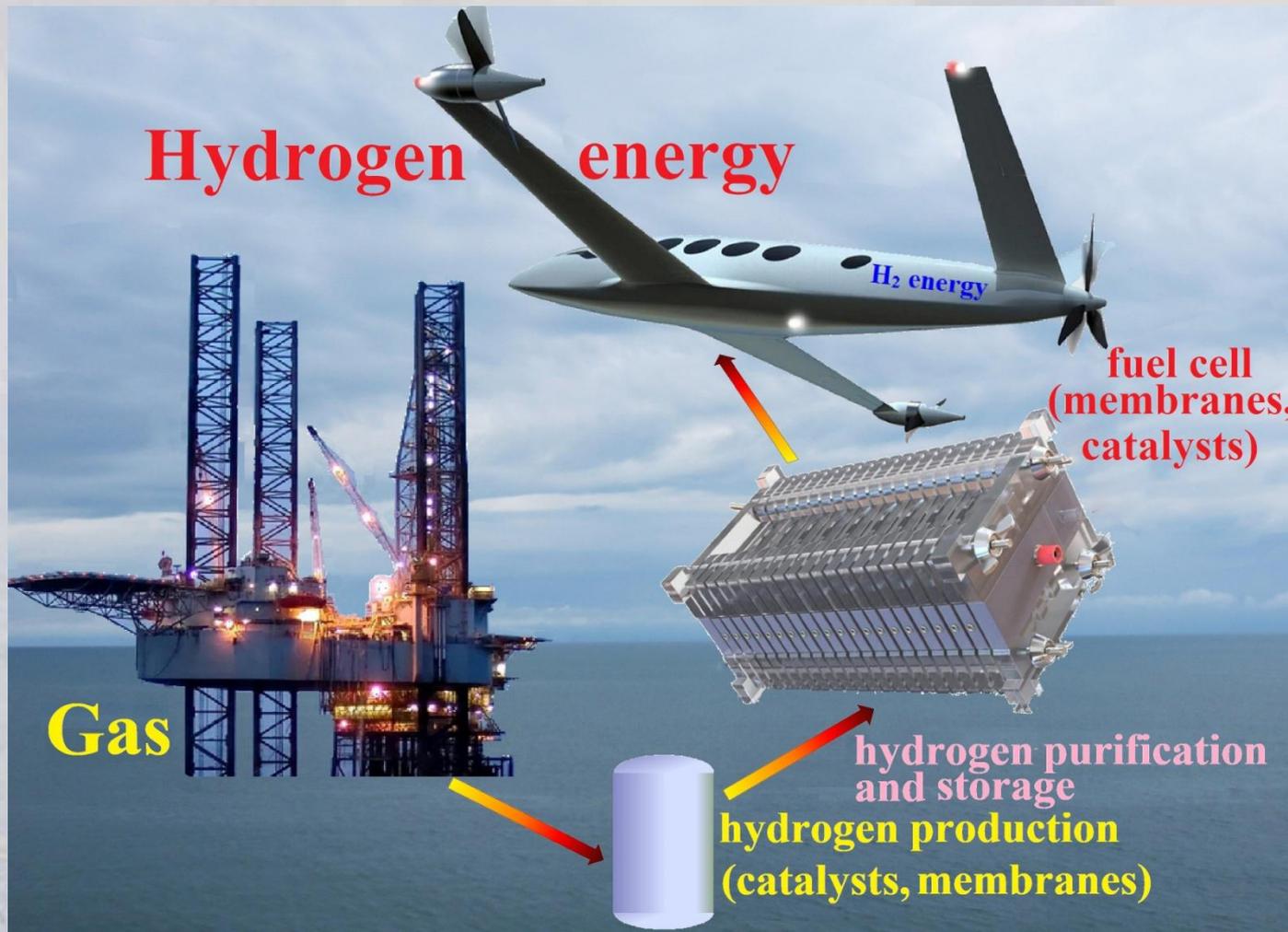
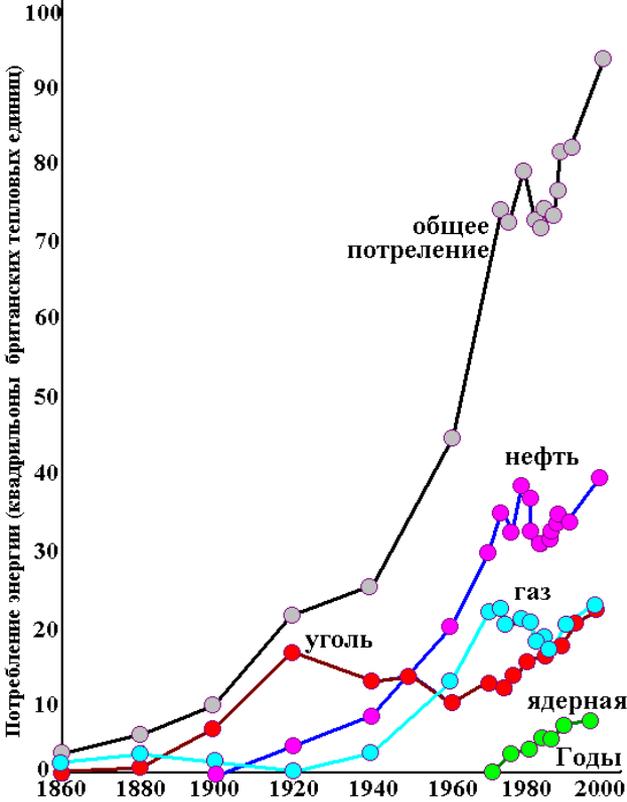


Мембранные материалы для водородной энергетики





40% нефть

2000

70% уголь

1900



>90% древесина

1800



Парижское соглашение

Так ли безупречны его основные положения?

Глобальное потепление.

Парниковые газы.

Курс на декарбонизацию экономики.

«углеродный след»
(налоги, санкции)

Нефть, газ, уголь, сталь...

Энергосберегающие технологии.

Альтернативная энергетика.

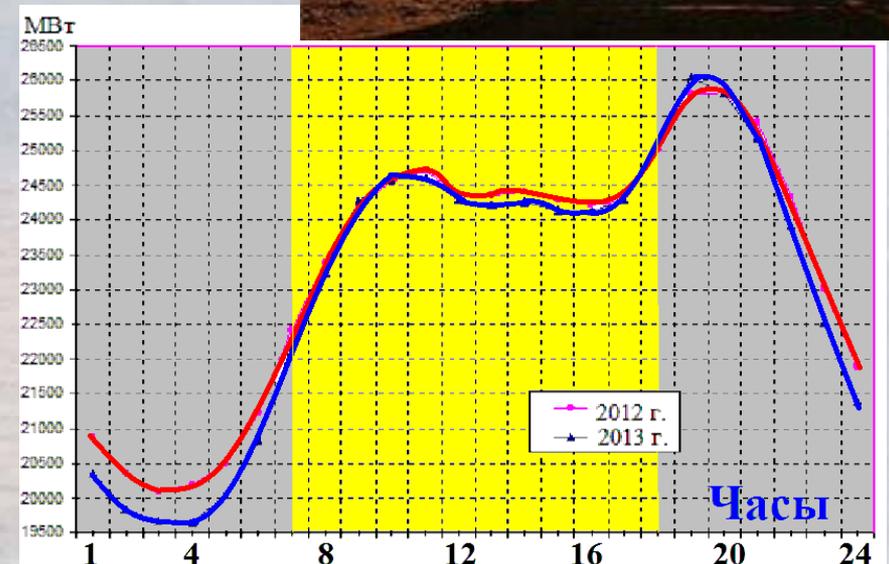
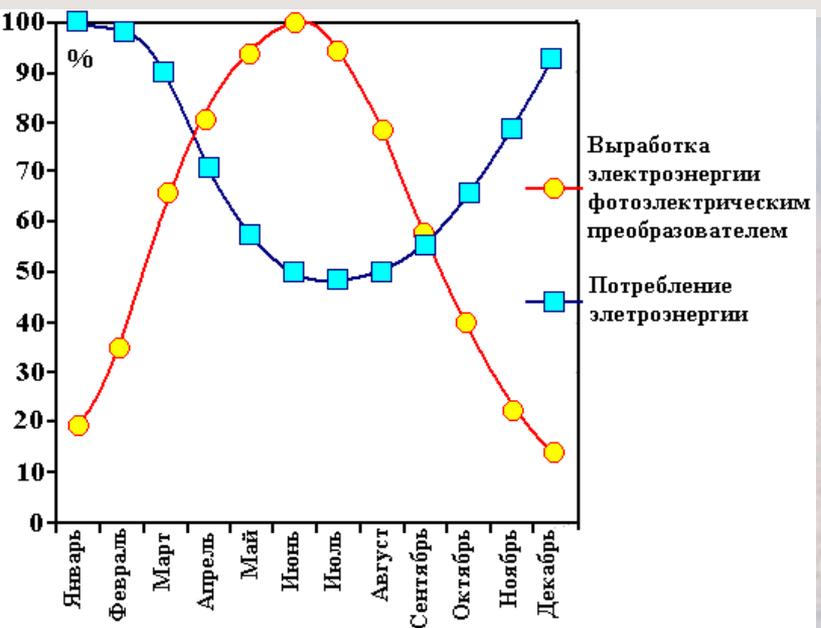
Сжигание ископаемого топлива (уголь, нефть).
Оксиды серы и азота, CO, продукты неполного сгорания, свинец (присадки).



Альтернативная энергетика



Немецкая электроэнергетика переходит на возобновляемые источники



Получение:
электролиз,
паровой риформинг метана,
парциальное окисление метана,
паровой риформинг спиртов...

Очистка:
палладиевые мембраны,
неметаллические мембраны,
композиционные мембраны...

Хранение:
сжиженный,
под высоким давлением,
в сорбированном виде,
химически связанный...

Топливные элементы:
на протонпроводящих
мембранах,
прямые метанольные,
твердооксидные...

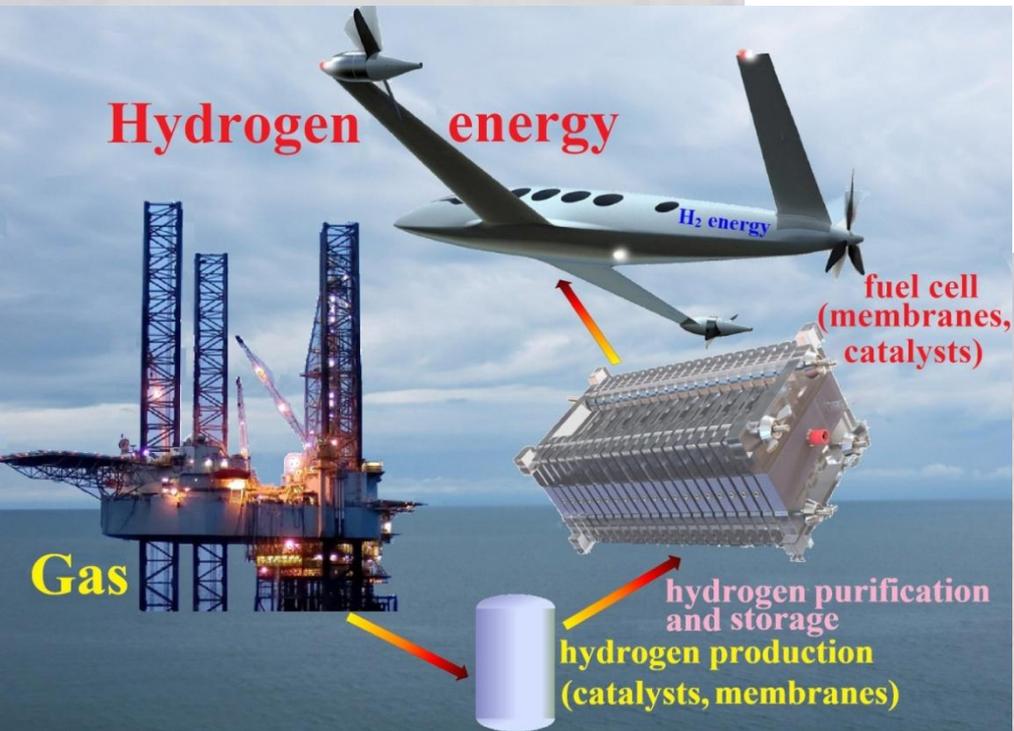
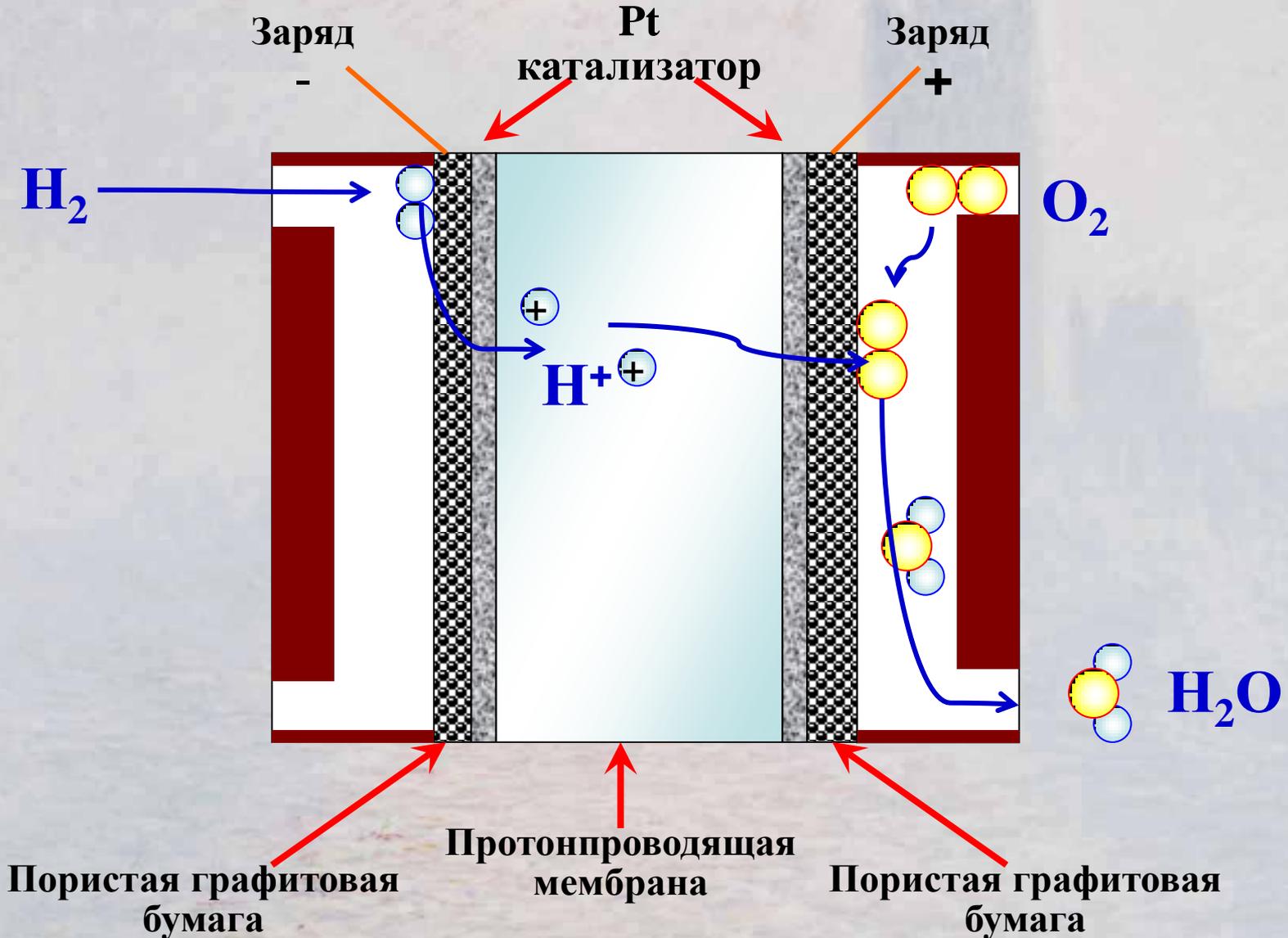


Схема работы топливного элемента



**Топливные элементы,
Обратный электролиз,
Металл-ионные аккумуляторы,
Проточные батареи,
Водоочистка...**

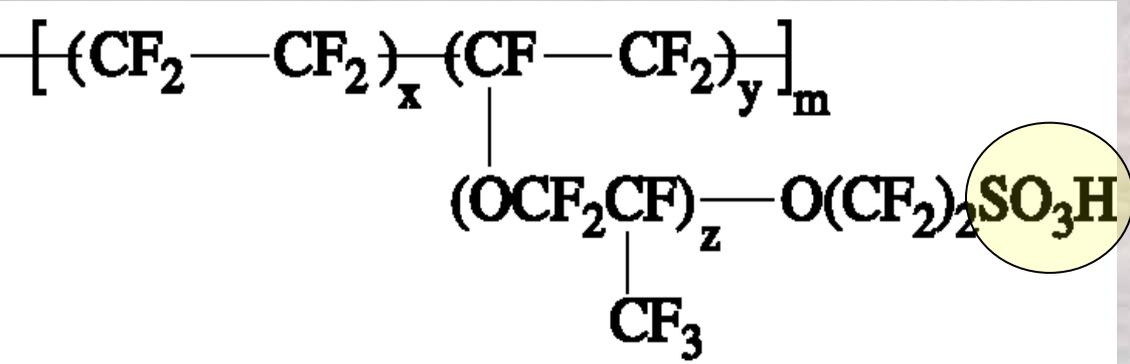
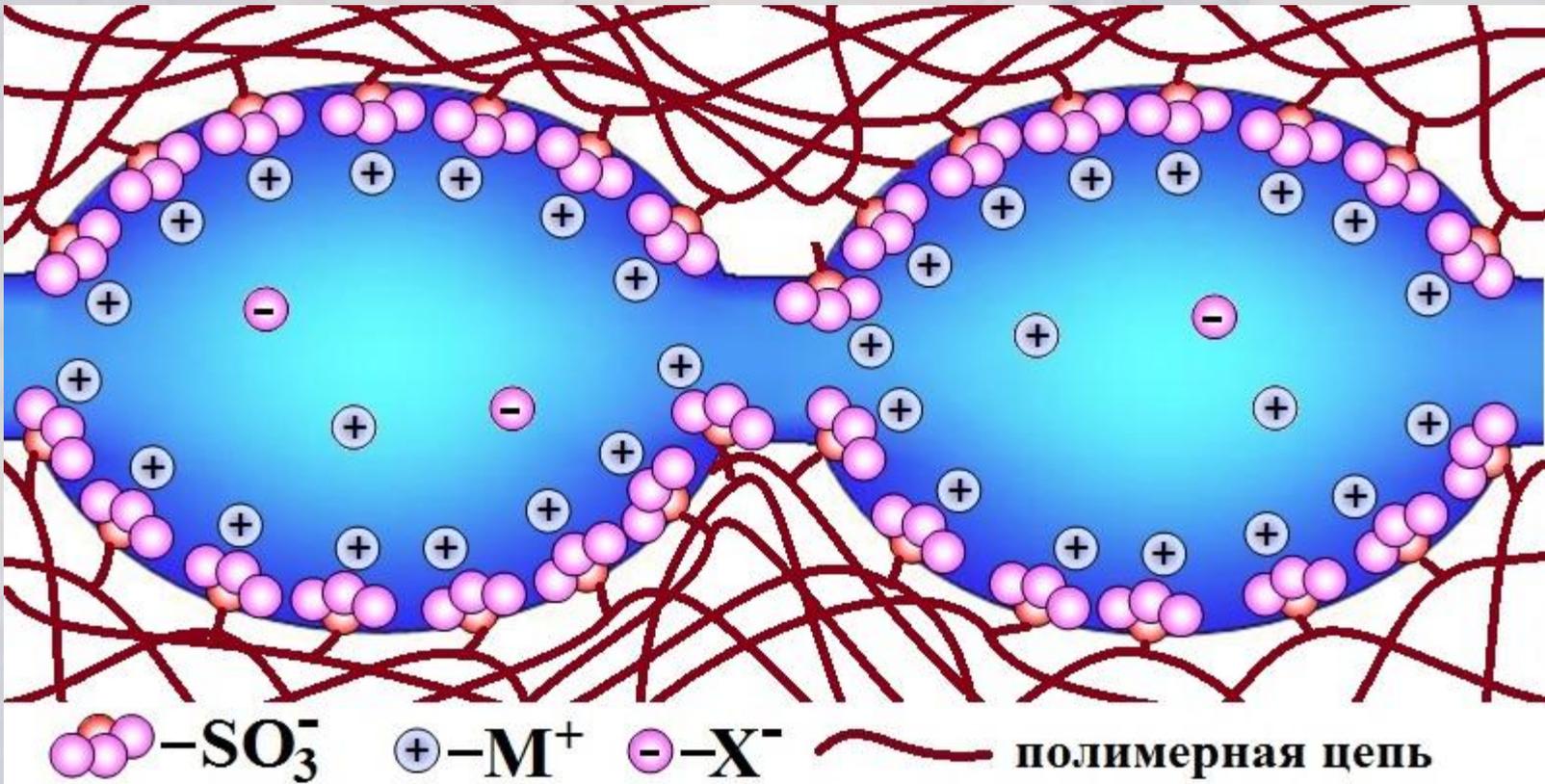
**Ионная
проводимость**

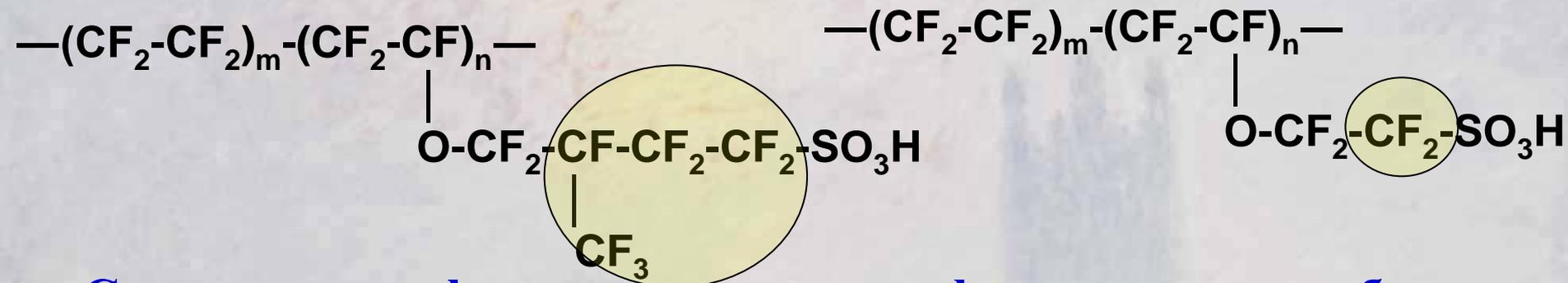
Селективность

Числа переноса

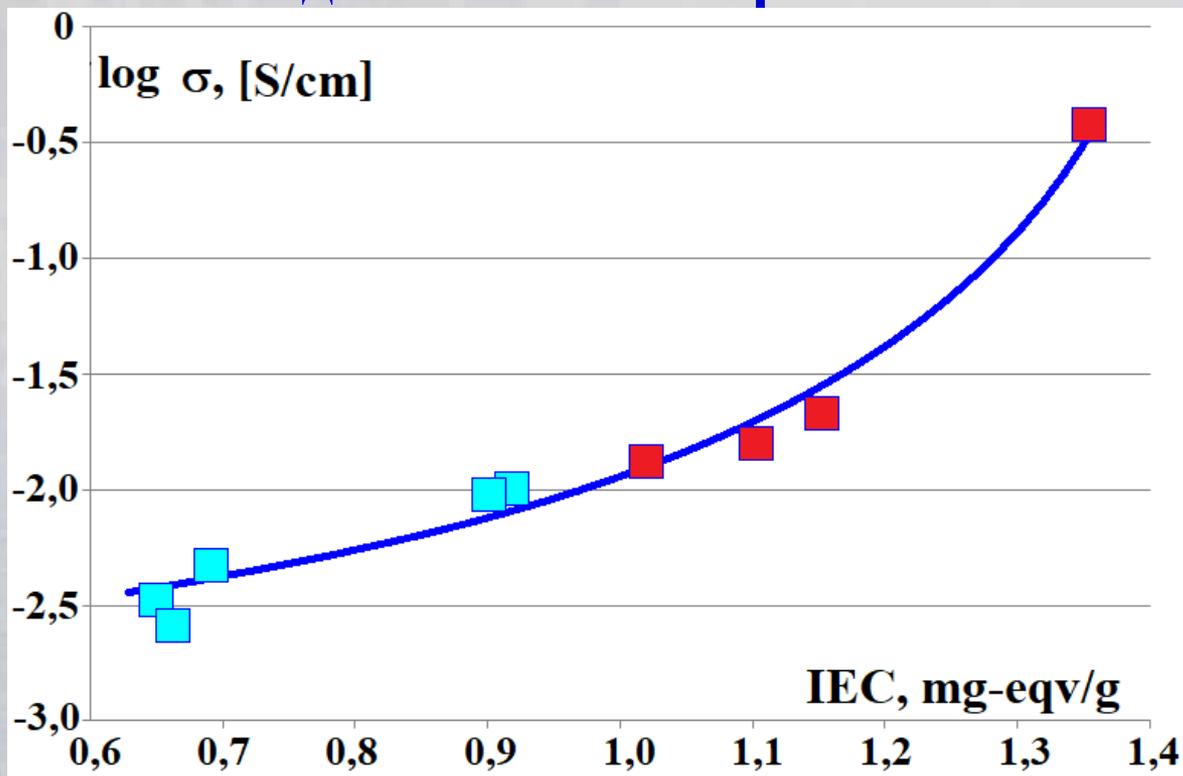
Газопроницаемость

Структура пор и каналов в ионообменных мембранах (W.Y. Hsu, T. D. J. Gierke. Membr. Sci. 1983. 13. 307)



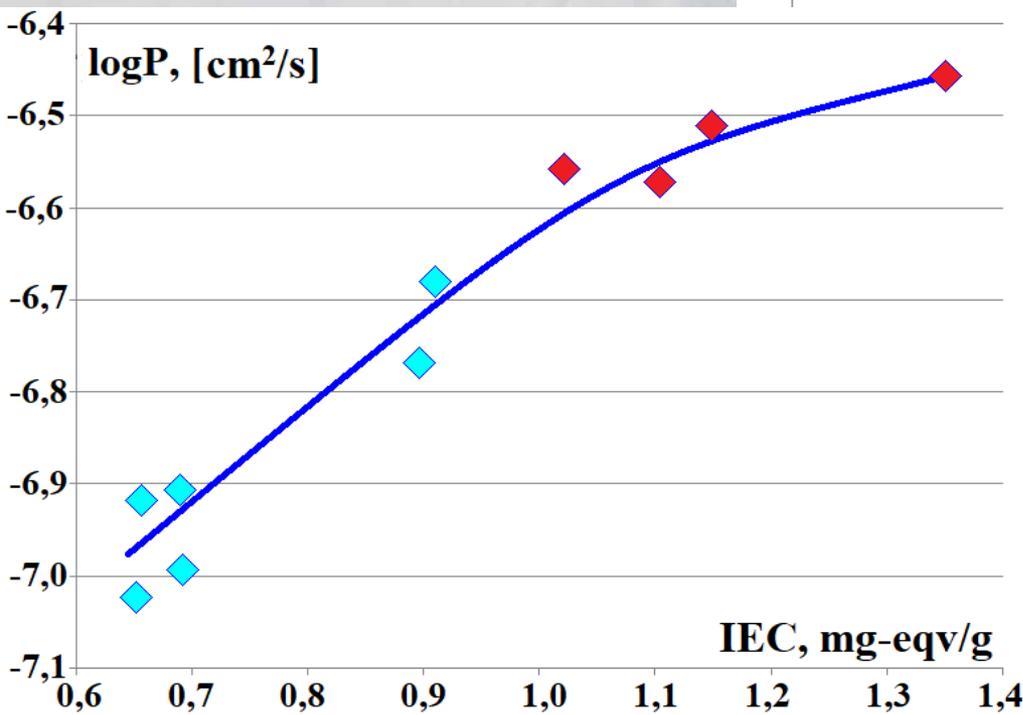
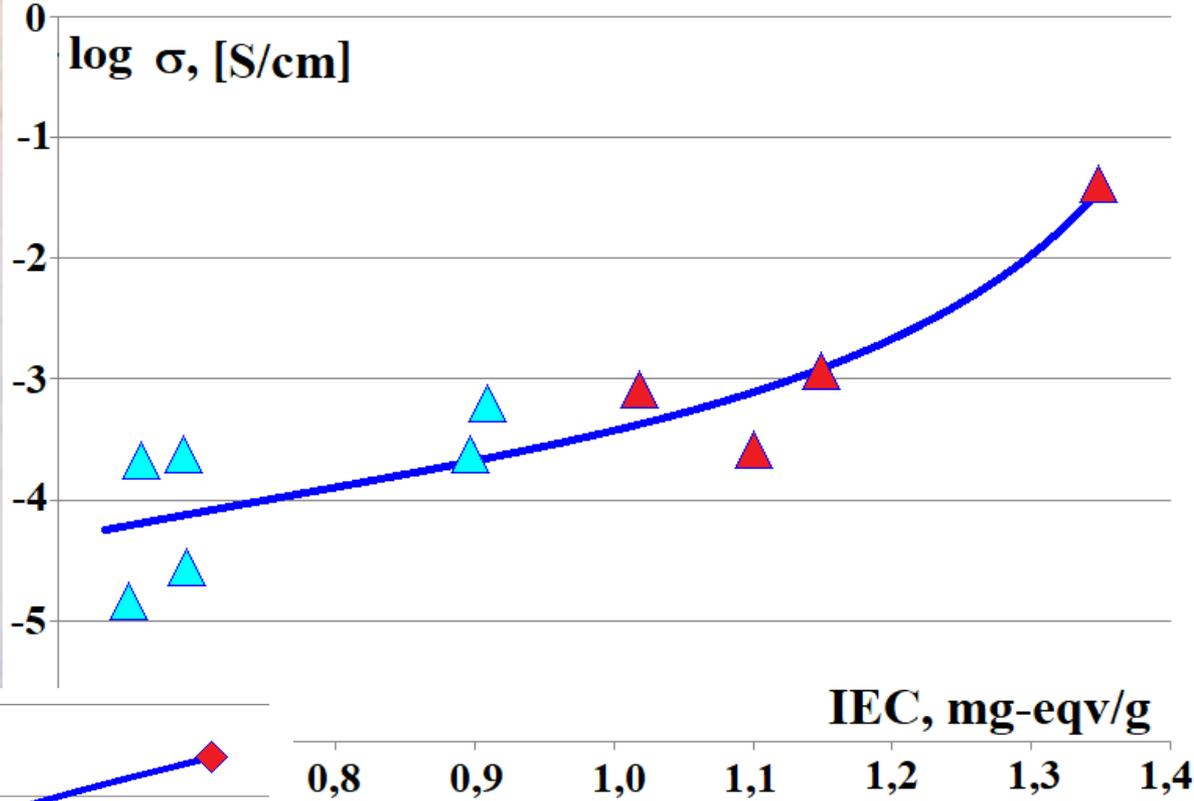


Структура перфторированных сульфированных мембран с длинными и короткими боковыми цепями.



Зависимость протонной проводимости мембран из перфторированного сульфокатионита в контакте с водой от их ионообменной способности при 25 °С. Мембраны с короткой боковой цепью выделены красным цветом.

Зависимость протонной проводимости мембран перфторированных сульфокатионитов от их ионообменной емкости при $RH = 32\%$ от их ионообменной емкости при $25^\circ C$.



Зависимость проницаемости по кислороду мембран перфторированных сульфокатионитов от их ионообменной емкости при $25^\circ C$.

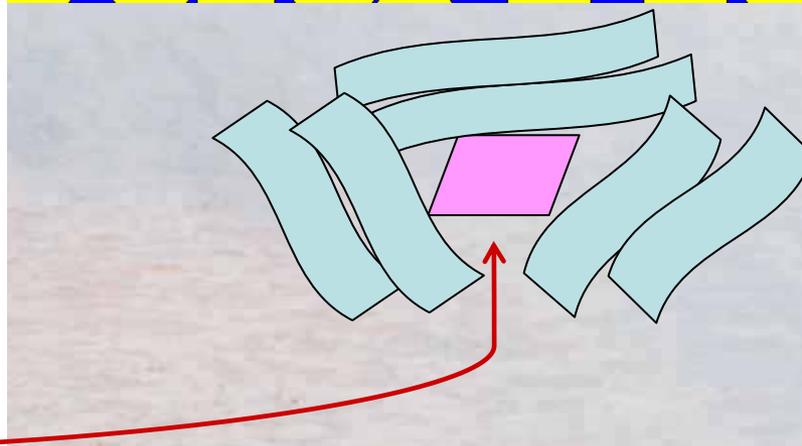
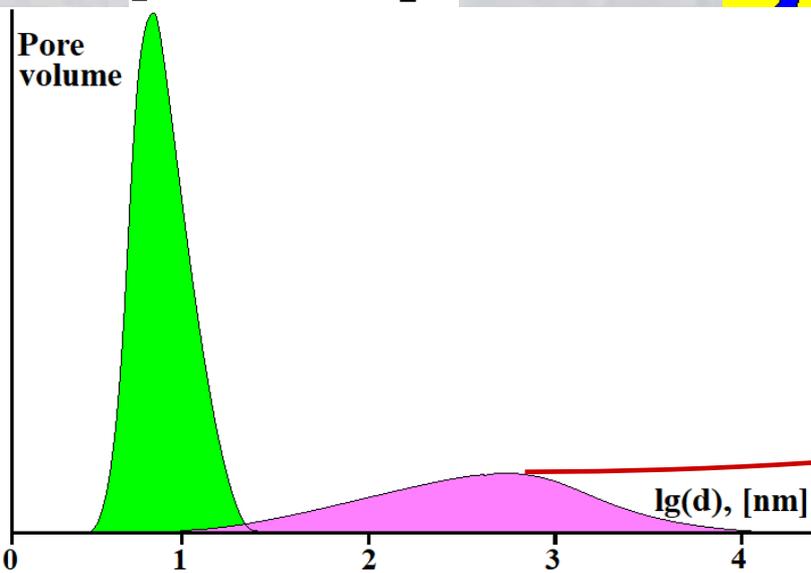
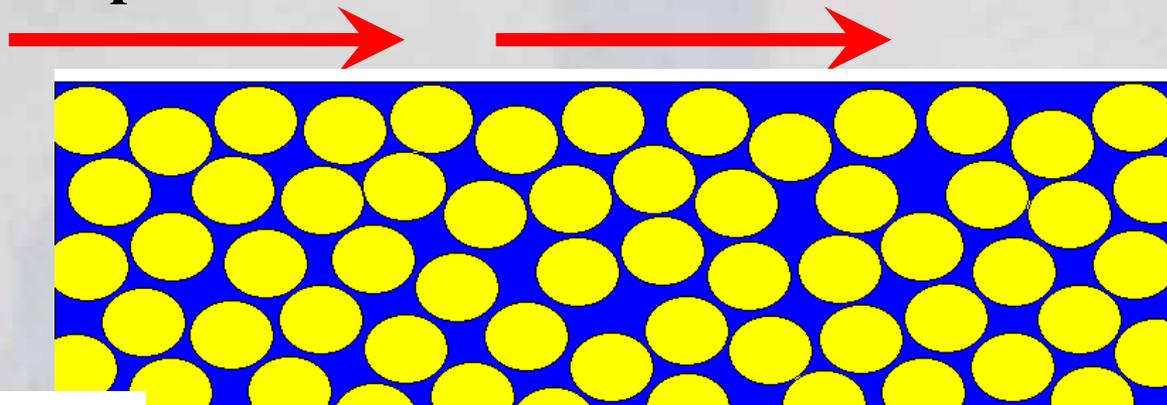
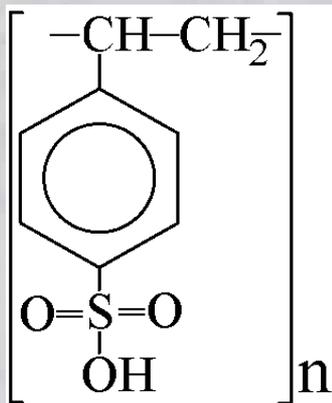
Гетерогенные мембраны

Полистирол
сульфат

Полиэтилен

Прокатка

Горячее прессование



Привитые мембраны

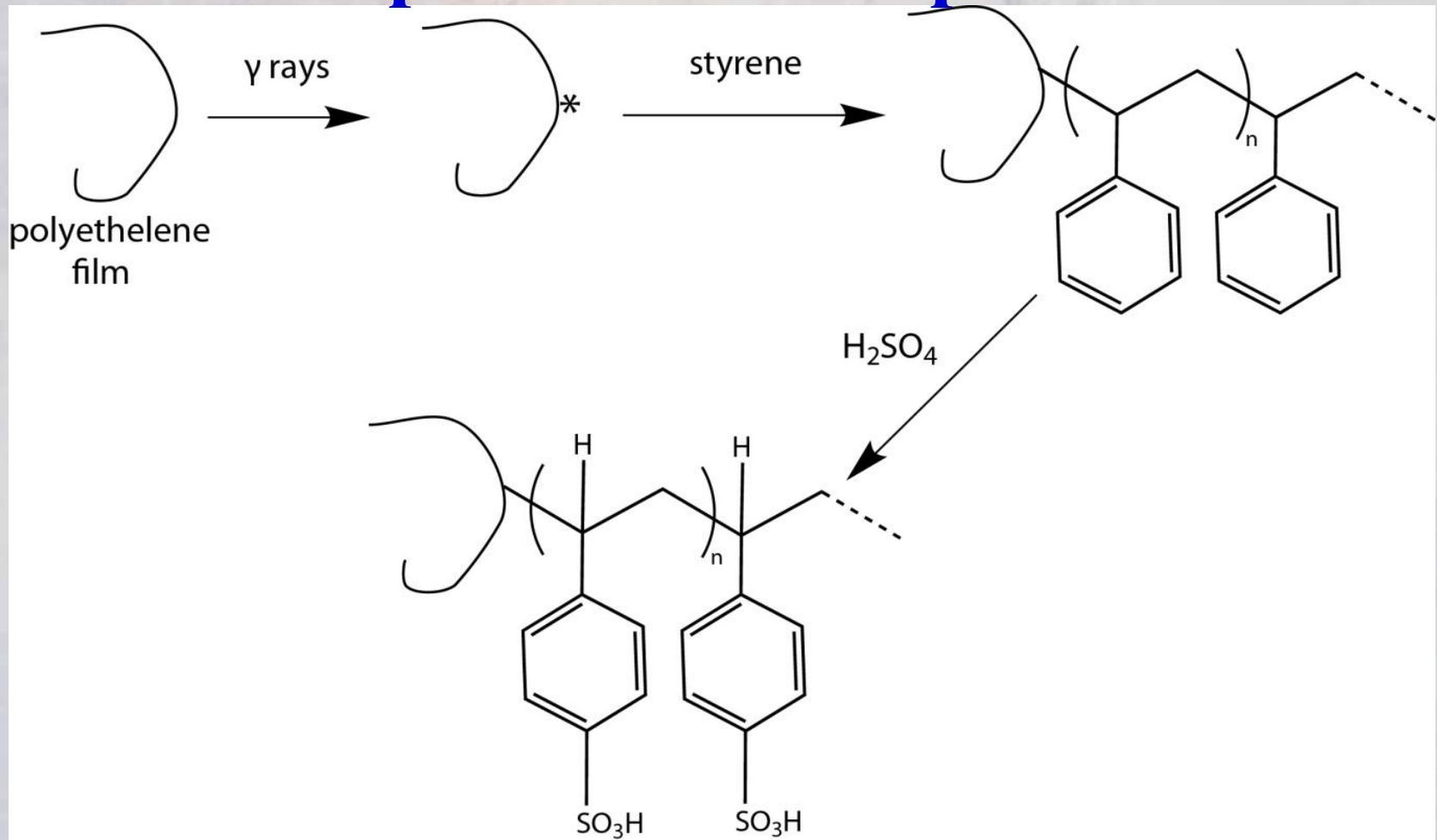
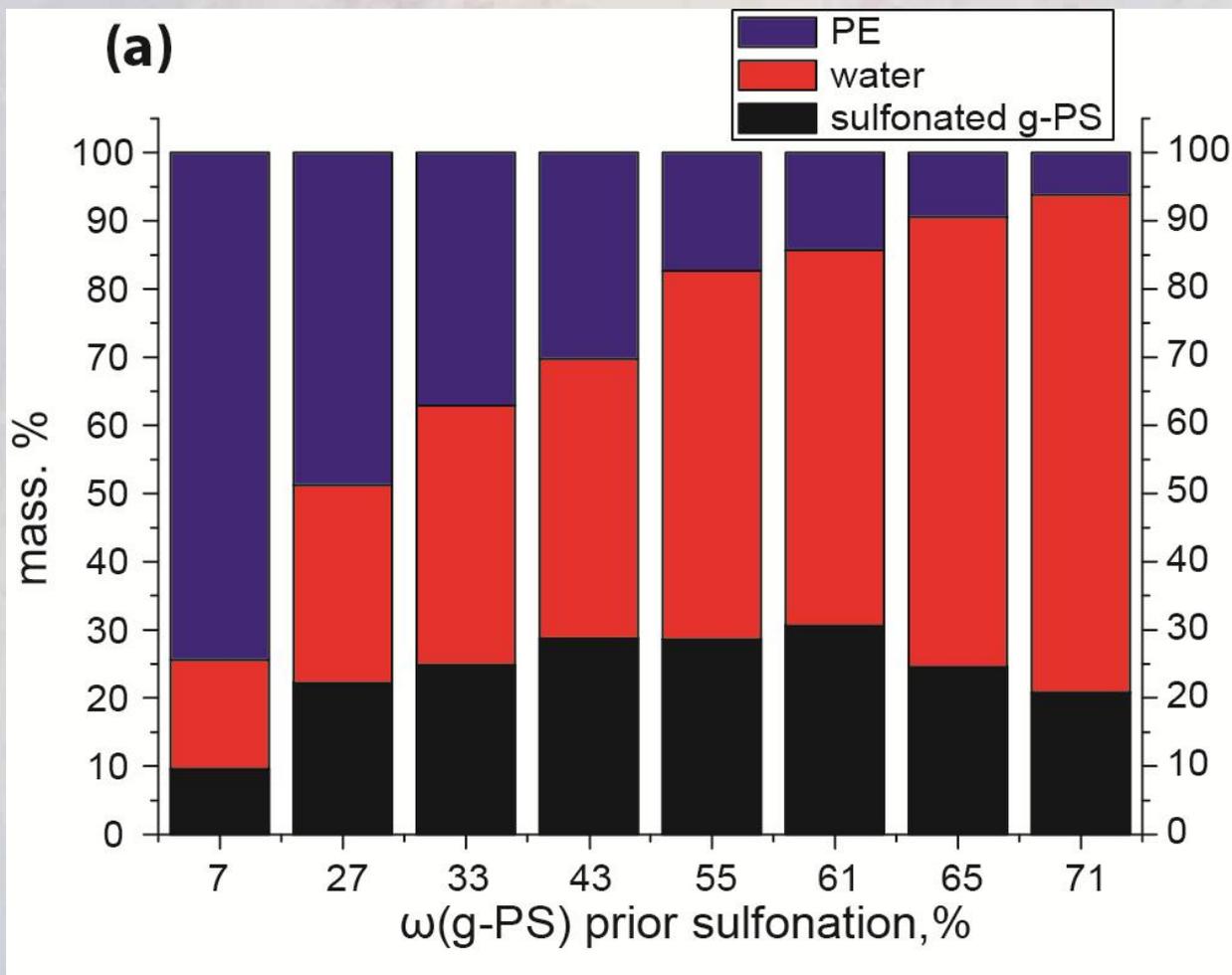


Схема синтеза привитых мембран - полистиролсульфат в полиэтилене.

Safronova E.Yu., Golubenko D.V., Shevlyakova N.V., D'yakova M.G., Tverskoi V.A., Dammak L., Grande D., Yaroslavtsev A.B./ J. Membrane Sci. 2016, V. 515, p. 196–203.

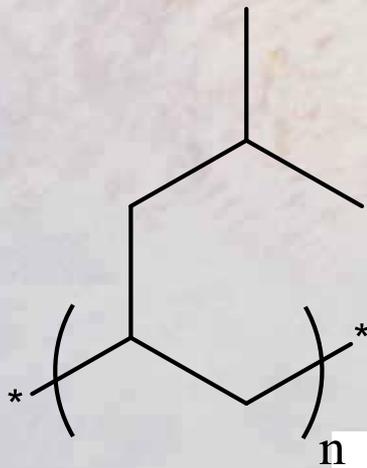


«Фазовый» состав полученных мембран в контакте с водой.

Golubenko D.V., Safronova E.Y., Ilyin A.B., Shevlyakova N.V., Tverskoi V.A., Dammak L., Grande D., Yaroslavtsev A.B./ Materials Chemistry and Physics 2017, V.197, p.192-199

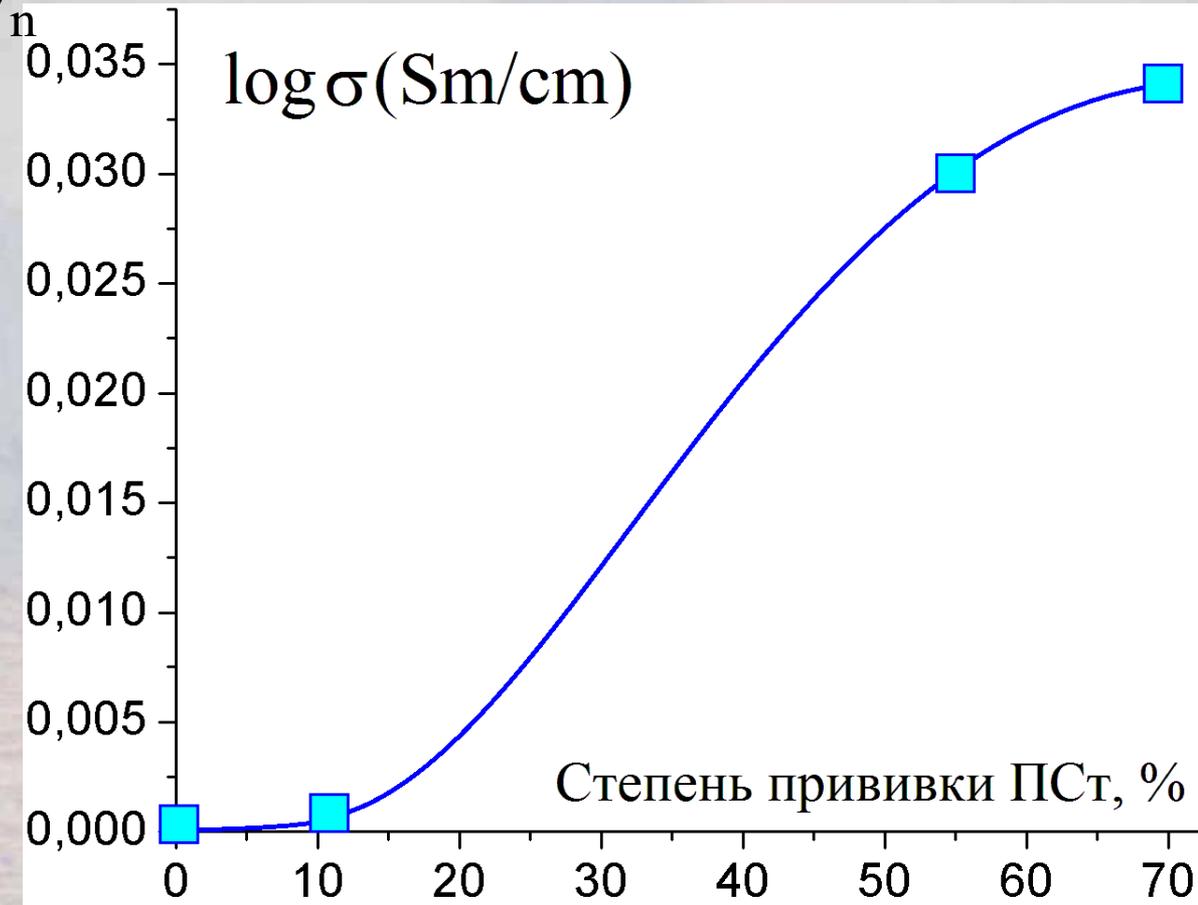
УФ-прививка

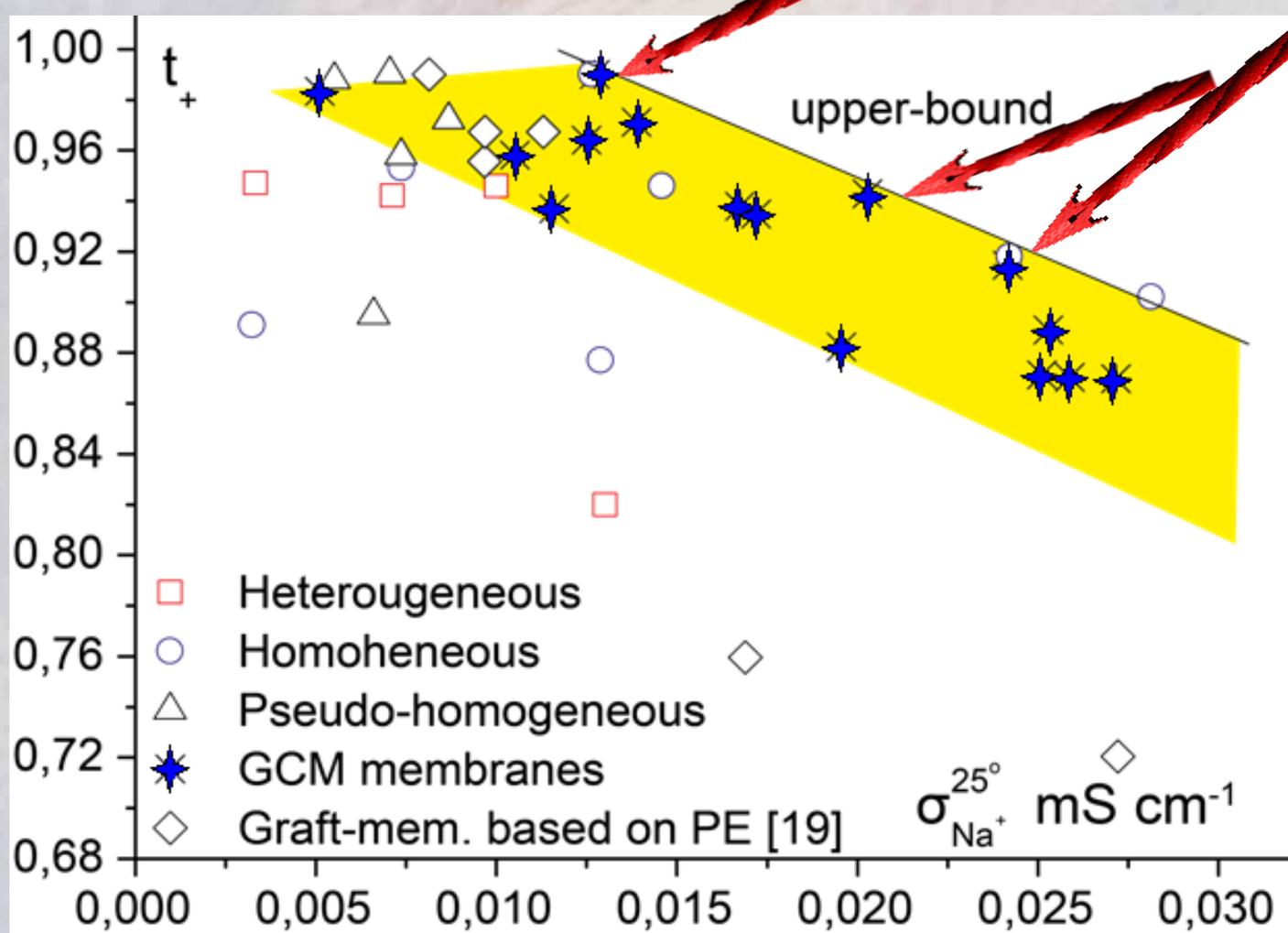
Химическая структура
полиметилпентена



Зависимость ионной проводимости мембран ПМП-ПСт от степени прививки полистирола

*D.V. Golubenko, Yaroslvtsev
A.B./ Mendeleev Commun.,
2017, v.27, p.572–573*

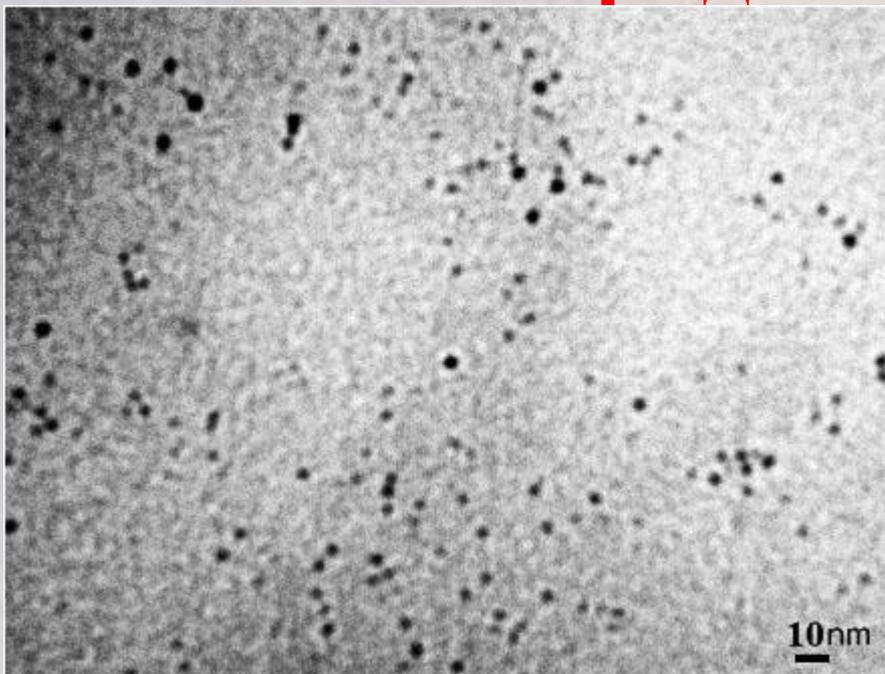




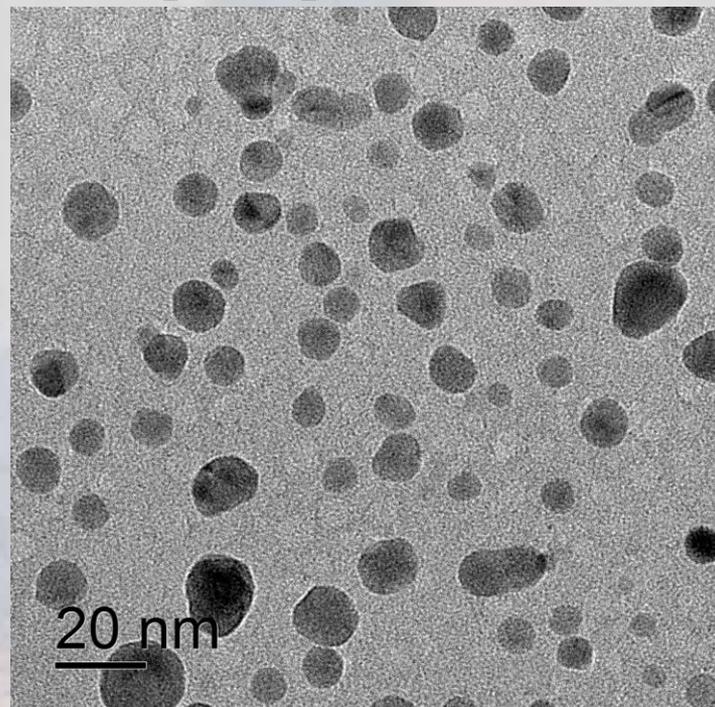
Зависимость потенциометрических чисел переноса от ионной проводимости мембран в Na^+ -форме (0,5 M NaCl) для ряда привитых мембран на основе полиметил пентена (GCM membranes), привитых мембран на основе полиэтиленовой пленки, и ряда коммерческих мембран

Golubenko D.V., Pourcelly G., Yaroslavtsev A.B.// Separation Purification Tec. 2018, V.207, p.329–335.

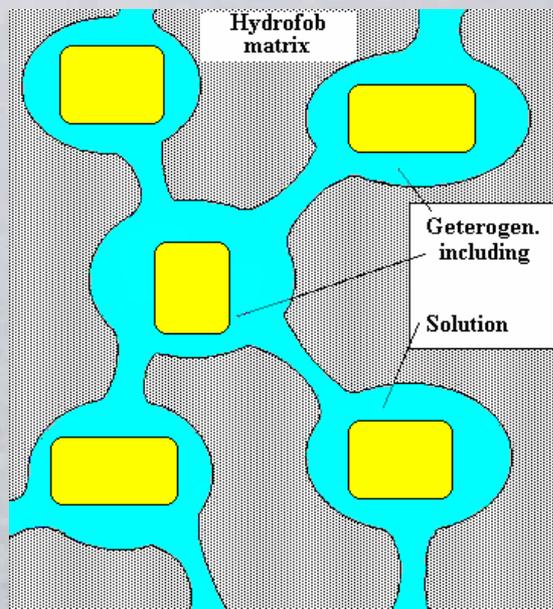
Гибридные мембраны



Микрофотография мембраны МФ-4СК, модифицированной гидратированным оксидом кремния, размер частиц $\approx 2-5$ нм



Микрофотография мембраны Nafion + 3 мас.% $Cs_xH_{3-x}PW_{12}O_{40}$, отливка с наночастицами, размер частиц $\approx 6-18$ нм



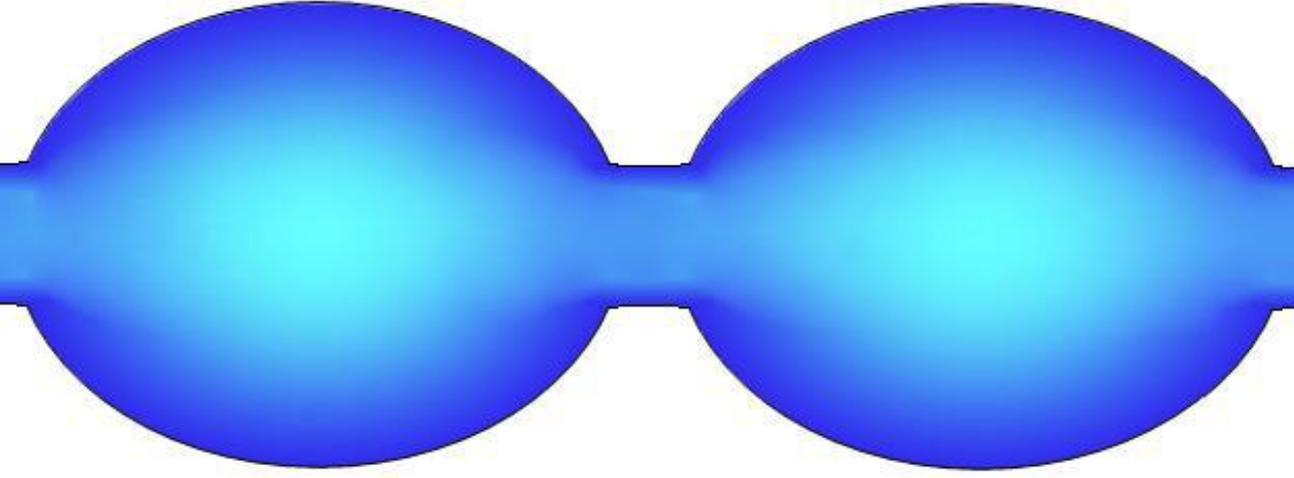
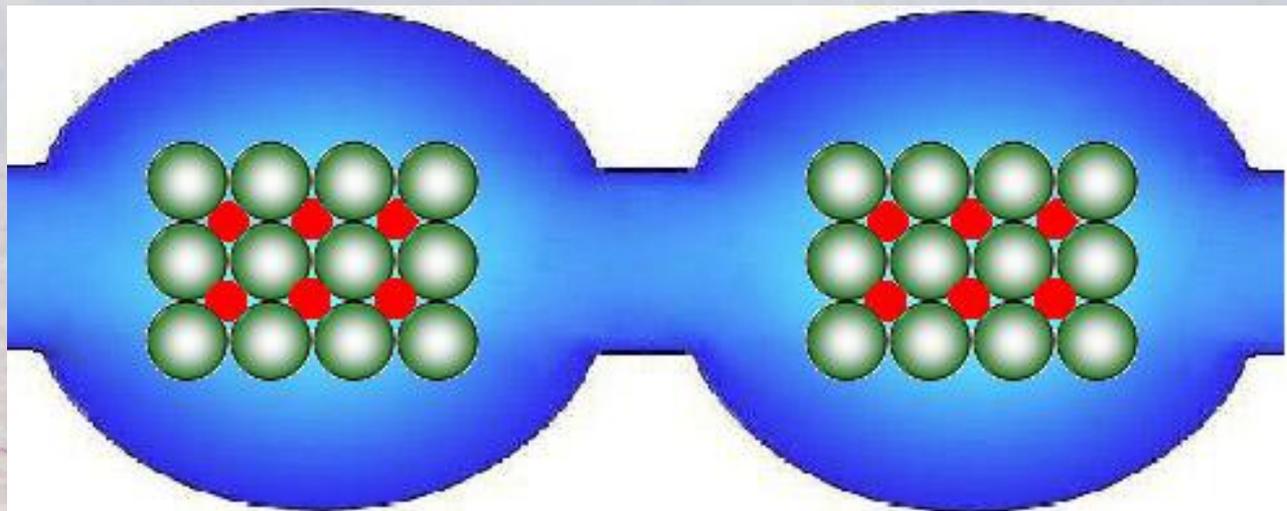


Схема строения системы пор и каналов в гидратированной мембране МФ-4СК.



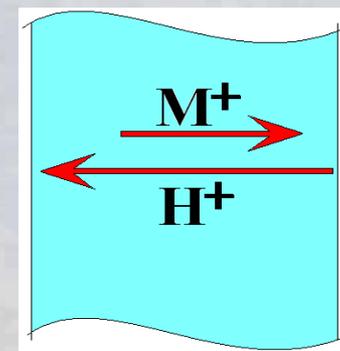
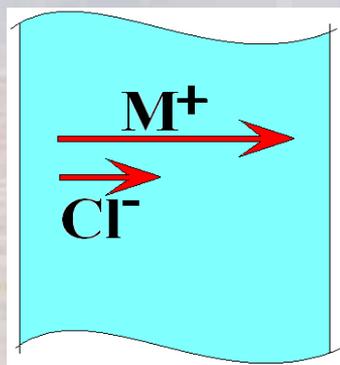
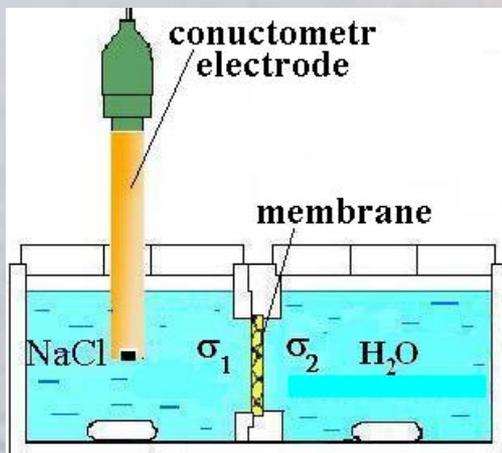
Схема строения системы пор и каналов в мембране МФ-4СК, допированной наночастицами.



Селективность процессов переноса

Числа переноса по анионам для мембран МФ-4СК
исходных и допированных фосфатом циркония.

Раствор элктролита	МФ-4СК	МФ-4СК-HZrP
0.1 M LiCl	0.0023	0.0007
1 M LiCl	0.0099	0.0044
0.1 M NaCl	0.0033	0.0007
1 M NaCl	0.033	0.0083
0.1 M KCl	0.029	0.0054
1 M KCl	0.032	0.023



Селективность гибридных мембран

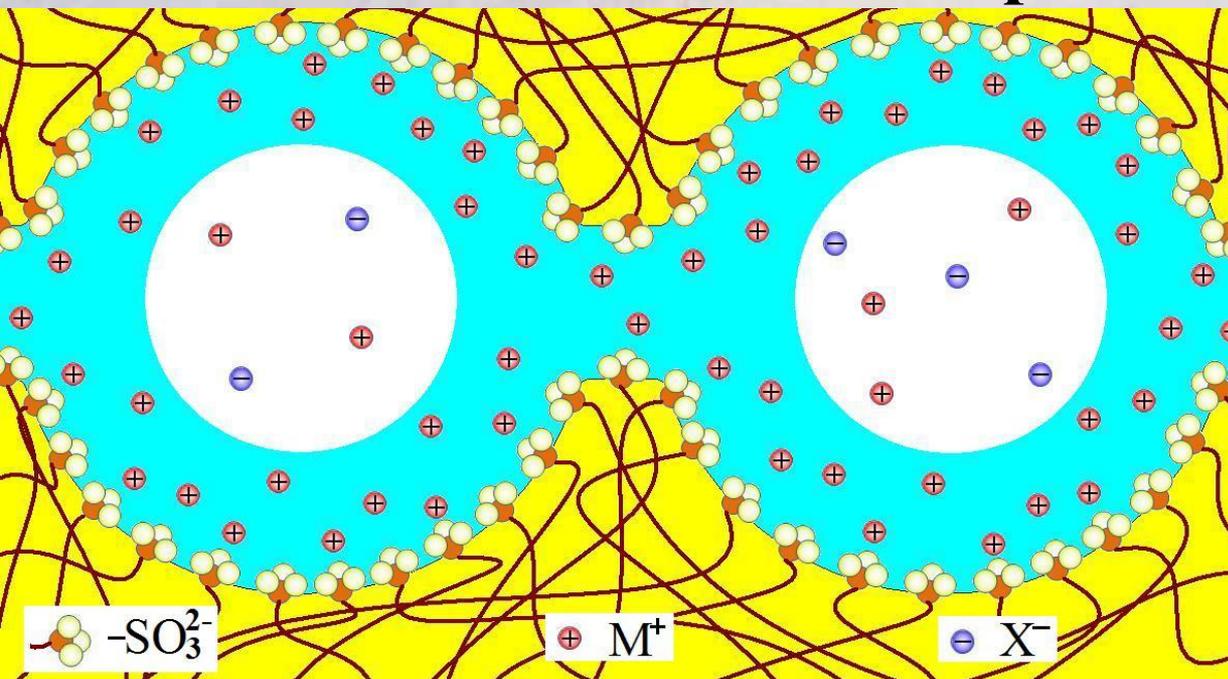
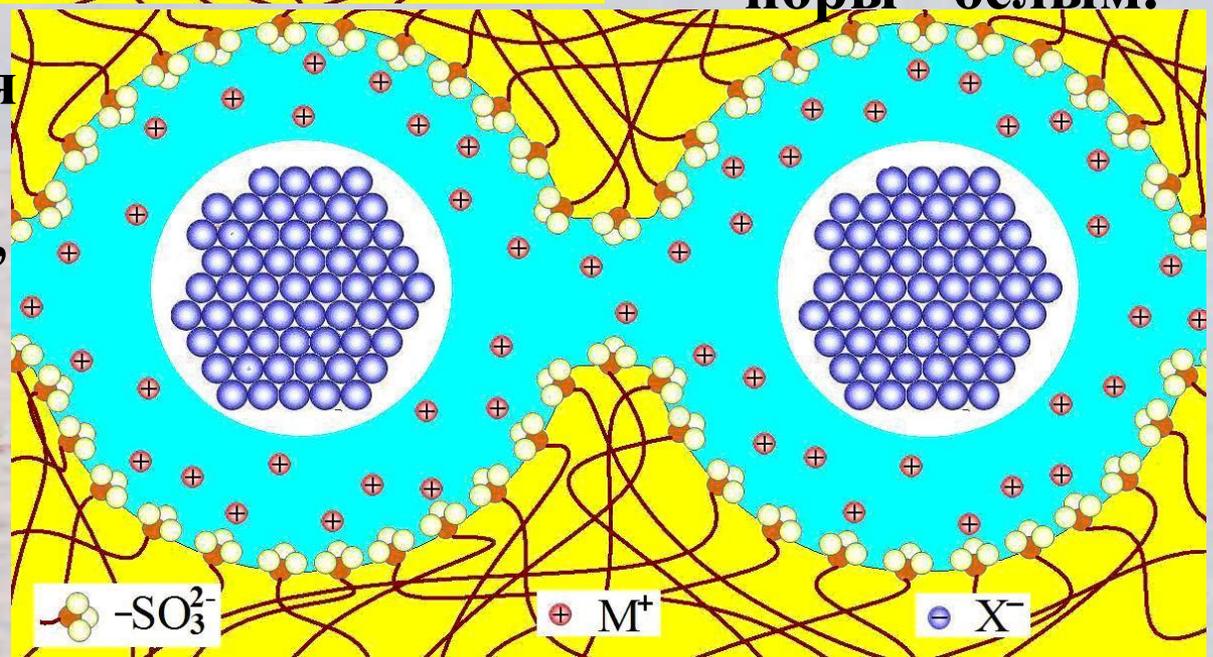
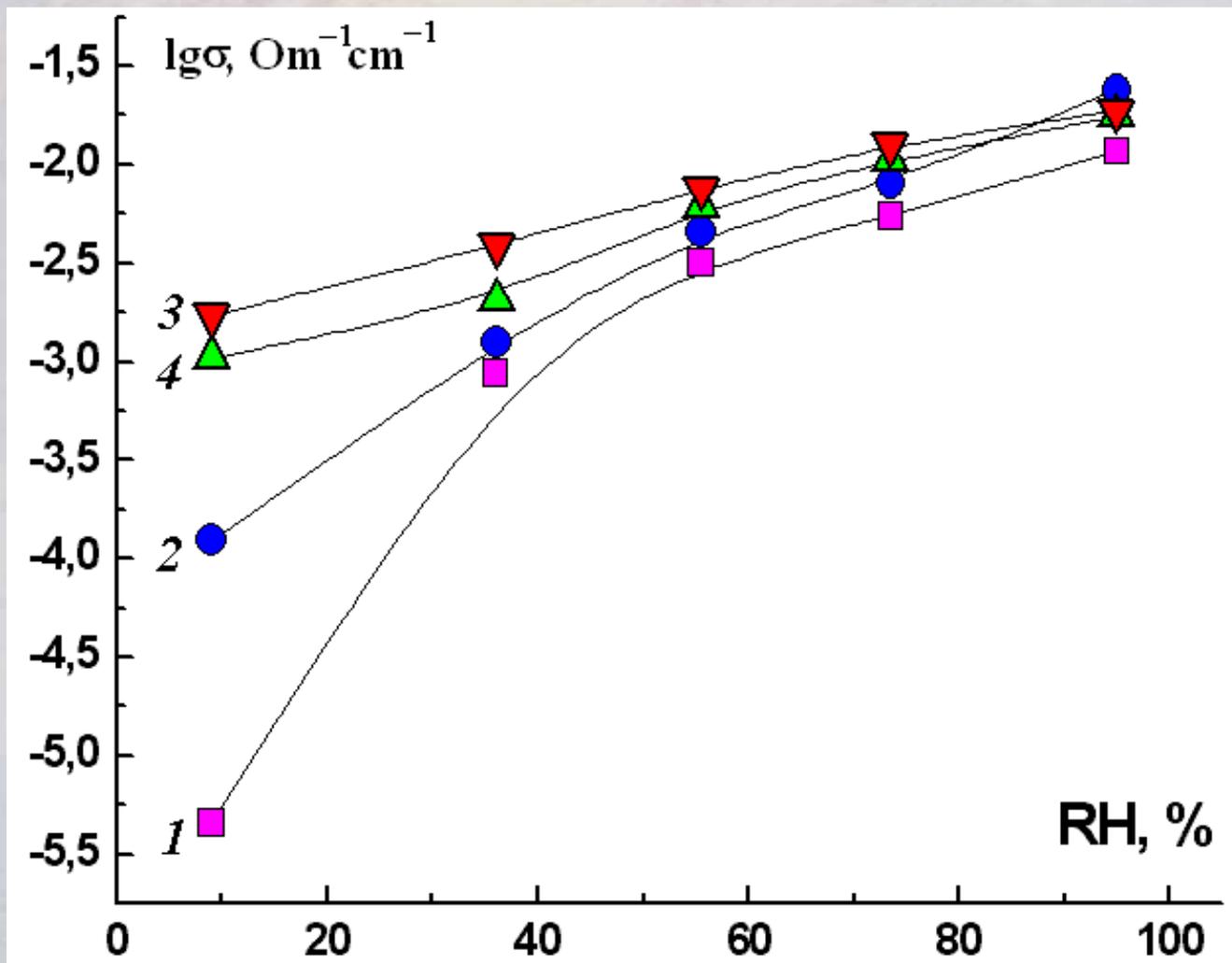


Схема распределения ионов в структуре мембран. Дебаевский слой вблизи стенок поры обозначен голубым цветом, а электронейтральный раствор в центре поры - белым.

Схема распределения ионов в структуре гибридных мембран, содержащих гидрофильные наночастицы.





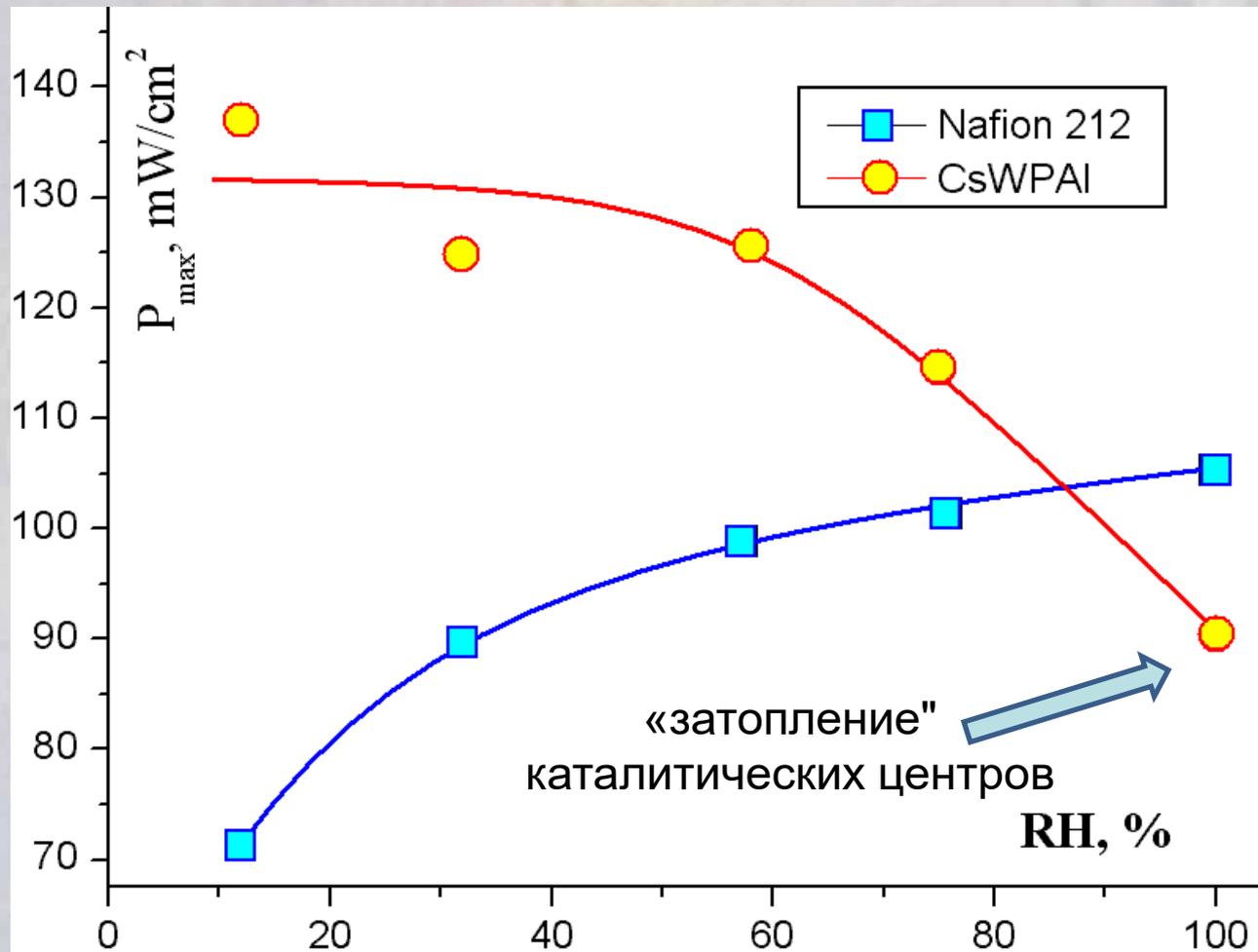
Зависимость ионной проводимости от влажности для мембран:

МФ-4СК (1); МФ-4СК+SiO₂(OH) (2);

МФ-4СК+SiO₂(OH)+H₃PW₁₂O₄₀ (3) и

МФ-4СК+SiO₂(OH)+Cs_xH_{3-x}PW₁₂O₄₀ (4).

Максимальная мощность ТЭ



ИОНХ РАН –
ИПФХ РАН

Зависимость максимальной мощности ТЭ с мембраной Nafion 212 и Nafion 212/1 wt.%SiO₂/1.9 wt.% Cs_xH_{3-x}PW₁₂O₄₀ от влажности газов

*Gerasimova E., Safronova E., Ukshe A., Dobrovolskii Yu., Yaroslavtsev A./
Chemical Engineering Journal, 2016, V.305, P.121-128*



**Система аккумулялирования
энергии на 10 кВт на основе
водородного цикла, ГК
№14.604.210122**

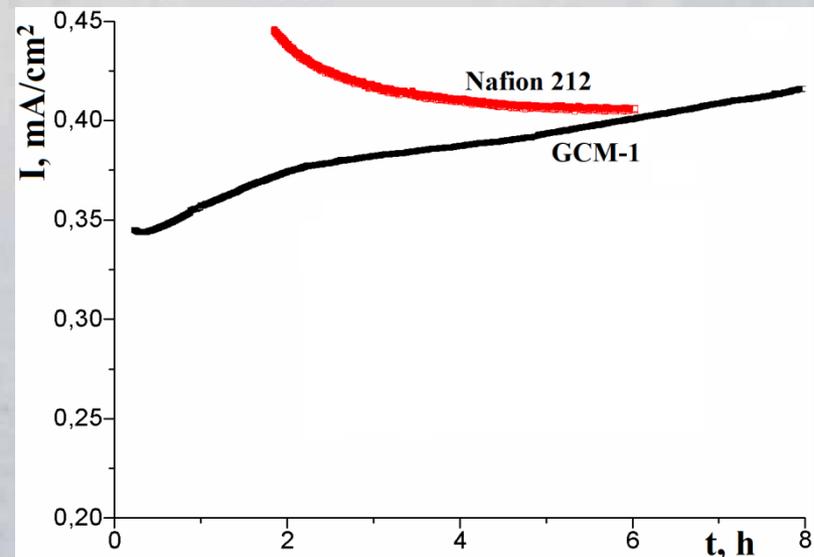
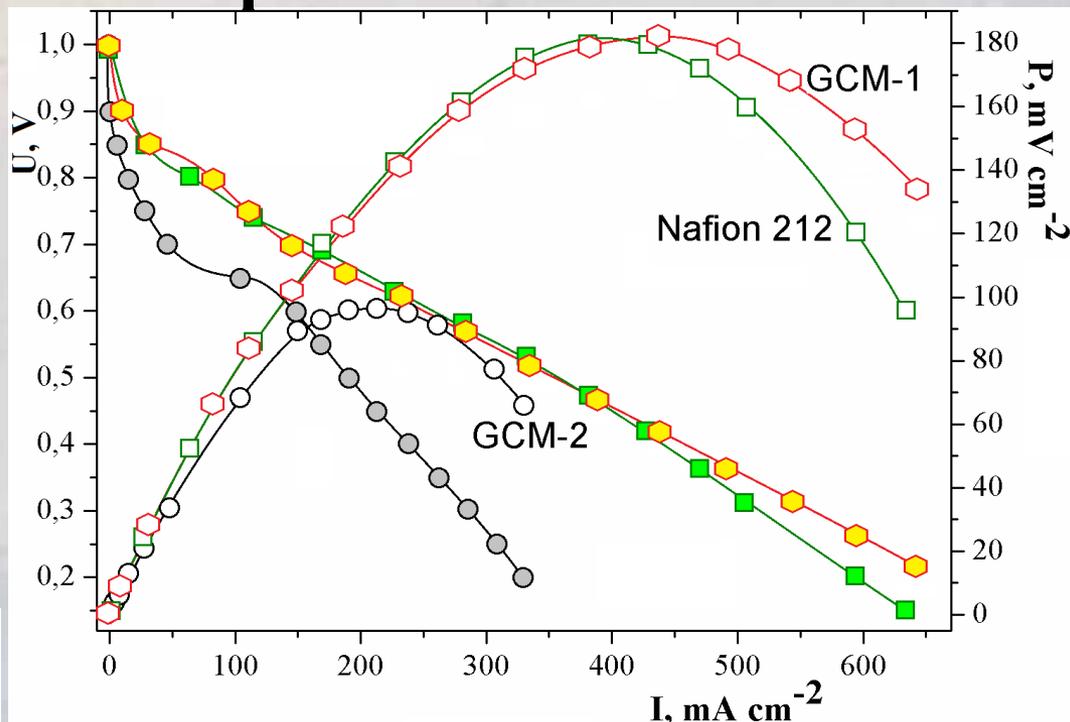
ИОНХ РАН-ИПХФ РАН

Привитые мембраны в ТЭ

Вольт-амперные характеристики и мощность мембранно-электродных блоков на основе привитых мембран и Нафийон 212.

**GCM-1 - прив.стирола - 112%,
сшивка - 2.5%**

**GCM-2 - привит.стирола - 47%,
сшивка - 10%.**



Membrane	IEC, meq/g	$\sigma(\text{H}^+)$, mS cm ⁻¹
GCM-I	2.9±0.1	21±1
GCM-II	1.91±0.06	3.5±0.2
Nafion 212	0.93±0.03	10.1±0.5

Изменение плотности тока в мембранных электродных блоках на основе GCM-1 и Nafion 212 при напряжении 400 мВ

Golubenko D.V., Gerasimova E.V., Yaroslavtsev A.B./International journal of hydrogen energy, 2021, doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.102

Благодарю за внимание

