

ISSN 1561-8331 (Print)
ISSN 2524-2342 (Online)
УДК 541.64
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-4-455-463>

Поступила в редакцию 11.06.2019
Received 11.06.2019

ХІМІЯ ВЫСОКАМАЛЕКУЛЯРНЫХ ЗЛУЧЭННЯЎ
POLYMER CHEMISTRY

**Д. Н. Давлюд, П. Д. Воробьев, Ю. В. Липай, Е. В. Воробьева,
С. В. Буча, А. Р. Черникова**

Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ И АДСОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА АНИОННЫХ
СОПОЛИМЕРОВ АКРИЛАМИДА В ВОДНО-СОЛЕВЫХ СРЕДАХ**

Аннотация. Методом капиллярной вискозиметрии изучены реологические свойства и концентрационные переходы анионных сополимеров акриламида в солевых растворах (хлорид калия). Определена область неперекрывающихся клубков между концентрацией кроссовера и концентрацией образования флуктуационной сетки зацеплений и показано, что с увеличением концентрации соли эта область практически исчезает, то есть изменение механизма массопереноса происходит вблизи концентрации кроссовера. Установлено, что при низких концентрациях хлорида калия увеличение содержания ионогенных групп в макромолекулах приводит к повышению эффективного объема и снижению концентрации кроссовера. Отмечено снижение адсорбционной емкости каолина при адсорбции полимеров из солевого раствора, при этом константа адсорбции значительно выше в присутствии соли, чем в воде.

Ключевые слова: анионный сополимер акриламида, солевой раствор, вязкость, макромолекула, эффективный объем, адсорбция

Для цитирования. Гидродинамические и адсорбционные свойства анионных сополимеров акриламида в водно-солевых средах / Д. Н. Давлюд [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2019. – Т. 55, № 4. – С. 455–463. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-4-455-463>

D. N. Davlyud, P. D. Vorobiev, Yu. V. Lipai, E. V. Vorobieva, S. V. Bucha, A. R. Chernikova

Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**HYDRODYNAMIC AND ADSORPTION PROPERTIES OF ANIONIC ACRYLAMIDE COPOLYMERS
IN WATER-SALT MEDIA**

Abstract. Rheological properties and concentration cross-overs of anionic acrylamide copolymers in saline solutions (potassium chloride) were investigated by using capillary viscometer method. Area of non-overlapping coils between the crossover concentration and the concentration of fluctuation mesh formation was determined; it was shown that with increase of salt concentration this area practically disappears, i.e. mass transfer mechanism changes near the crossover concentration. It was shown that at low concentrations of potassium chloride increasing the content of ionic groups of macromolecules leads to reduction in the crossover concentration and increase in the effective volume. It is found that the kaolin adsorption capacity decreases when polymers are adsorbed from saline solution, and the adsorption constant is significantly higher in the presence of salt than in water.

Keywords: anionic acrylamide copolymer, saline solution, viscosity, macromolecule, effective volume, adsorption

For citation. Davlyud D. N., Vorobiev P. D., Lipai Yu. V., Vorobieva E. V., Bucha S. V., Chernikova A. R. Hydrodynamic and adsorption properties of anionic acrylamide copolymers in water-salt media. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 455–463 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-4-455-463>

Введение. Влияние электролитов на гидродинамические и адсорбционные свойства полимеров хорошо изучены [1, 2] преимущественно для систем на основе водных растворов полиэлектролитов при введении в них низкомолекулярных солей. Вопросы растворения полимеров в солевых растворах практически не рассматриваются в литературе, но представляют не только научный, но и практический интерес в связи с использованием растворов полимеров в процессах обогащения

минеральных руд для флокуляции и фазового разделения солевых дисперсий. Как показали проведенные нами ранее исследования [3, 4], низкомолекулярные соли калия и натрия с одноименным анионом (в частности, хлориды) оказывают различное влияние на процесс растворения полимеров. Растворение полимеров в воде сопровождается уменьшением энтальпии системы за счет гидратации заряженных групп полимеров и увеличением энтропии системы вследствие разворачивания макромолекул в растворе. Катионы соли в солевых растворах проявляют «структуроразрушающие» или «структурирующие» свойства по отношению к молекулам воды и энергия гидратации существенно ниже, поскольку взаимодействие воды с макромолекулами полимера сопровождается изменением положения молекул воды, находящихся вблизи ионов [5, 6].

В связи с изменением конформации макромолекул полимера и состояния поверхности частиц в солевой среде (по сравнению с водной) меняется характер адсорбционного взаимодействия полимера с частицами и строение адсорбционных слоев. При обсуждении вопросов о влиянии солей на адсорбцию полимеров приводятся сведения об увеличении количества адсорбированного полимера по мере приближения к точке осаждения полимера из раствора [7, 8].

Наблюдаемое в ряде случаев уменьшение адсорбции полиэлектролитов с ростом ионной силы раствора, противоречащее эффекту высаливающего действия добавляемых в раствор электролитов, объясняется конкуренцией между процессами адсорбции и агрегации макромолекул, изменением состояния поверхности адсорбента вследствие экранирования зарядов поверхности катионами соли или началом коагуляции частиц и уменьшением общей площади поверхности адсорбента [9, 10]. Адсорбция полимеров из солевых растворов обсуждается в основном на качественном уровне, без количественной оценки параметров процесса, адсорбционных слоев, конформационного состояния макромолекул.

Настоящая работа посвящена исследованию гидродинамических свойств анионных сополимеров акриламида в солевых растворах и их адсорбции на поверхности глинистых частиц в солевых дисперсиях. Результаты таких исследований представляют интерес как для уточнения поведения макромолекул полиэлектролитов в солевом растворителе, так и в связи с практическим применением в растворенном виде в солевой среде в качестве флокулянтов.

Экспериментальная часть. В работе использовали анионные сополимеры акриламида с акриловой кислотой с молекулярной массой (ММ) $1,4 \cdot 10^7$ D, содержащие 10, 20 и 40 мол.% ионогенного компонента, соответственно обозначенные как AC₁₀, AC₂₀ и AC₄₀. Растворы полимеров готовили с использованием водного раствора хлорида калия (KCl) с концентрацией 0,04, 0,07 и 3,4 моль/л.

Солевую дисперсию глины готовили с использованием каолина марки 18 616 (Германия). Содержание частиц размером менее 1 мкм – 32 %, (1–2) мкм – 35 %, (2–3) мкм – 28 %, плотность 2,8 г/см³, удельная поверхность по низкотемпературной адсорбции азота – 15 м²/г. Измерения вязкости проводили в стеклянном вискозиметре Оствальда ($d = 1,5$ мм) при $T = 25 \pm 0,2$ °C. По экспериментальным данным рассчитывали относительную, удельную, приведенную вязкость, по концентрационной зависимости приведенной вязкости определяли характеристическую вязкость $[\eta]$, по формулам (1)–(3) находили эффективный объем ($V_{эфф}$), гидродинамический радиус (R_h) макромолекул [11] и константу Хаггинса (K_X), принимая допущение, что макромолекулы в растворе движутся независимо друг от друга.

$$V_{эфф} = \frac{0,74\eta_{уд}M}{(2,5 + \eta_{уд})CN_A}, \quad (1)$$

где $\eta_{уд}$ – удельная вязкость раствора; C – концентрация полимера, г/л; M – молекулярная масса; 2,5 – коэффициент, учитывающий взаимодействие жесткой сферической частицы со средой; N_A – число Авогадро, моль⁻¹.

$$R_h = \left(\frac{3[\eta]M}{10\pi N_A} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

$$\frac{\eta_{уд}}{C} = [\eta] + K_x [\eta]^2 C. \quad (3)$$

По данным вискозиметрии определены концентрации кроссовера C^* , которая обратно пропорциональна характеристической вязкости, и образования флуктуационной сетки зацеплений C_e по точке излома на графике зависимости логарифма удельной вязкости от логарифма концентрации полимера в растворе.

Адсорбцию изучали на каолине из водных и солевых растворов (хлорид калия с концентрацией 0,07 М) следующим образом: 1,0 г каолина приводили в контакт со 100 мл раствора, содержащего полимер. Смесь интенсивно перемешивали в течение 4 ч и оставляли на 12 ч. Затем суспензию центрифугировали при 5000 об/мин в течение 30 мин. В растворе определяли концентрацию оставшегося полимера по содержанию органического углерода на анализаторе ShimadzuТОС-5050А. Диапазон измерения анализатора 0,05–4000 мг/л, погрешность измерения менее 0,01 мг/л. По линеаризованным изотермам адсорбции определены адсорбционная емкость адсорбента E и константа адсорбции K :

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{E} + \frac{1}{EK} \cdot \frac{1}{C}, \quad (4)$$

где g – количество адсорбированного полимера, моль/г каолина; C – концентрация полимера, моль/л.

Рассчитанные по формуле (5) параметры уравнения Ленгмюра использованы для построения теоретических изотерм адсорбции:

$$g = \frac{KEC}{1 + KC}. \quad (5)$$

Результаты исследований и их обсуждение. Для растворов полимеров характерно существование трех концентрационных режимов: разбавленных растворов, в которых среднее расстояние между макромолекулами существенно превышает размеры полимерного клубка; полуразбавленных, когда клубки перекрываются и взаимодействуют друг с другом, образуя флуктуационную сетку зацеплений; и концентрированных, в которых макромолекулы формируют сетчатую структуру [12]. При изменении концентрационного режима раствора меняются динамические свойства макромолекул. Как видно из рис. 1, для полимеров, полученных растворением

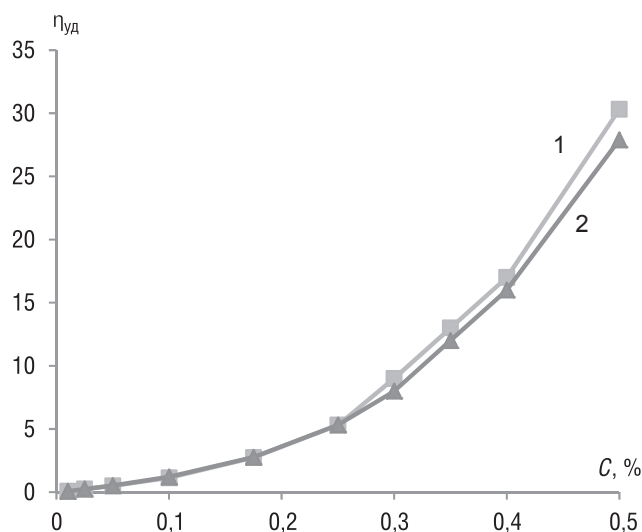


Рис. 1. Концентрационная зависимость удельной вязкости растворов PC_{20} (1), PC_{40} (2) (KCl, 3,4 моль/л)

Fig. 1. Concentration dependence of specific viscosity of PC_{20} (1), PC_{40} (2) solutions (KCl, 3.4 mol/L)

в солевом растворе хлорида калия с концентрацией 3,4 моль/л, кривая концентрационной зависимости имеет два участка, соответствующих области разбавленных и полуразбавленных растворов. В области разбавленных растворов молекулы движутся трансляционно, происходит перемещение макромолекулы как независимой единицы. Используя данные, полученные для линейного диапазона зависимости удельной вязкости от концентрации (рис. 1), рассчитали константу Хаггинса (K_X) и гидродинамический радиус макромолекул (R_h).

С увеличением концентрации макромолекул в растворе происходит переход от режима разбавленных растворов к режиму полуразбавленных, который характеризуется концентрацией кроссовера C^* [13]. Для растворов полиэлектролитов существует область неперекрывающихся клубков между C^* и концентрацией образования флуктуационной сетки зацеплений C_e [14].

Определенные вискозиметрическим методом концентрации C^* и C_e солевых растворов AC_{20} и AC_{40} , а также рассчитанные значения K_X и R_h в растворе приведены в табл. 1, из которой видно, что значения C^* растворов (0,04 и 0,07 моль/л) в 1,7 и 1,5 раза ниже для AC_{20} , в 4,7 и 2,8 раза ниже для AC_{40} по сравнению с C^* растворов (3,4 моль/л). В солевых растворах (0,04 и 0,07 моль/л) молекулы AC_{40} имеют более высокие показатели R_h и образуют сетку зацеплений при более низкой концентрации, чем AC_{20} .

Как видно из табл. 1, в растворах полиэлектролитов существует четко выраженная область полуразбавленных растворов без зацеплений: $C^* < C < C_e$. Для солевых растворов (0,04 и 0,07 моль/л) AC_{20} она $0,07 < C < 0,21$ и $0,08 < C < 0,19$ для AC_{40} $0,03 < C < 0,26$ и $0,05 < C < 0,21$. При высокой концентрации ионов K^+ (3,4 моль/л) происходит экранирование анионных групп, поведение макромолекул полиэлектролита в растворе становится подобным поведению макромолекул неионогенного полимера, механизм массопереноса в таких растворах изменяется практически в точке кроссовера и область неперекрывающихся клубков сокращается.

Таблица 1. Характеристики конформационных переходов солевых растворов сополимеров акриламида

Table 1. Characteristics of conformational cross-overs of acrylamide copolymers in salt solutions

Растворитель	Гидродинамические характеристики водных и солевых растворов			
	C^* , %	C_e , %	K_X	R_h , нм
AC_{20}				
KCl (0,04 моль/л)	0,07	0,21	0,56	146,96
KCl (0,07 моль/л)	0,08	0,19	0,61	140,13
KCl (3,41 моль/л)	0,12	0,13	0,75	121,51
AC_{40}				
KCl (0,04 моль/л)	0,03	0,26	0,50	186,97
KCl (0,07 моль/л)	0,05	0,21	0,76	164,41
KCl (3,41 моль/л)	0,14	0,17	1,06	115,25

Константа Хаггинса характеризует взаимодействие макромолекул полимера с растворителем и чем она ниже, тем лучшим в термодинамическом плане является растворитель для данного вещества [15]. Из табл. 1 видно, что для AC_{40} лучшим растворителем является водный раствор хлорида калия с концентрацией 0,04 моль/л: при таких условиях макромолекулы более развернуты и имеют наибольший гидродинамический радиус (186,97 нм). Наиболее интенсивное взаимодействие макромолекул AC_{20} с растворителем наблюдается в 0,04 моль/л KCl ($K_X = 0,56$). При увеличении концентрации соли качество растворителя ухудшается, гидродинамический радиус снижается в 1,2 и 1,7 раза по отношению к максимальному соответственно для AC_{20} и AC_{40} .

Основной причиной различного поведения полиэлектролитов в водном и солевом растворах является присутствие низкомолекулярного электролита, концентрация которого сравнима (0,04 и 0,07 моль/л) или превышает (3,4 моль/л) концентрацию ионизирующихся мономерных фрагментов полимеров (0,0015–0,07 осн-моль/л). В этих условиях заряд анионных групп компенси-

рован ионами K^+ , что ограничивает взаимодействие ионогенных групп и уменьшает их отталкивание. В связи с этим в солевой среде больше вероятность диполь-дипольных взаимодействий функциональных акриламидных групп [16].

В процессе растворения полимера в солевом растворе формируются области двух типов: одна область обогащена ионами соли, в другой – содержатся преимущественно макромолекулы полимера, окруженные диполями воды. Между такими областями должно возникать осмотическое давление, приводящее к выравниванию концентрации растворенных веществ в растворе. В результате ионы соли попадают в гидратные оболочки около макромолекул. При контакте полимера с растворителем более подвижные малые молекулы растворителя проникают в фазу полимера, что приводит к значительному увеличению эффективного объема макромолекул. При низких концентрациях солевого фона (0,04 моль/л) и концентрации полимера в растворе 0,01 % макромолекулы развернуты и эффективный объем макромолекул ($V_{эфф}$), включающий иммобилизованный растворитель, составляет для AC_{40} $19,34 \cdot 10^{-18}$ и для AC_{20} $10,84 \cdot 10^{-18}$ $дм^3$. С увеличением концентрации полимера количество воды, приходящееся на одну макромолекулу, уменьшается, плотность полимера в клубке увеличивается, что приводит к уменьшению $V_{эфф}$.

В растворах хлорида калия с концентрацией 0,07 моль/л эффективный объем макромолекул AC_{40} выше, чем AC_{20} вследствие более развернутого состояния макромолекул AC_{40} . В связи с тем, что содержание анионных групп в макромолекулах AC_{40} выше, чем в AC_{20} , вероятно, присутствие соли с относительно низкой концентрацией 0,07 моль/л не приводит к полному подавлению полиэлектролитного эффекта. В таких растворах макромолекулы более развернуты за счет отталкивания одноименно заряженных групп. Для AC_{40} при увеличении концентрации хлорида калия до 3,4 моль/л происходит снижение эффективного объема в среднем в 2,5 раза по сравнению с растворами 0,07 моль/л KCl, что свидетельствует об уменьшении влияния полиэлектролитного эффекта.

В солевых растворах (KCl 3,4 моль/л) с концентрацией низкомолекулярного электролита более чем в 40 раз превышающей концентрацию ионизирующихся мономерных фрагментов, как видно из табл. 2, при минимальной концентрации полимера эффективный объем макромолекул AC_{40} , AC_{20} уменьшается по сравнению с растворами (0,04 моль/л) в 2,9 и 1,7 раза соответственно. По-видимому, в условиях высокой концентрации соли заряд анионных групп макромолекул полностью компенсирован ионами K^+ , что ограничивает взаимодействие ионогенных групп и уменьшает их отталкивание, поэтому макромолекулы находятся в глобулизированном, сжатом состоянии. При увеличении концентрации полимера в растворе количество полимерных звеньев в клубке увеличивается, а количество воды, приходящееся на одну макромолекулу, снижается, что приводит к уменьшению разницы между эффективными объемами макромолекул в растворах с концентрацией хлорида калия 0,04 и 3,4 моль/л.

Таблица 2. Эффективный объем макромолекул полиэлектролитов в солевых растворах

Table 2. Effective volume of polyelectrolytes macromolecules in salt solutions

Концентрация С, %	$V_{эфф}$, $дм^3 \cdot 10^{18}$		
	KCl, 0,04 моль/л	KCl, 0,07 моль/л	KCl, 3,4 моль/л
ПС ₂₀			
0,015	10,84	9,22	6,55
0,2	9,79	8,56	6,48
0,5	9,40	8,13	5,68
0,07	9,00	7,75	5,49
0,1	–	–	5,37
ПС ₄₀			
0,015	19,32	14,91	6,82
0,02	18,04	14,12	6,24
0,05	–	13,84	5,93
0,07	–	–	5,46
0,1	–	–	5,31

В работе [16] в результате исследования адсорбционных свойств анионных сополимеров акриламида показано, что изотермы адсорбции полиакриламида и ионогенных сополимеров акриламида из солевых растворов (KCl 0,07 моль/л) на каолине состоят из участка быстрого роста адсорбции, участка, близкого к линейному с относительно медленным увеличением адсорбции, и плато. По методике, использованной в [16], по линеаризованным изотермам адсорбции определены и приведены в табл. 3 адсорбционная емкость адсорбента и константа адсорбции для AC₁₀ и AC₂₀, адсорбированных из водных и солевых (KCl 0,07 моль/л) растворов.

Из данных по адсорбции, приведенных в табл. 3, можно предположить, что основным типом взаимодействия молекул полимеров с поверхностью глинистых частиц и между собой является диполь-дипольное. Одна из основных причин – наличие солевого фона (KCl, 0,07 моль/л), концентрация которого на несколько порядков выше концентрации ионизирующихся мономерных фрагментов полимеров $((0,4-1,4) \times 10^{-6}$ моль/л). В этих условиях заряд анионных групп AC в основном компенсирован ионами K⁺. Достаточно высокая концентрация низкомолекулярного электролита приводит также к блокировке ионообменных центров на поверхности каолина, сжатию диффузионного слоя у поверхности и уменьшению его заряда. Таким образом, прямое взаимодействие заряженных групп анионных сополимеров блокируется электролитом, однако диполь-дипольные взаимодействия между ними возможны, что является причиной высокой адсорбции AC на поверхности каолина.

Таблица 3. Параметры адсорбционного уравнения и максимальная адсорбция сополимеров акриламида из раствора хлорида калия

Table 3. Parameters of the adsorption equation and maximum adsorption of acrylamide copolymers from potassium chloride solution

Полимер	Параметры уравнения Ленгмюра		Максимальная адсорбция g_{\max} , моль/г
	емкость адсорбента E , моль/г	константа адсорбции, K	
Адсорбция в водной дисперсии			
AC ₁₀	$3,4 \times 10^{-6}$	$0,1 \times 10^6$	$3,5 \times 10^{-6}$
AC ₂₀	$3,5 \times 10^{-6}$	$0,1 \times 10^6$	$3,3 \times 10^{-6}$
Адсорбция в солевой дисперсии			
AC ₁₀	$2,1 \times 10^{-6}$	$0,2 \times 10^6$	$3,3 \times 10^{-6}$
AC ₂₀	$2,0 \times 10^{-6}$	$0,07 \times 10^6$	$2,5 \times 10^{-6}$

Учитывая пластинчатую форму частиц каолина и геометрический размер поверхности частиц каолина [17], рассчитанная удельная поверхность каолина составляет около 2 м²/г, что значительно меньше величины, определенной по адсорбции азота (15 м²/г). Расчет показал, что в исследуемой системе доля покрытой полимером поверхности глинистых частиц значительно ниже 10 %. Это обусловлено тем, что макромолекулы не могут адсорбироваться на поверхности в полностью развернутом состоянии и прямое взаимодействие каждого мономерного звена с поверхностью частиц невозможно. Молекулы полимеров адсорбируются на очень небольшом количестве активных адсорбционных центров, расположенных, вероятно, на изломах пластинок частиц каолина.

На изотермах адсорбции полимеров из воды, в отличие от адсорбции из солевых растворов, отсутствует участок линейного увеличения адсорбции, переходящий в плато [16]. Зависимости, построенные с использованием рассчитанных параметров адсорбционного уравнения Ленгмюра, практически совпадают с экспериментальными изотермами адсорбции.

Энергия адсорбции, характеризуемая константой уравнения K , при адсорбции в водной дисперсии каолина, как следует из табл. 3, практически одинакова для AC₁₀ и AC₂₀ и, по-видимому, сравнима по величине с энергией взаимодействия полимерных сегментов между собой. В связи с этим адсорбция полимера на поверхности каолина и процесс взаимодействия полимеров между собой в адсорбционном слое одинаково возможны. Из табл. 3 видно, что адсорбционная емкость каолина при адсорбции полимеров из воды выше, чем из солевого

раствора, тогда как константа адсорбции в воде значительно ниже, чем в присутствии соли, что, возможно, вызвано бóльшим числом контактов клубка с поверхностью, чем развернутой молекулы.

По результатам исследования адсорбционных свойств полиэлектролитов можно предположить, что адсорбционные полимерные слои на поверхности частиц глины в водных дисперсиях формируются по иному механизму, чем в солевых. Это свидетельствует о том, что все аномалии изотерм адсорбции из растворов хлорида калия связаны с присутствием солевого фона, влияющего прежде всего на заряд поверхности каолина, форму и заряд макромолекул полимера.

Заключение. Таким образом, существенным фактором, определяющим гидродинамические и адсорбционные свойства полиэлектролитов в водно-солевых растворах и дисперсиях, является содержание ионогенных групп в макромолекулах и состав растворителя. В водном растворе молекулы полиэлектролита более развернуты, чем в солевом, и образуют сетку зацеплений при более низкой концентрации. В солевых растворах при низкой концентрации электролита увеличение содержания ионогенных групп сополимера в 2 раза приводит к повышению концентрации кроссовера C^* в среднем в 2 раза, эффективный объем макромолекул снижается при увеличении концентрации хлорида калия и полимера. Сопоставление параметров адсорбционного уравнения для адсорбции анионных сополимеров из водных и солевых растворов показывает, что адсорбционная емкость каолина при адсорбции сополимеров из воды выше, а константа адсорбции значительно ниже, чем в присутствии соли. Полученные результаты представляют интерес в связи с практическим применением акриламидных полимеров в солевой среде в качестве флокулянтов. Для эффективной флокуляции солевых дисперсий глины одним из определяющих факторов является доступность функциональных групп, которые отвечают за адсорбцию полимера на поверхности глинистых частиц. Оптимальное для флокуляции конформационное состояние макромолекул полимеров соответствует концентрации полимера вблизи точки кроссовера.

Список использованных источников

1. Танганов, Б. Б. Взаимодействия в растворах электролитов: моделирование сольватационных процессов, равновесий в растворах полиэлектролитов и математическое прогнозирование свойств химических систем / Б. Б. Танганов. – Пенза: Академия Естествознания, 2009. – 196 с.
2. Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах / К. Холмберг [и др.]. – М.: Химия, 2007. – 528 с.
3. Особенности поведения (со)полимеров акриламида в солевых растворах / Д. Н. Давлюд [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 4. – С. 69–76.
4. Растворение анионных (со)полимеров акриламида в водно-солевых средах / Д. Н. Давлюд [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хімі. навук. – 2018. – Т. 54, № 3. – С. 329–337.
5. Бутырская, Е. В. Сравнительный анализ гидратных оболочек катионов лития и калия / Е. В. Бутырская, В. А. Шапошник, А. М. Бутырский // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Химия. Биология. Фармация. – 2004. – № 2. – С. 25–27.
6. Гордон, Дж. Органическая химия растворов электролитов / Дж. Гордон. – М.: Мир, 1979. – 712 с.
7. Khan, M. Adsorption of polyampholites on the charged surfaces / M. Khan, T. Akesson, B. Jonsson // *Macromolecules*. – 2001. – Vol. 34, № 12. – P. 4216–4221. <https://doi.org/10.1021/ma001437u>
8. Wagberg, L. Adsorption of bilayers and multilayers of cationic and anionic co-polymers of acrylamide on silicon oxide / L. Wagberg, G. Pettersson, S. Notley // *J. Colloid and Interface Science*. – 2004. – Vol. 274. – P. 480–488. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2003.11.054>
9. Баран, А. А. Полимерсодержащие дисперсные системы / А. А. Баран. – Киев: Наукова думка, 1986. – 204 с.
10. Комаров, В. С. Адсорбенты: получение, структура, свойства / В. С. Комаров, А. И. Ратько. – Минск: Беларус. навука, 2009. – 256 с.
11. The hydrodynamic radii of macromolecules and their effects on red blood cell aggregation / J. K. Armstrong [et al.] // *Biophysical Journal*. – 2004. – Vol. 87. – P. 4259–4270. <https://doi.org/10.1529/biophysj.104.047746>
12. Гросберг, А. Ю. Физика в мире полимеров / А. Ю. Гросберг, А. Р. Хохлов. – М.: Наука, 1989. – 208 с.
13. Де Жен, П. Идеи скейлинга в физике полимеров / П. де Жен. – М.: Мир, 1982. – 368 с.
14. Литманович, Е. А. Влияние концентрационного режима раствора полиэлектролита на состав и фазовое состояние продуктов реакции полидиметилдиаллиламмоний хлорида с додецилсульфатомнатрия: дис. ... канд. хим. наук : 02.00.06 / Е. А. Литманович. – М., 1999. – 102 л.

15. Шуляк, И. В. Реологические свойства водных растворов полиэтиленгликолей различной молекулярной массы / И. В. Шуляк, Е. И. Грушова, А. М. Семенченко // Журн. физ. химии. – 2011. – Т. 85, № 3. – С. 485–488.
16. Воробьева, Е. В. Адсорбция полиакриламида и его ионогенных сополимеров на каолине из солевых растворов / Е. В. Воробьева, В. С. Солдатов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2012. – Т. 56, № 1. – С. 93–98.
17. Звягин, Б. Б. Электронная и структурная кристаллография глинистых минералов / Б. Б. Звягин. – М.: Наука, 1964. – 282 с.

References

1. Tanganov B. B. *Interactions in electrolyte solutions: modeling solvation processes, equilibria in polyelectrolyte solutions and mathematical prediction of the properties of chemical systems*. Penza, Academy of Natural Sciences, 2009. 196 p. (in Russian).
2. Holmberg K., Jansson B., Kronberg B., Lindman B. *Surfactants and polymers in aqueous solutions*. John Wiley & Sons, Ltd., 2003. 545 p. <https://doi.org/10.1002/0470856424>
3. Davlyud D. N., Vorobieva E. V., Layeuskaya E. V., Krutko N. P., Vorobiev P. D., Cherednichenko D. V. Rheological properties and concentration cross-overs of polyacrylamide and anionic (co)polymers of acrylamide in aqueous-salt solutions. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2017, vol. 61, no. 4, pp. 69–76 (in Russian)
4. Davlyud D. N., Vorobiev P. D., Matrunchik Yu. V., Vorobieva E. V., Krutko N. P. Acrylamide (co)polymers dissolution in water-saline solutions. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2017, vol. 54, no 3, pp. 329–337 (in Russian).
5. Butyrskaya E. V., Shaposhnik A. M. Comparative analysis of hydration shells of lithium and potassium cations. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya = Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*, 2004, no 2, pp. 25–27 (in Russian).
6. Gordon J. *The organic chemistry of electrolyte solutions*. New York: Wiley, 1975. 554 p.
7. Khan M., Akesson T., Jonsson B. Adsorption of polyampholits on the charged surfaces. *Macromolecules*, 2001, vol. 34, no 12, pp. 4216–4221. <https://doi.org/10.1021/ma001437u>
8. Wagberg, L., Pettersson G., Notley S. Adsorption of bilayers and multilayers of cationic and anionic co-polymers of acrylamide on silicon oxide. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, vol. 274, no. 2, pp. 480–488. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2003.11.054>
9. Baran A. A. *Polymer-containing disperse systems*. Kiev, Naukova dumka Publ., 1986. 204 p. (in Russian).
10. Komarov V. S., Ratko A. I. *Adsorbents: preparation, structure, properties*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2009. 256 p. (in Russian)
11. Armstrong J. K., Wenby R. B., Meiselman H. J., Fisher T. C. The hydrodynamic radii of macromolecules and their effects on red blood cell aggregation. *Biophysical Journal*, 2004, vol. 87, no. 6, pp. 4259–4270. <https://doi.org/10.1529/biophysj.104.047746>
12. Grosberg A. Yu., Hohllov A. R. *Physics in the world of polymers*. Moscow, Nauka Publ., 1989. 208 p. (in Russian).
13. De Gennes P. *Scaling concepts in polymer physics*. Cornell University Press, 1979. 324 p.
14. Litmanovich E. A. *The impact of the concentration mode of polyelectrolyte solution on the composition and phase state of the reaction products of polydimethylammonium chloride with sodium dodecylsulfate*. Moscow, 1999. 102 p. (in Russian).
15. Shulyak I. V., Grushova E. I., Semenchenko A. M. Rheological properties of aqueous solutions of polyethylene glycols with various molecular weights. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2011, vol. 85, no 3, pp. 419–422. <https://doi.org/10.1134/s0036024411030265>
16. Vorobieva E. V., Soldatov V. S. Adsorption of polyacrylamide and its ionogen copolymers on kaolin from salt solutions. *Doklady Natsiyonalnay akademii navuk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2012, vol. 56, no 1, pp. 93–98 (in Russian).
17. Zvyagin B. B. *Electronic and structural crystallography of clay minerals*. Moscow, Nauka Publ., 1964. 282 p. (in Russian).

Информация об авторах

Давлюд Дарья Николаевна – науч. сотрудник, Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: davlud.d@tut.by

Воробьев Павел Дмитриевич – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник, Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pdvc@tut.by

Information about the authors

Daria N. Davlyud – Researcher, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: davlud.d@tut.by

Pavel D. Vorobiev – Ph. D. (Chemistry), Leading Researcher, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pdvc@tut.by

Липай Юлія Владимировна – канд. хім. навук, ст. науч. супрацоўнік, Інстытут агульнай і неарганічнай хіміі, Нацыянальная акадэмія навук Беларусі (ул. Сурганова 9/1, 220072, Мінск, Рэспубліка Беларусь). E-mail: yuliya.M@tut.by

Вороб'ёва Елена Викторовна – д-р хім. навук, доцэнт, зав. лаб. полімерсодержащих дисперсных систем, Інстытут агульнай і неарганічнай хіміі, Нацыянальная акадэмія навук Беларусі (ул. Сурганова 9/1, 220072, Мінск, Рэспубліка Беларусь). E-mail: evorobieva@igic.bas-net.by

Буча Светлана Васильевна – мл. науч. супрацоўнік, Інстытут агульнай і неарганічнай хіміі, Нацыянальная акадэмія навук Беларусі (ул. Сурганова 9/1, 220072, Мінск, Рэспубліка Беларусь). E-mail: bucha1003@gmail.com

Черникова Анастасия Руслановна – мл. науч. супрацоўнік, Інстытут агульнай і неарганічнай хіміі, Нацыянальная акадэмія навук Беларусі (ул. Сурганова 9/1, 220072, Мінск, Рэспубліка Беларусь). E-mail: chernar@inbox.ru

Yuliya V. Lipai – Ph. D. (Chemistry), Senior Researcher, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yuliya.M@tut.by

Elena V. Vorobieva – D. Sc. (Chemistry), Associate Professor, Head of the Laboratory of Polymer-Containing Disperse Systems, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: evorobieva@igic.bas-net.by

Svetlana V. Bucha – Junior Researcher, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bucha1003@gmail.com

Anastasiya R. Chernikova – Researcher, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: chernar@inbox.ru