

УДК 577.1:543.422.27

## ПРОЦЕССЫ САМООРГАНИЗАЦИИ В НИЗКО КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ВОДНЫХ РАСТВОРАХ НА ОСНОВЕ L-ЦИСТЕИНА, АЦЕТАТА СЕРЕБРА И ХЛОРИДА НАТРИЯ

Д. В. Аверкин, С. Д. Хижняк, П. М. Пахомов

Тверской государственный университет  
Кафедра физической химии

Проведено комплексное исследование механизма самоорганизации в низкоконцентрированных водных растворах, содержащих L-цистеин, ацетат серебра и хлорид натрия, с помощью методов вискозиметрии, кондуктометрии, рН-метрии, измерений дзета-потенциала и УФ спектроскопии. На основе ранее полученных данных и настоящих исследований показано, что процесс самоорганизации сопровождается образованием и укрупнением кластеров из олигомерных цепочек меркаптида серебра с последующим их связыванием в пространственную сетку благодаря электрокинетическим взаимодействиям ионов электролита на поверхности кластеров.

**Ключевые слова:** ацетат серебра, L-цистеин, цистеин-серебряный раствор, самоорганизация, хлорид натрия, гидрогель.

DOI 10.26456/vtchem2019.2.5

Некоторые гидрогели супрамолекулярных полимеров вызывают научный интерес в биомедицинской химии благодаря как возможностям реализации системы «гость-хозяин» для доставки различных биоактивных соединений, таких как антибиотики и противоопухолевые препараты в определенные участки организма [1,2], так и благодаря биологической активности соединений, их образующих [3]. Помимо практического интереса, в низкоконцентрированных супрамолекулярных системах можно легче и детальней исследовать процессы самоорганизации [4]. Например, в низкоконцентрированных водных растворах на основе L-цистеина и ионов серебра (цистеин-серебряный раствор – ЦСР) могут формироваться биосовместимые физические гели при добавлении некоторых электролитов [5]. Характерной особенностью ЦСР является способность к гелеобразованию при низком содержании дисперсной фазы, тиксотропное поведение и наличие в системе биоактивных веществ, таких как серебро и аминокислота L-цистеин. Тип электролита определяет не только прочностные характеристики геля, но и его стабильность во времени. В работах [4-7] авторами детально исследованы процессы самоорганизации и гелеобразования в ЦСР, приготовленных на основе

L-цистеина и нитрата серебра, также авторами была описана структура этих систем. В пространстве фрагменты пространственной сетки гидрогелей на основе ЦСР построены из пересекающихся цепочек кластеров [4], которые, в свою очередь, образуются из молекул меркаптида серебра (МС). В водном растворе на основе L-цистеина и ацетата серебра (ЦСРац) обнаружен факт гелеобразования и проведено исследование процессов самоорганизации при добавлении различных инициаторов: солей сульфатов и хлоридов различных металлов [9], установлены основные стадии процесса самоорганизации, однако было отмечено, что системы с хлорид-анионом требуют дальнейшего подробного исследования механизма гелеобразования.

Данная работа посвящена исследованию механизма гелеобразования в ЦСРац под воздействием электролита (NaCl) с помощью различных физико-химических методов.

Для приготовления смесей на основе L-цистеина и ацетата серебра  $\text{CH}_3\text{COOAg}$  ( $\text{AgAc}$ ) использовали водные растворы исходных компонентов с концентрацией 0,01 М. Для получения 2 мл исследуемой смеси к 0.60 мл раствора L-цистеина приливали 0.65 мл воды, а затем 0.75 мл раствора  $\text{AgAc}$ . Отношение молярных концентраций ионов серебра и L-цистеина в данном случае равно 1.25. После энергичного перемешивания растворов исходных компонентов получали слегка мутный раствор, который при стоянии в защищенном от света месте при комнатной температуре через 4-6 ч становился прозрачным, приобретая слегка желтое окрашивание. Этот прозрачный раствор ЦСРац является прекурсором гидрогеля.

Гидрогели получали путем добавления в раствор ЦСРац водного раствора NaCl с концентрацией 0.02 М. Смесь перемешивали и оставляли в защищенном от света месте при комнатной температуре.

Для приготовления разбавленных систем, необходимых в методах измерений дзета-потенциала, на стадии подготовки прекурсора ЦСРац производилось увеличение объема добавляемой воды с сохранением молярного отношения концентраций ионов серебра и L-цистеина. Дальнейшие шаги аналогичны приготовлению неразбавленного ЦСРац. Добавляемые растворы электролитов также разбавлялись дистиллированной водой в том же соотношении, что и исследуемый раствор прекурсора.

Реологические исследования проводили на вибрационном лепестковом вискозиметре «SV-10» фирмы A&D Company. Вибрация двух тонких сенсорных пластин производилась с частотой 30 Гц и постоянной амплитудой ~1 мм. Температура исследуемых образцов составляла 22-23°C. Все образцы готовились и хранились в специальных кюветах объемом 10 мл, которые крепились к сенсорному устройству.

Измерения величины рН проводились на рН-метре «Seven Multi S70» («Mettler Toledo»), регистрация данных производилась в условиях постоянного объема исследуемых систем (10мл) во временных промежутках  $t_0$  (момент добавления электролита) и  $t$  спустя 30 мин нахождения системы в покое; перед регистрацией данных в момент  $t$  образцы перемешивались с целью разрушения пространственных образований. Во время эксперимента система термостатировалась при температуре  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ .

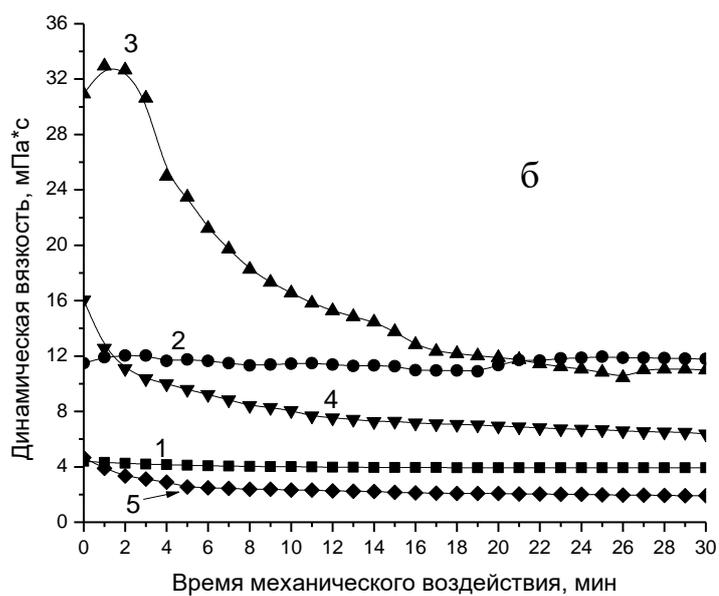
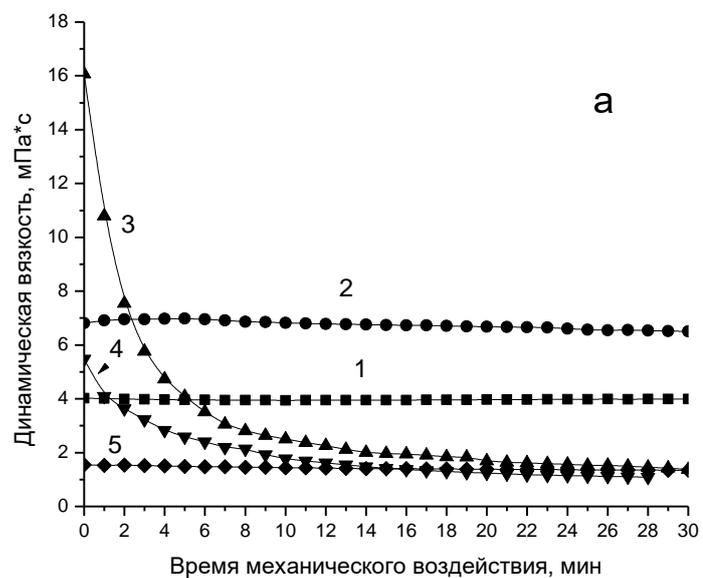
Измерение удельной электропроводности происходило с помощью кондуктометра Mettler Toledo Sevencompact S230, условия эксперимента были схожи с условиями эксперимента измерения рН, однако регистрация данных происходила каждые 5 мин до установления равновесного состояния системы и получения стабильного значения удельной электропроводности.

Измерение дзета-потенциала агрегатов в образцах осуществляли с использованием анализатора Zetasizer «Nano ZS» (фирма «Malvern»). Измерения проводились путем подготовки необходимого исследуемого раствора, после чего он вносился в объеме 0.8 мл в U-образную капиллярную кювету, помещался в кюветную камеру, далее происходили измерения.

Электронные спектры исследуемых образцов регистрировали на УФ-спектрофотометре «Evolution Array» (фирма «Thermo Scientific») в кварцевой кювете с толщиной слоя 1 мм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Важнейшей характеристикой гелей являются прочностные свойства, которые обусловлены наличием пространственной сетки. В супрамолекулярных гелях образование пространственной сетки происходит за счет слабых межмолекулярных взаимодействий (электростатическое, гидрофобное, водородная связь и др.). Поскольку в супрамолекулярных гелях и сами молекулярные цепи состоят из супрамономеров, связанных такими же слабыми взаимодействиями, то даже небольшое механическое воздействие на супрамолекулярный гель вызывает разрушение пространственной сетки. Эффективным методом исследования наличия пространственной структуры в ЦСРац являются реологические испытания образцов. Вискозиметрические измерения были проведены в диапазоне концентраций инициатора NaCl от 0 до  $58 \cdot 10^{-4}$  М с целью поиска наиболее прочных сеточных структур.



Р и с . 1. Зависимость динамической вязкости систем ЦСРац–NaCl от времени стояния образца в покое: а - 1.5 часа, б - 48 часов;  $C_{NaCl}$ :  $5 \cdot 10^{-4}$  М (1),  $14 \cdot 10^{-4}$  М (2),  $20 \cdot 10^{-4}$  М (3),  $40 \cdot 10^{-4}$  М (4) и  $58 \cdot 10^{-4}$  М (5)

Установлено, что на процесс самоорганизации основное влияние оказывают количество инициатора и время стояния образца. Согласно полученным данным, при концентрациях NaCl, соответственно равных  $5 \cdot 10^{-4}$  М и  $14 \cdot 10^{-4}$  М (рис. 1а), происходит увеличение значения динамической вязкости по мере увеличения концентрации электролита, также вязкость этих систем постоянна во времени, что говорит об отсутствии плотных пространственных структур. Время стояния системы с концентрацией NaCl  $5 \cdot 10^{-4}$  М в покое 1.5 и 48 час (рис. 1 а,б, кривая 1) не оказывает существенного влияния на вязкость. В системе с концентрацией NaCl  $14 \cdot 10^{-4}$  М (рис. 1б, кривая 2) происходит заметное увеличение динамической вязкости. Особенно прочная структура геля получается при концентрации электролита  $20 \cdot 10^{-4}$  М (рис. 1а, кривая 3), так как уже спустя полтора часа с момента введения электролита происходит увеличение вязкости, которая на порядок выше вязкости других образцов. Через 48 час система с концентрацией NaCl  $20 \cdot 10^{-4}$  М (рис. 1б, кривая 3) демонстрирует дальнейший рост вязкости, что свидетельствует об увеличении прочности пространственной сетки. Система с концентрацией NaCl  $40 \cdot 10^{-4}$  М (рис. 1а, кривая 4) ведет себя сходным образом с образцом 3 и для него также характерно нелинейное изменение вязкости в ходе измерений, но значения динамической вязкости в 2-4 раза меньше, чем у образца 3. По-видимому, с ростом концентрации электролита в растворе происходит взаимодействие серебра с избытком хлора, что ведет к деструкции пространственной сетки геля. При концентрации электролита выше  $40 \cdot 10^{-4}$  М (рис. 1 а,б) происходит разрушение геля и выпадение осадка белого цвета, предположительно хлорида серебра.

Также отличительной чертой систем 3 и 4 относительно прочих образцов является сильное падение вязкости в процессе измерения - этот факт говорит о наличии плотной пространственной сетки в образцах, которая подвергается сильной деформации. Динамическая вязкость образцов в результате падает до значений раствора ЦСРац (~2 мПа·с). Небольшой рост в начале измерения для образца 3 (рис. 1б, кривая 3) говорит об особенной плотности пространственной сетки относительно прочих образцов, т.к. происходит увеличение сопротивления колебанию, передаваемому лепестками вискозиметра, и накопление избыточной энергии внутри пространственной сетки до момента её деструкции.

Наибольшая прочность пространственной сетки гидрогеля наблюдается при концентрации электролита  $20 \cdot 10^{-4}$  М и увеличивается со временем стояния образца в покое после сливания водных растворов ЦСРац и NaCl. Прочность пространственной сетки гидрогеля, в первую очередь, обусловлена числом сшивок между олигомерными цепями МС.

Для установления механизма встраивания ионов в агрегаты ЦСРац особый интерес представляет собой участок с концентрацией хлорида натрия в растворе  $0-20 \cdot 10^{-4} \text{ M NaCl}$  (рис. 1). С этой целью были проведены измерения удельной электропроводности системы при ступенчатом введении малых объемов электролита с шагом  $0.8 \cdot 10^{-4} \text{ M}$  и последующей регистрации электропроводности до момента установления стабильного значения. На рис. 2 представлены две концентрационные зависимости удельной электропроводности: одна соответствует изменению удельной электропроводности системы в момент введения электролита (рис. 2а), другая получена в момент достижения равновесия в системе (рис. 2б).

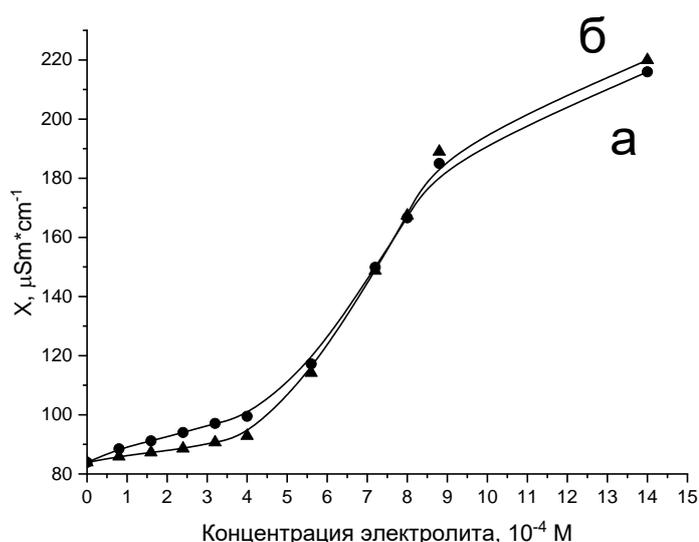


Рис. 2. Зависимость значения удельной электропроводности от концентрации электролита: а – в момент добавления электролита, б – в момент установления равновесия в системе

Из рисунка видно, что концентрационная зависимость электропроводности в ЦСРац описывается S-образной кривой, на которой можно выделить три участка: I участок отвечает слабому росту электропроводности при изменении содержания электролита от 0 до  $4 \cdot 10^{-4} \text{ M}$ , II участок с изменением концентрации электролита от  $4 \cdot 10^{-4}$  до  $9 \cdot 10^{-4} \text{ M}$  соответствует основному росту электропроводности в системе и, наконец, на III участке от  $9 \cdot 10^{-4}$  до  $14 \cdot 10^{-4} \text{ M}$  рост электропроводности замедляется. Процессу структурообразования соответствуют адсорбция ионов  $\text{NaCl}$  до концентрации в системе  $8 \cdot 10^{-4} \text{ M}$  (рис 2 а,б) и процессы, сопровождающиеся увеличением электропроводности. Это явление указывает на процессы встраивания ионов электролита в кластеры ЦСРац и дальнейшие разрушение

исходных кластеров по мере увеличения концентрации электролита в растворе. Учитывая данные вискозиметрии (рис. 1), можно предположить, что концентрация  $\text{NaCl } 8.0 \pm 0.8 \cdot 10^{-4} \text{ М}$  является предельной концентрацией ионов электролита в ЦСРац, которая не приводит к разрушению исходных кластеров и олигомерных цепей из молекул МС в ЦСРац, наблюдаемых ранее [7]. Дальнейшее введение электролита инициирует процесс модификации кластеров ЦСРац и образование пространственной сетки гидрогеля ЦСРац- $\text{NaCl}$ . Подобные изменения могут быть связаны с введением катионов  $\text{Na}^+$ , которые благодаря малому радиусу способны подойти к карбоксильным группам L-цистеина и ацетат-анионам в структуре кластеров.

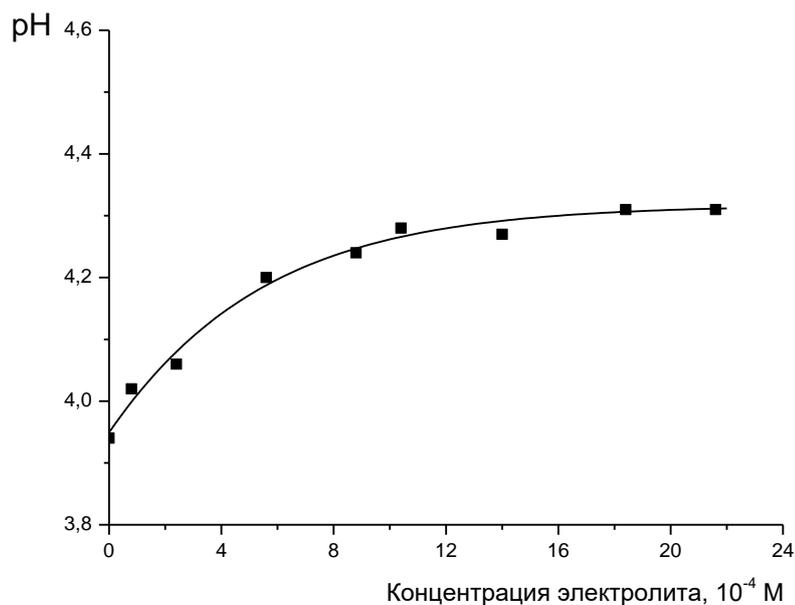
В работе [8] были рассмотрены возможные механизмы взаимодействия между катионами металлов и функциональными группами аминокислоты. Согласно результатам проведенного исследования, для катионов  $\text{Na}^+$  наиболее характерно взаимодействие с функциональными группами аминокислоты с преимущественным распределением электронной плотности между карбоксильной и тиольной группами, однако в случае блокировки тиольной группы наиболее вероятно связывание катиона с карбоксильной группой. Однако для точного определения механизма встраивания катионов  $\text{Na}^+$  необходимо знать значения рН в каждой точке концентрации  $\text{NaCl}$  в системе ЦСРац- $\text{NaCl}$  с целью определения зарядового состояния каждой функциональной группы и общей степени протонирования молекулы аминокислоты.

В предыдущих работах авторов [4-7] было выдвинуто предположение, что элементарными агрегатами ЦСРац являются кластеры, состоящие из линейно соединенных между собой молекул МС разной длины цепи. Супрамолекулярный характер связывания между молекулами МС рассматривается в работах [9,10]. Авторы работы [10] подчеркивают сложную природу процессов структурообразования системы L-цистеин - серебро. В работе [11] было проведено компьютерное моделирование процесса самоорганизации серебра с аминокислотой L-цистеин. В результате была предложена модель организации кластеров МС посредством слабых водородных связей по функциональным группам L-цистеина, где в роли связывающих элементов выступают ионы  $\text{H}_3\text{O}^+$  и анионы остатка соли серебра.

По мере увеличения концентрации  $\text{NaCl}$  в системе ЦСРац- $\text{NaCl}$  происходит увеличение и последующая стабилизация значения кислотного числа, начиная с концентрации электролита в системе, равной  $4,2 \cdot 10^{-4} \pm 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ М}$  (рис. 3). С увеличением значения рН в кластерах происходит депротонирование как слабых водородных связей между кластерами в ЦСРац, так и самих молекул МС внутри кластеров.

В результате уменьшается число ионов  $\text{H}_3\text{O}^+$  и увеличивается число несвязанных карбоксильных групп в молекулах МС.

После введения каждого объема соли-инициатора в раствор ЦСРац по результату измерений наблюдается одно численное значение дзета-потенциала. Это, а также малое значение среднеквадратичного отклонения, говорит о том, что все агрегаты в системе ЦСРац схожи по своему строению и свойствам и в дальнейшем процессы структурообразования целесообразно рассматривать с точки зрения теории двойного электрического слоя (ДЭС).



Р и с . 3 . Зависимость pH от концентрации электролита в системе ЦСРац-NaCl

При добавлении хлорида натрия в ЦСРац происходит увеличение электрофоретической подвижности агрегатов (табл. 1), после чего их подвижность возвращается к прежним значениям и начинает постепенно уменьшаться; дзета-потенциал показывает увеличение заряда при концентрации  $3,2 \cdot 10^{-4}$  М после уменьшения на концентрациях  $0 - 3,2 \cdot 10^{-4}$  М; далее, так же, как и в случае pH, значения дзета-потенциала для систем ЦСРац-NaCl стабилизируются в промежутке с концентрацией NaCl больше  $3,2 \cdot 10^{-4}$  М и при увеличении концентрации электролита происходит уменьшение значений дзета-потенциала. Обращаясь к теории ДЭС, можно предположить, что причинами подобного изменения заряда могут служить процессы, связанные с уменьшением отрицательного поверхностного потенциала кластера при введении катионов  $\text{Na}^+$ . В этом случае происходит

адсорбция катионов  $\text{Na}^+$  на поверхности кластеров, адсорбционными центрами могут являться отрицательно заряженные карбоксильные группы L-цистеина  $-\text{COO}^{\delta-}$ , а также ацетат-анионы  $\text{CH}_3\text{COO}^-$  оставшиеся от диссоциации ацетата серебра. Возрастание значение в концентрации  $\text{NaCl}$   $3,2 \cdot 10^{-4}\text{M}$  предположительно характеризует первичные процессы встраивания хлорид-аниона в структуры кластера и дополнения его структуры после нейтрализации карбоксильных групп.

Т а б л и ц а  
Зависимость значения дзета-потенциала от концентрации электролита в ЦСРац.

Концентрация NaCl, M	Электрофоретическая мобильность, $\mu\text{mcm/Vs}$		Дзета-потенциал, mV	
	Среднее значение	Среднеквадратичное отклонение	Среднее значение	Среднеквадратичное отклонение
0	+4,6	0,6	+68,6	8,6
$1,6 \cdot 10^{-4}$	+4,4	0,5	+55,7	6,2
$3,2 \cdot 10^{-4}$	+6,3	0,4	+87,1	5,5
$4,8 \cdot 10^{-4}$	+4,5	0,4	+58,1	5,0
$6,4 \cdot 10^{-4}$	+3,7	0,4	+47,2	5,2

По результатам измерений дзета-потенциала и pH систем в сравнении с результатами электропроводности установлен процесс встраивания катионов  $\text{Na}^+$ , но необходимо также обозначить процессы, связанные с введением хлорид-аниона. При избытке хлорид-анионов происходит разрушение гидрогелей и выпадение осадка хлорида серебра  $\text{AgCl}$ , т.е. происходит их постепенное связывание с ионами серебра в кластерах ЦСРац в процессах усиления пространственного связывания.

В ходе эксперимента были зарегистрированы полосы поглощения ЦСРац и систем ЦСРац- $\text{NaCl}$  в УФ-видимом диапазоне излучения (рис. 4). Изначально (рис. 4, спектр 1) основными характеристическими полосами являются поглощения длин волн 315 нм и 395 нм. Согласно работе [5], полоса 395 нм относится к плазмонному резонансу серебра, связанного с меркаптогруппой L-цистеина внутри кластеров. Полоса поглощения 315 нм, которая также характерна ЦСР не зависимо от соли серебра, предположительно связана с ауксохромными заместителями  $-\text{SH}$  и  $-\text{NH}_2$  в составе молекул МС. После введения электролита (рис. 4, спектр 2) наблюдается характерная

полоса 270 нм, которая относится к  $n \rightarrow \pi^*$  и  $\pi \rightarrow \pi^*$  переходам в связях -C-O и -C=O в молекулах цистеина и уксусной кислоты [12].

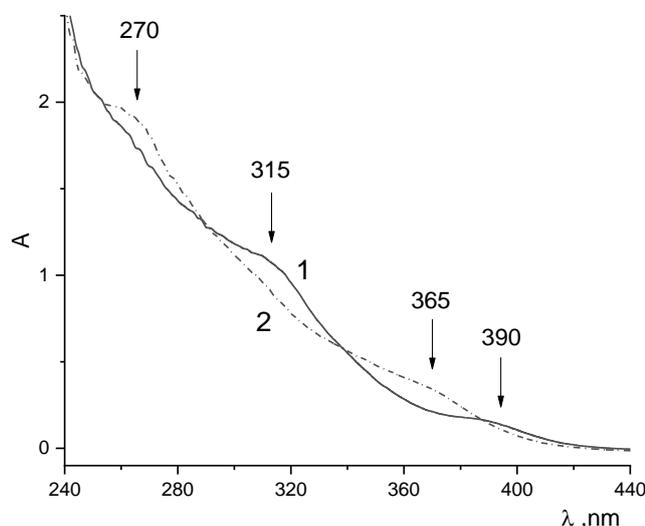


Рис. 4. Изменение электронного спектра ЦСРац при введении в раствор NaCl : 1 – исходный ЦСРац, 2 – ЦСРац-NaCl при концентрации электролита  $8.8 \cdot 10^{-4}$  М.  $t = 1$  час

Изменения в электронных спектрах поглощения в процессе введения NaCl в систему ЦСРац показывают, что в процессе увеличения концентрации электролита в системе происходит снижение интенсивности полосы поглощения 315 нм и появление полосы поглощения 270 нм. Моменту начала образования гидрогеля в растворе ЦСРац-NaCl соответствует спектр 2. Образцу, соответствующему спектру 2, соответствует концентрация  $8.8 \cdot 10^{-4}$  М введенного инициатора, т.е. это спектр, в котором наблюдаются изменения в строении кластеров и их пространственной структуризации. Действительно, происходит пропорциональное уменьшение интенсивности полос 315 и 395 нм с появлением и ростом интенсивности полосы поглощения 270 нм. В работе [13] была зарегистрирована полоса 365 нм для гидрогеля ЦСРац-NaCl с концентрацией электролита  $25 \cdot 10^{-4}$  М и при времени стояния образца ~6 час. В данной работе при более низких концентрациях электролита и меньшем времени стояния она также была зарегистрирована, однако с меньшей интенсивностью. Полоса поглощения 365 нм может быть обусловлена как связыванием серебра, не участвующего в связях с тиольной группой аминокислоты в кластерах ЦСРац, с хлорид-анионом, так и с возможным образованием комплексов МС с хлорид-анионом.

Действительно, в работе [14] был зарегистрирован подобный электронный спектр при удалении катионов тяжелого металла из низкомолекулярных органических соединений (пептидов, аминокислот и т.д.). В работе [15] авторы интерпретируют схожее поглощение в УФ-спектре аминокислот как комплексобразование с металлами.

Обобщая полученные экспериментальные данные можно заключить, что введение электролита NaCl в ЦСРац вызывает следующие структурные изменения:

1. Происходит адсорбция катионов  $\text{Na}^+$  как карбоксильными группами аминокислоты, так и ацетат-анионами соли серебра, в зависимости от строения кластера и расположения адсорбционных центров на поверхности кластера (Рис. 5).
2. В ходе адсорбции катионов  $\text{Na}^+$  параллельно происходит возрастание концентрации хлорид-анионов в диффузном слое и слое противоионов кластера ЦСРац; блокировка карбоксильных групп и связывание ацетат-анионов соли серебра с катионами  $\text{Na}^+$  приводит к вынужденному достраиванию структуры кластера за счет хлорид-анионов из внешних слоев (Рис. 5).
3. При концентрации электролита NaCl, превышающей  $4 \cdot 10^{-4}$  М, под действием возросшего содержания хлорид-аниона в кластерах происходит специфичная и сложная перестройка структуры кластера; происходит связывание сначала избыточных катионов серебра  $\text{Ag}^+$ , а затем и серебра в цепочках  $(-\text{Ag}-\text{S}(\text{Cys})-\text{Ag}-\text{S}(\text{Cys})-)_n$ , образуя трехмерную пространственную сетку в объеме ЦСРац.

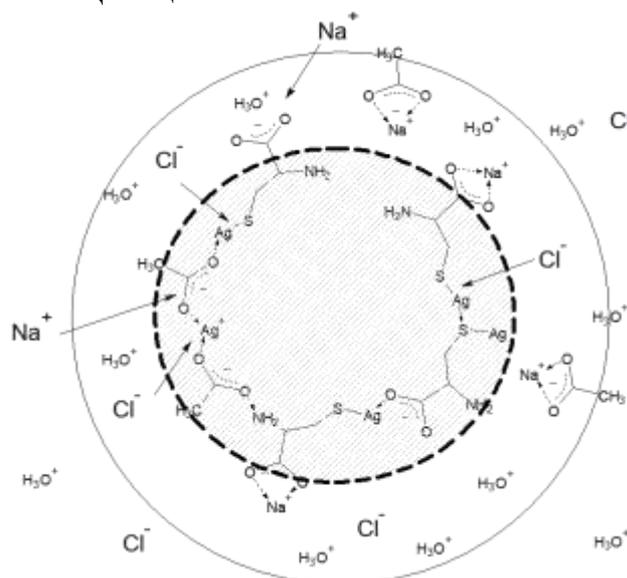


Рис. 5. Схематическое представление механизма структурообразования – кластер ЦСРац в процессе адсорбции катионов  $\text{Na}^+$  и анионов  $\text{Cl}^-$ . Количество молекул L-цистеина – 4,  $\text{CH}_3\text{COOAg}$  – 5

### Список литературы

1. Kokkarachedu Varaprasad, Emmanuel Rotimi Sadiku, Koduri Ramam, Jaragula Jayaramudu and G. Siva Mohan Reddy. // Nanostructured Polymer Blends. Elsevier. 2014. Ch. 8. P. 80–98.
2. Neralagatta M. Sangeetha, Uday Maitra. Supramolecular gels: Functions and uses // Chem. Soc. Rev. 2005. V. 34. P. 821–836.
3. Уайт А., Хендлер Ф., Смит Э. и др. Основы биохимии. – М.: Мир, 1981
4. Пахомов П.М., Хижняк С.Д., Овчинников М.М., Комаров П.В. Супрамолекулярные гели. Тверь: Твер. гос. университет, 2011.
5. Khizhnyak S.D., Komarov P.V., Ovchinnikov M.M., Zherenkova L.V., Pakhomov P.M. // Soft Matter. 2017. V. 13. P. 5168.
6. Овчинников М.М., Хижняк С.Д., Пахомов П.М. // Журн. структур. химии. 2011. Т. 52, №6. С. 1203 – 1207.
7. Хижняк С.Д., Овчинников М.М., Пахомов П.М. // Журн. структурной химии. 2014. Т. 55. №1. С.173–177.
8. R. Shankar, P. Kolandaivel, L. Senthilkumar // J. Phys. Org. Chem. 2010. V. 24. P. 553–567.
9. Yanyan Cui, Yaling Wang , Lina Zhao // Wiley. Small. 2011. V.38. P. 5118–5125.
10. Rosalba Randazzo, Alessandro Di Mauro, Alessandro D'Urso, Gabriele C. Messina, Giuseppe Compagnini, Valentina Villari, Norberto Micali, Roberto Purrello, and Maria Elena Fragalà // J. Phys. Chem. B. 2015. 119 (14). pp 4898–4904
11. Комаров П.В., Михайлов И.В., Алексеев В.Г., Хижняк С.Д., Пахомов П.М. // Журнал структурной химии. 2012. Т. 53. № 5. С. 1006–1023.
12. Richard Koplik // Ultraviolet and Visible Spectrometry
13. Адамян А.Н., Аверкин Д.В., Хижняк С.Д., Овчинников М.М., Пахомов П.М. // Вестник ТвГУ. Серия «Химия». 2016. Вып. 2, С. 89–98.
14. Jana Marešová, Pípiška Martin., Jozef Augustin // Nova Biotechnologica et Chimica. 2012. P 153–166.
15. Malandrinos, G., Dodi, K., Louloudi, M., // Inorg. Chem., 79, 2000, p.21

### SELF-ORGANIZATION PROCESSES IN LOW-CONCENTRATED SUPRAMOLECULAR SYSTEMS BASED ON SILVER ACETATE AND L-CYSTEINE AFTER SODIUM CHLORIDE ADDING

**D.V. Averkin, S.D. Khizhnyak, P.M. Pakhomov**

Tver State University,  
*Physical Chemistry Department*

A comprehensive study of the mechanisms of structure formation of low-concentrated aqueous solutions containing the amino acid L-cysteine, silver acetate and sodium chloride was carried out. It was established that the

processes of structure formation correspond to the stage of enlargement of cysteine-silver solution clusters and their reorganization into a spatial network due to specific interactions of electrolyte ions on the cluster surface. Mechanisms of self-organization of the system are proposed as a change in the structure of silver mercaptide clusters and the spatial gelation of modified clusters. All stages of self-organization with the introduction of sodium chloride are studied using pH measurement methods, conductometry, UV spectroscopy, viscometric studies, measurements of zeta potential.

**Keywords:** *silver acetate, L-cysteine, hydrogel, cluster, supramolecular structure, structure formation.*

*Об авторах:*

АВЕРКИН Дмитрий Вадимович – студент химико-технологического факультета Тверского государственного университета, e-mail: [averkindmitry@gmail.com](mailto:averkindmitry@gmail.com)

ХИЖНЯК Светлана Дмитриевна – кандидат химических наук, заведующая лабораторией спектроскопии ЦКП Тверского государственного университета, e-mail: [sveta\\_khizhnyak@mail.ru](mailto:sveta_khizhnyak@mail.ru)

ПАХОМОВ Павел Михайлович – доктор химических наук, профессор, зав. кафедрой физической химии Тверского государственного университета, e-mail: [pavel.pakhomov@mail.ru](mailto:pavel.pakhomov@mail.ru)

Поступила в редакцию 23 апреля 2019 года.