

ВЛИЯНИЕ АНИОННЫХ ПАВ НА ОДНОСТАДИЙНОЕ ГЕЛЕОБРАЗОВАНИЕ В НИЗКОКОНЦЕНТРИРОВАННОЙ ВОДНОЙ L-ЦИСТЕИН- AgNO_3 -KI СИСТЕМЕ

А.А. Баранник^{1,2}, Д.В. Аверкин², С.Д. Хижняк¹, А.И. Иванова¹,
П.М. Пахомов¹

¹ Тверской государственный университет, г. Тверь

² Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических
и радиотехнических измерений, г. Менделеево

В работе исследовано влияние анионных ПАВ на основе натриевых солей жирных кислот – лаурилсульфата натрия и лаурата натрия – на одностадийное гелеобразование в низкоконтрированных водных системах на основе аминокислоты L-цистеин, нитрата серебра и иодида калия. В диапазоне концентраций лаурилсульфата натрия 0,125-0,375 мМ были получены прозрачные, стабильные во времени гидрогели, проявляющие фотоустойчивость; соотношение молярных концентраций соли серебра к аминокислоте во всех гидрогелях составляло 1,83; концентрация иодида калия – 0,75 мМ, концентрация лаурата натрия изменялась от $8 \cdot 10^{-8}$ до $8 \cdot 10^{-7}$ мМ. Процесс гелеобразования в водных L-цистеин- AgNO_3 -KI-ПАВ системах был исследован с помощью методов вибровискозиметрии, спектроскопии УФ-видимого диапазона, динамического светорассеяния (ДРС), электрофоретического рассеяния света, сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Установлено, что анионные ПАВ не инициируют гелеобразование в L-цистеин- AgNO_3 системе, однако в присутствии иодида калия повышают вязкость, стабильность во времени и фотоустойчивость гидрогелей. Предположительно анион ПАВ выступает в роли линкера между положительно заряженными кластерными цепочками в L-цистеин- AgNO_3 системе, способствуя формированию более развитой пространственной гель-сетки и препятствуя восстановлению избыточного Ag(I) .

Ключевые слова: гидрогель, наночастицы серебра, анионные ПАВ, L-цистеин, нитрат серебра, иодид-анион, супрамолекулярная структура

Супрамолекулярные гидрогели на основе низкомолекулярных соединений (аминокислот, пептидов и др.) привлекают повышенное внимание исследователей как перспективные материалы для биомедицинского применения и как модельные системы для изучения процессов самосборки [1-5]. Гелеобразование в таких системах может быть инициировано различными способами – введением электролита,

изменением pH, нагреванием, облучением и др. Особый интерес представляют процессы самосборки и гелеобразования в подобных системах в результате анионного отклика [6-7], исследование которых открывает новые возможности в создании и направленном дизайне анион-чувствительных супрамолекулярных органо- и гидрогелей биомедицинского назначения [8-10].

Несмотря на многообразие супрамолекулярных систем объектом исследования авторов являются гидрогели на основе L-цистеин-серебряного раствора (ЦСР), полученные одностадийным методом (one-pot) при добавлении галогенид-анионов [11-12]. L-цистеин (L-Cys) представляет собой заменимую аминокислоту, содержащую аминно-, карбоксильную и тиольную группы. L-Cys биосовместим, обладает антиоксидантной активностью, выступает предшественником глутатиона [13], за счет тиольной группы координирует ионы металлов. L-цистеин применяется в пищевой, фармацевтической, косметической и др отраслях, что подчеркивает его практическую значимость.

Гелеобразование в системах на основе ЦСР изучается довольно продолжительное время [14], внимание исследователей фокусируется, в основном, на процессах самосборки в ЦСР под влиянием различных электролитов [15-16], полимеров [17-19], полисахаридов [20-23], и, несмотря на большое количество выполненных работ, как экспериментальных, так и с помощью компьютерного моделирования [24-26], исследование ЦСР с добавлением ионогенных ПАВ не проводилось.

Выбор ПАВ был не случайным, поскольку эти соединения являются амфифильными, имеют полярную группу и неполярный радикал, снижают поверхностное натяжение, находят применение в медицине в качестве антисептиков. Для данного исследования в качестве добавки к L-цистеин- $\text{AgNO}_3\text{-KI}$ гидрогелям, полученным одностадийным методом [12], были выбраны анионные ПАВ – лаурилсульфат натрия ($\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4\text{Na}$) и лаурат натрия ($\text{C}_{12}\text{H}_{23}\text{O}_2\text{Na}$), которые имеют одинаковую длину углеродной цепочки (C_{12}), но отличаются полярными группами – сульфатная и карбоксилатная, соответственно. Целью работы является изучение влияния анионного ПАВ – лаурилсульфата натрия (SDS) и лаурата натрия (SL) – на one-pot гелеобразование в низкоконцентрированных водных системах на основе аминокислоты L-цистеин, нитрата серебра, иодида калия с помощью вибровискозиметрии, спектроскопии УФ-видимого диапазонов, ДСР, электрофоретического рассеяния света, сканирующей электронной микроскопии.

Экспериментальная часть

В работе использованы реактивы: нитрат серебра 99% («Lancaster»), L-цистеин 99% («Acros»), иодид калия (х.ч.), лаурилсульфат натрия (х.ч.), лаурат натрия (х.ч.). Все растворы готовили на бидистиллированной воде.

Для приготовления гидрогелей на основе L-цистеина и нитрата серебра по одностадийному методу использовали водные растворы исходных компонентов с концентрацией 0,01 М, концентрация раствора йодида калия составляла 0,05 М, концентрация растворов SDS и SL составляла 0,01 М. Образцы для исследований получали по следующей схеме: к раствору L-Cys приливали рассчитанное количество воды, а затем растворы йодида калия, ПАВ, нитрата серебра. Последовательность смешения компонентов особенно важна, в случае ее изменения образуется, как правило, мутный образец, в котором гелеобразование не происходит. В табл. 1 представлены концентрации компонентов в исследованных образцах, из которой видно, что концентрация L-Cys, AgNO_3 , KI и соотношение молярных концентраций $\text{Ag}^+/\text{L-Cys}$ оставались постоянными, а концентрации лаурилсульфата натрия и лаурата натрия в итоговой системе варьировались. Смесь растворов интенсивно перемешивали после добавления каждого компонента. Образцы хранились в защищенном от света месте при комнатной температуре.

Таблица 1.

Концентрация компонентов в исследуемых
L-Cys- AgNO_3 -KI-ПАВ гидрогелях

Образец/ Концентрация, мМ	1	2	3	4	5	6	7
L-Cys	3,0						
AgNO_3	5,5						
KI	-	0,75					
SL	-	-	-	-	-	$8 \cdot 10^{-8}$	$8 \cdot 10^{-7}$
SDS	-	-	0,125	0,250	0,375	-	-

Примечание: $C_{\text{AgNO}_3}/C_{\text{L-Cys}} = 1,83$.

Измерение вязкости выполняли при комнатной температуре в специальных кюветах из поликарбоната объемом 12 мл на вибрационном

вискозиметре SV-10 фирмы «A&D Company», в котором вибрация сенсорных пластин осуществляется с частотой 30 Гц и постоянной амплитудой около 1 мм.

Электронные спектры исследуемых образцов регистрировали на спектрофотометре “EvolutionArray” фирмы “ThermoScientific” в кварцевой кювете с толщиной слоя 1 мм.

Распределения частиц по размерам в образцах получены с помощью метода динамического светорассеяния. Измерения проведены на анализаторе Zetasizer “Nano ZS” фирмы “Malvern” с He-Ne-лазером (633 нм) мощностью 4 мВт при 25°C в конфигурации обратного рассеяния (173^0), обеспечивающей наибольшую чувствительность прибора.

Измерение дзета-потенциала агрегатов в образцах осуществляли на анализаторе Zetasizer “Nano ZS” (фирма “Malvern”) с использованием специальных U-образных капиллярных кювет.

Морфологию гидрогелей исследовали на сканирующем электронном микроскопе «JEOL JSM-6610 LV». Пробоподготовку проводили по стандартной методике.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлена фотография гидрогелей № 2 и 3 (согласно таблице) через 3 месяца с момента синтеза. Из рисунка видно, что образец №2 (без добавления ПАВ) имеет темный цвет, что, вероятно, связано с восстановлением серебра [27] и является свидетельством фоточувствительности. Образец №3, содержащий ПАВ (SDS), имеет желтый оттенок, что указывает на отсутствие в нем деструкционных процессов, поскольку свежеприготовленные гидрогели имеют желтое окрашивание. Исходя из этого можно сделать вывод, что введение ПАВ приводит к повышению стабильности гидрогелей во времени, понижает их фоточувствительность, проявляя «защитные» свойства к избыточному Ag(I) в системе [28].

В работе были определены концентрационные диапазоны гелеобразования при введении ПАВ в L-Cys-AgNO₃-KI образцы. При добавлении SDS в систему в интервале концентраций от 0,125 до 0,375 мМ образуются устойчивые гидрогели, если содержание SDS в системе меньше, чем 0,125 мМ, гелеобразование не наблюдается, в случае избытка SDS – более, чем 0,375 мМ, происходит выпадение творожистого осадка. Для SL концентрационный диапазон гелеобразования составляет от $8 \cdot 10^{-8}$ до $8 \cdot 10^{-7}$ мМ. Следует отметить, что также были синтезированы образцы без иодида калия, только с добавлением анионного ПАВ, в этом случае гель не образуется. Таким

образом, SDS и SL не инициируют гелеобразование в низконцентрированном растворе L-Cys-AgNO₃.

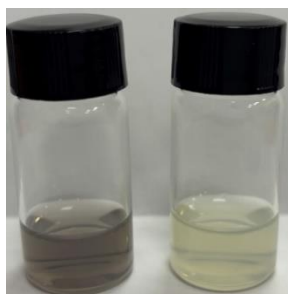


Рис. 1. Фотография образцов супрамолекулярных гидрогелей различного состава: образцы № 2 и 3 (слева направо).

Согласно данным вибрационной вискозиметрии зависимость относительной вязкости от времени для образцов с различными ПАВ (рис. 2) демонстрирует характерную особенность – уменьшение значения вязкости в процессе измерения. Это связано с частичной деструкцией пространственной гель-сетки образца из-за изменения числа зацеплений между ее фрагментами в результате осцилляций сенсорных пластин. Из рис. 2 видно, что при минимальном количестве SDS (0,125 мМ) вязкость образца в начальный момент измерения является максимальной ~20 мПа·с (рис.2.I, а). По мере увеличения концентрации SDS в системе наблюдается снижение максимальной (в начальный момент измерения) вязкости образцов (рис.2.I, б.в). Образец с концентрацией SDS, равной 0,375 мМ, является слабым гелем с максимальным значением относительной вязкости 3,6 мПа·с, кроме того, в процессе измерения гель разрушается, и его вязкость становится равной η ЦСР (рис.3.III). Из этого можно сделать вывод, что дальнейшее увеличение содержания SDS будет препятствовать образованию пространственной гель-сетки вследствие нарушения баланса электростатических взаимодействий в системе. При добавлении SL в L-Cys-AgNO₃-KI систему η образца на начальном этапе измерения возрастает (в течение 5 мин), а затем происходит ее уменьшение до значений, близких к значениям вязкости воды при температуре измерения (рис. 2.II). Низкая растворимость ПАВ в воде (4,81 мг/л при 25 °С) не позволяет добиться большей равновесной концентрации SL в системе и получить концентрационную зависимость вязкости.

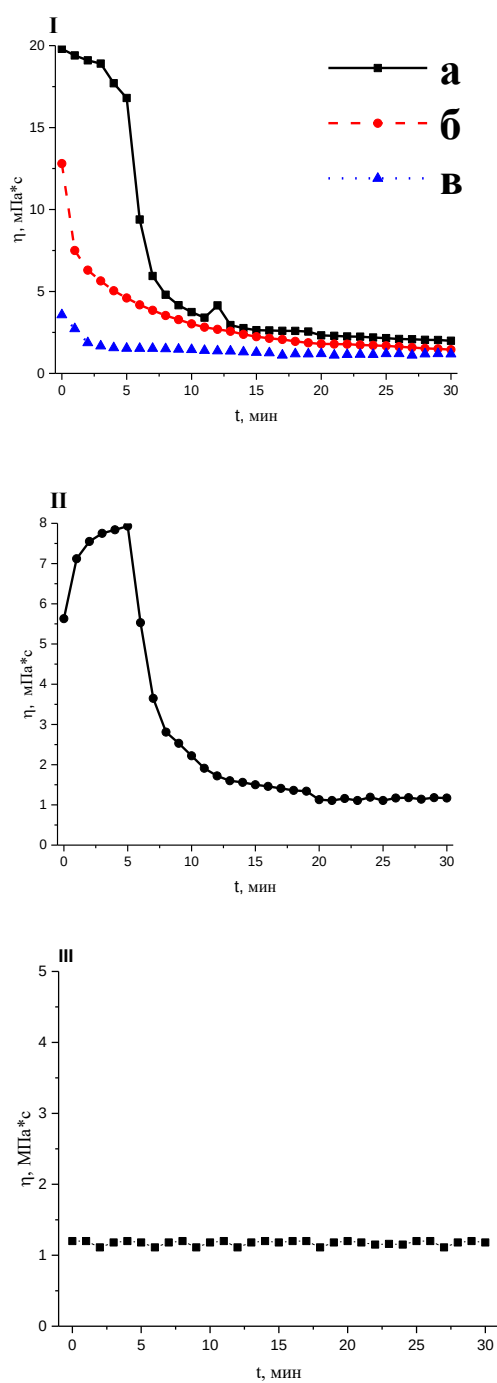


Рис. 2. Зависимость относительной вязкости L-Cys-AgNO₃-KI образцов полученные через 7 дней после синтеза, от содержания ПАВ:

I: а - №3; б - №4; в - №5, II: №7,
III: цистеин-серебряный раствор

На рис. 3 представлены УФ-спектры L-Cys-AgNO₃-KI гидрогеля и образцов с различными ПАВ (№ 2, 3, 6, согласно таблице 1). Из рисунка видно, что добавление SDS и SL увеличивает интенсивность поглощения в диапазоне 340-360 нм и приводит к заметному изменению формы полосы в этой области, вероятнее всего, в результате изменения электронной конфигурации кластерных цепочек на основе меркаптида серебра (МС) [13] за счет межмолекулярного взаимодействия ионов серебра с анионными группами ПАВ. Другим заметным эффектом добавления анионного ПАВ в систему является отсутствие в электронных спектрах образцов №3 и №6 полосы плазмонного резонанса наночастиц серебра ~408 нм, предположительно, вследствие «защитного» действия ПАВ, анионы которого координируются с избыточным Ag(I) и препятствуют формированию нанокластеров серебра [12, 27].

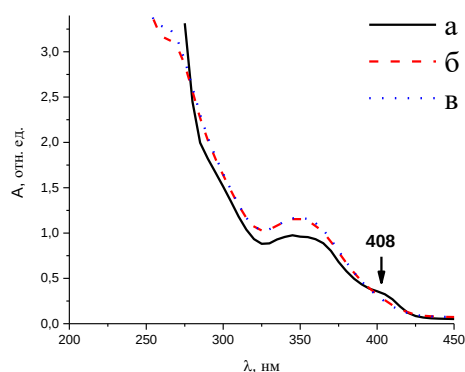


Рис. 3 Электронные спектры различных образцов, полученные через 7 дней после синтеза:

а – №2; б - №3; в - №6

Рис. 4.I демонстрирует УФ-спектры гидрогелей с различным количеством SDS. Следует отметить, что изменение концентрации ПАВ в образцах с 0,125 до 0,250 мМ вызывает лишь незначительные различия в спектрах образцов №3 и №4 в области полосы поглощения 260 нм, которую интерпретируют как полосу, связанную с аргентофильным Ag(I)⋯ Ag(I) взаимодействием в Cys-Ag(I) координационных полимерах [29, 30]. Увеличение концентрации SDS до 0,375 мМ приводит к заметному уменьшению поглощения во всем диапазоне спектра, однако в большей степени в коротковолновой области (~260 нм). При

дальнейшем повышении концентрации ПАВ гель не образуется, наблюдается выпадение осадка.

На рис. 4. II показаны УФ-спектры L-Cys-AgNO₃-KI-SL образцов с различным содержанием ПАВ. Увеличение концентрации лаурата натрия незначительно повышает интенсивность поглощения в области 340-360 нм, которая интерпретируется в работе [29] как полоса переноса заряда с лиганда на металл в -Ag-S-Ag-, заметное уширение которой происходит вследствие координации иодид-анионов с Ag(I) кластерных цепочек [12]. Таким образом, влияние SDS и SL на электронную конфигурацию -Ag-S-Ag- проявляется различным образом, что можно объяснить разным строением аниона ПАВ.

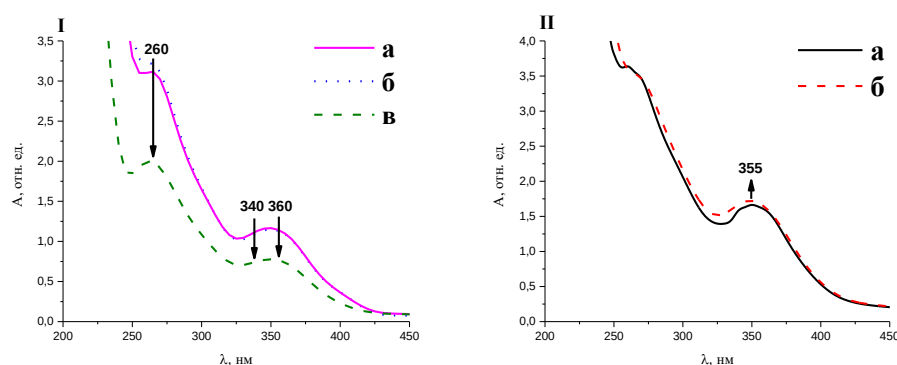


Рис. 4 Электронные спектры различных образцов, полученные через 7 дней после синтеза,
I: а - №3, б - №4, в - №5; II – а - № 6, б - №7

На рис. 5 показаны результаты исследования процессов самосборки в L-Cys-AgNO₃-KI-ПАВ гидрогелях во времени с помощью метода ДСР. Для этого эксперимента гидрогели сразу после синтеза разбавляли в 2 раза. Если проанализировать распределения частиц по размерам (рис. 5), то выясняется, что в процессе гелеобразования количество частиц, имеющих размер около 1 мкм, возрастает с увеличением концентрации SDS. Из этого можно сделать вывод, что анион ПАВ выступает как допослительный линкер между фрагментами положительно заряженных кластерных цепочек на основе меркаптида серебра, предположительно имеющих строение: $[(-\text{---Ag-S(R)}\text{---})_n\text{mAg}]^+$ [12]. Характерной особенностью воздействия ПАВ на кластерные цепочки является сжатие (компактизация) агрегатов в процессе самосборки, что наблюдается для различных концентраций SDS (рис. 5а, б, в) и ЛС (рис. 5г).

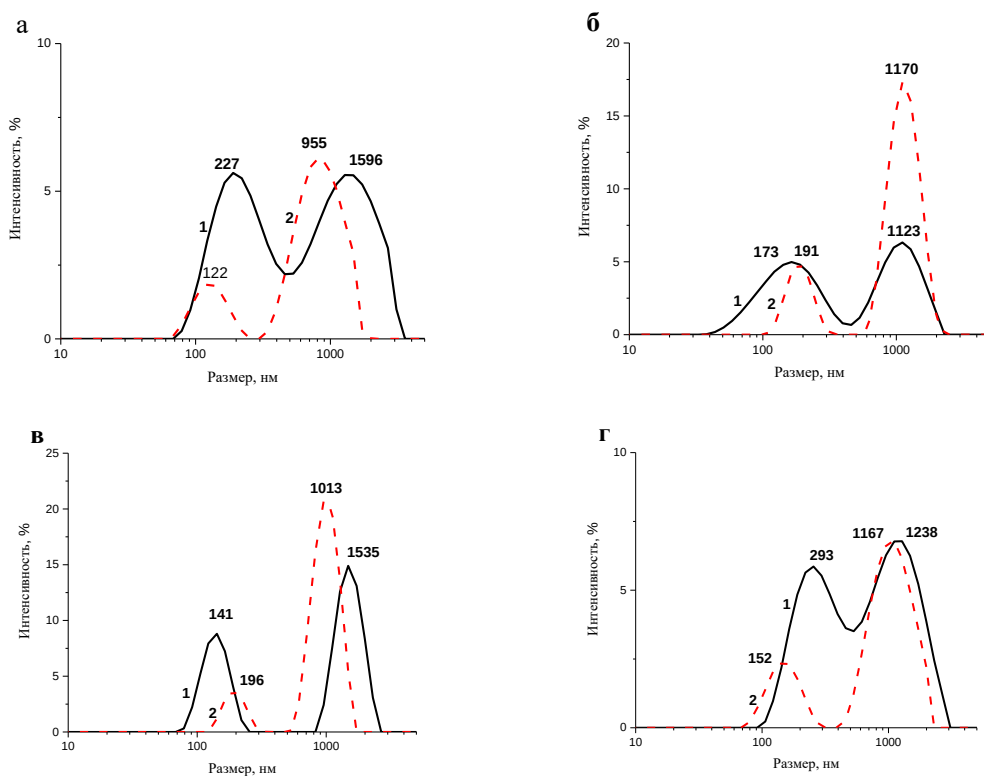


Рис. 5 Распределение частиц по размерам в зависимости от времени для различных образцов (1 - свежеприготовленные, 2 - через 2 часа)
а – №3; б – №4; в – №5; г – №7

Дзета(ζ)-потенциал является важным параметром коллоидных систем, поскольку характеризует коагуляционную устойчивость образца с точки зрения теории двойного электрического слоя. ζ -потенциал L-Cys-AgNO₃ образца без электролита (№1) имеет значение, равное +51,6 мВ, супрамолекулярный L-Cys-AgNO₃-KI гидрогель (№2) +40,4 мВ. Уменьшение значения заряда частиц в гидрогеле происходит вследствие частичной компенсации положительного заряда цепочечных кластеров $[(-\text{---Ag-S(R)---})_n\text{mAg}]^+$ иодид-анионом (рис. 6).

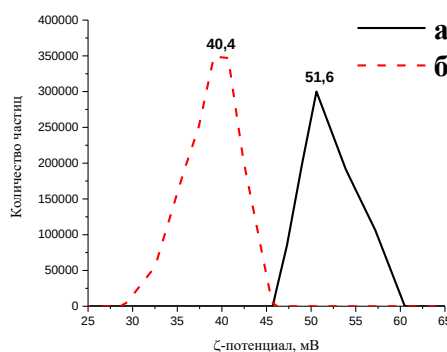


Рис. 6. Значения ζ -потенциала для образцов L-Cys-AgNO₃ (№1) и L-Cys-AgNO₃-KI (№2)

При введении в L-Cys-AgNO₃-KI систему лаурилсульфата натрия ζ -потенциал образцов повышается (рис. 7). Причиной этому могут быть несколько факторов:

- 1) рост вязкости образцов, несмотря на то, что перед анализом они были предварительно разрушены (механическое воздействие);
- 2) увеличение размеров и «компактизация» кластеров, приводящие к повышению суммарного заряда частиц.

Дальнейшее увеличение концентрации SDS ведет к снижению заряда частиц в следующей последовательности: +62,8 +59,5 +52,9 мВ, предположительно за счет увеличения количества анионов ПАВ, приводящего к дестабилизации системы и, как следствие, уменьшению вязкости, что согласуется с данными вибрационной вискозиметрии (рис. 2).

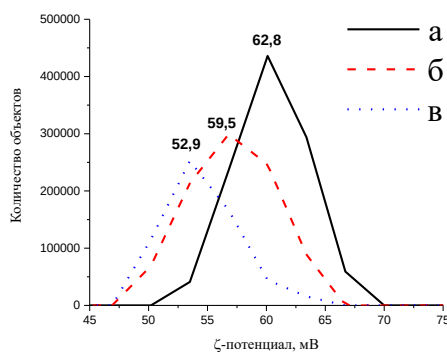


Рис. 7 Зависимость ζ -потенциала L-Cys-AgNO₃-KI- SDS образцов от концентрации ПАВ: а - №3, б - №4, в - №5

При добавлении лаурата натрия в L-Cys-AgNO₃-KI систему, образующиеся частицы очень лабильны, что не позволяет измерить значение ζ -потенциала и, кроме того, SL не способствует образованию прочного гидрогеля.

Электронные микрофотографии позволяют визуализировать изменения морфологии образов под влиянием SDS и SL. Из рис. 8 следует, что добавление SDS в образец ведет к увеличению плотности и пористости супрамолекулярной гель-сетки. Эти изменения могут быть связаны с тем, что SDS взаимодействует с кластерными цепочками меркаптида серебра как линкер, что согласуется с результатами, показанными выше. В образце №2 в структуре волокнообразной гель-сетки наблюдаются агрегаты, которые не формируются в образце №5, что подтверждает предположение о защитном действии лаурилсульфата натрия.

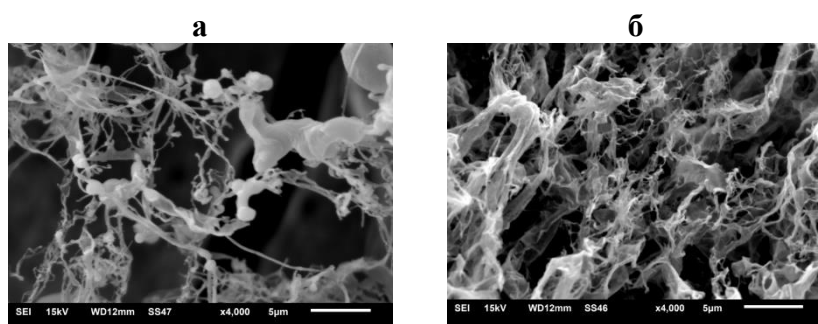


Рис. 8 СЭМ изображения образцов: а - №2, б - №5

В результате проведенного исследования доказано влияние анионных ПАВ (лаурилсульфата натрия и лаурата натрия) на процессы одностадийного (one-pot) гелеобразования в низкоконтрированных системах на основе водных растворов L-цистеина, нитрата серебра и иодида калия, имеющих супрамолекулярную природу. Концентрация L-Cys, AgNO₃, KI во всех синтезированных гидрогелях составила 3,0; 5,5; 0,75 мМ, соответственно, молярное соотношение AgNO₃/L-Cys было равно 1,83. Концентрация лаурилсульфата натрия варьировалась в диапазоне от 0,125 до 0,375 мМ, концентрация лаурата натрия изменялась в интервале от $8 \cdot 10^{-8}$ до $8 \cdot 10^{-7}$ мМ. Синтезированные по одностадийной методике L-Cys-AgNO₃-KI-ПАВ гидрогели прозрачны и имеют желтое окрашивание. Установлено, что введение анионного ПАВ (SDS, SL) в L-Cys-AgNO₃-KI систему повышает вязкость гидрогелей, их стабильность во времени и фотоустойчивость. Анионы ПАВ выступают в роли линкеров между кластерными цепочками меркаптида серебра, что приводит к формированию более развитой пространственной гель-сетки.

Одновременно с этим за счет межмолекулярных взаимодействий анионы ПАВ препятствуют формированию нанокластеров серебра.

СЭМ изображения получены на оборудовании центра коллективного пользования ТвГУ.

Список литературы

1. Qin L., Wang P., Guo Y., Chen C., Liu M. // Adv. Sci., 2015, P. 1500134 (1-7). DOI: 10.1002/advs.201500134
2. Du X., Zhou J., Shi J., Xu B. // Chem. Rev., 2015, V 115, P. 13165.
3. Haring M., Diaz D.D. // Chem. Commun., 2016, 52, P. 13068-13081. DOI: 10.1039/c6cc06533c www.rsc.org/chemcomm
4. Thangavel G., Tan M.W.M., Lee P.S. // Nano Convergence, 2019, V 6, issue 29 <https://doi.org/10.1186/s40580-019-0199-9>
5. Draper E.R., Adams D.J. // Chem., 2017, V 3, P. 390–410 <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
6. Li L., Sun R., Zheng R., Huang Y. // Materials and Design, 2021, 205, 109759.
7. Shen J.-S., Li D.-H., Cai Q.-G., Jiang Y.-B. // J. of Materials Chemistry, 2009, 19, P. 6219–6224.
8. Mulvee M., Vasiljevic N., Mann S., Patil A.J. // Gels 2021, 7, 146. <https://doi.org/10.3390/gels7030146>
9. Picci G., Mulvee M., Caltagirone C., Lippolis V., Frontera A. and etc // Molecules 2022, 27, 1257. <https://doi.org/10.3390/molecules27041257>
10. Zhang J., Zhang B., Chen Q., Zhang B., Song J. // Nanoscale Research Letters. 2019, V 14, issue 5. P. 1-9. <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2823-8>
11. Овчинников М.М., Лагуцева В.С., Хижняк С.Д., Пахомов П.М. // Вестник Тверского государственного университета, Серия: Химия, 2017, №4. С. 135-145.
12. Баранник А.А., Хижняк С.Д., Иванова А.И., Пахомов П.М. Гелеобразование в цистеин-серебряном растворе, инициированное иодид-анионом. Вестник Тверского государственного университета, серия “Химия” №4(50), 2022, С. 132 – 142.
13. Martínez-Sámano, J., Torres-Durán, P.V., Juárez-Oropeza, M.A., El glutatión y su asociación con las enfermedades neurodegenerativas, la esquizofrenia, el envejecimiento y la isquemia cerebral. Revista de educación bioquímica, 2011. 30(2); p. 56-67.
14. Pakhomov P., Khizhnyak S., Lavrienko M., Ovchinnikov M., Nierling W., Lechner M., Colloid J., 2004, 66, 1, 65-70; DOI: 10.1023/B:COLL.0000015059.50285.e9
15. Андрианова Я.В., Золотухина С.Ю., Хижняк С.Д., Пахомов П.М.. Влияние различных биоактивных электролитов на процесс самоорганизации в водном цистеин-серебряном растворе. // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия. 2013. №30. Вып. 16. С.137-149.

16. Khizhnyak S., Komarov P., Ovchinnikov M., Zherenkova L., Pakhomov P. Mechanism of gelation in low-concentration aqueous solutions of silver nitrate with L-cysteine and its derivatives // *Soft Matter*. 2017 V. 30 № 13 P. 5168–5184. <https://doi.org/10.1039/C7SM00772H>
17. Вишневецкий Д.В., Лагусева В.С., Иванова А.И., Хижняк С.Д., Пахомов П.М.. Создание биологически активных композиций на основе водных растворов L-цистеина, солей серебра и поливинилового спирта. // *Химические волокна*. 2018. №3. С.23-27.
18. Вишневецкий Д.В., Соловьева А.Е., Хижняк С.Д., Пахомов П.М. Процессы самоорганизации в водном растворе L-цистеина, нитрата серебра и полиэтиленгликоля // *Вестник ТвГУ, серия: Химия*, 2018, - № 3, - С. 66-76
19. Адамян А.Н., Кучурова А.К., Иванова А.И., Малышев М.Д., Герасин В.А., Червинец В.М., Хижняк С.Д., Пахомов П.М.. Антимикробные препараты на основе L-цистеина, ацетата серебра и полигуанидина для пропитки химических волокон и текстильных материалов. // *Химические волокна*. 2021. №5. С.11-15.
20. Овчинников М.М., Червинец В.М., Червинец Ю.В., Михайлова Е.С., Хижняк С.Д., Пахомов П.М.. Новые катионные антисептики на основе композиций L-цистеин-серебряного раствора и хитозана. // *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия*. 2016. №1. С.140-151.
21. Зеников Г.Р., Хижняк С.Д., Иванова А.И., Пахомов П.М. Процессы самоорганизации и гелеобразования в цистеин-серебряном растворе с участием хитозана и электролита // *Коллоидный журнал*. 2024. Т.86. №3. С.317-328. <http://dx.doi.org/10.31857/S0023291224030021>
22. Ершов Н.А., Хижняк С.Д., Иванова А.И., Пахомов П.М. Процессы самосборки и гелеобразования в водных растворах L-цистеина, нитрата серебра и полисахарида каррагинана. // *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия*. 2024. Т.54. №3. С.24-38. DOI 10.26456/vtchem2024.3.3.
23. Богаченков Н.А., Зеников Г.Р., Хижняк С.Д., Иванова А.И., Пахомов П.М. Гидрогели на основе водного раствора L-цистеина и нитрата серебра с альгинатом натрия. // *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия*. 2024. Т.58. №4. С.56-69. DOI 10.26456/vtchem2024.4.6.
24. Комаров П.В., Алексеев В.Г., Хижняк С.Д., Овчинников М.М., Пахомов П.М. Изучение формирования нанокластеров меркаптида серебра в цистеин-серебряном растворе методом атомистической молекулярной динамики. // *Российские нанотехнологии*. 2010. Т.5. №3-4. С.5-13.
25. Бабуркин П.О., Комаров П.В., Малышев М.Д., Хижняк С.Д., Пахомов П.М. Компьютерное моделирование структурообразования в водных растворах L-цистеина и нитрата серебра под влиянием соли инициатора. // *Коллоидный журнал*. 2017. Т.79. №5. С.10-19.

26. Малышев М.Д., Бабуркин П.О., Адамян А.Н., Хижняк С.Д., Пахомов П.М., Комаров П.В. МОЛЕКУЛЯРНО–ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОЗРЕВАНИЯ ЦИСТЕИН-СЕРЕБРЯНОГО РАСТВОРА. // Журнал структурной химии. 2019. Т.60. №8. С.1396-1403.
27. Адамян А.Н., Иванова А.И., Семенова Е.М. и др. Влияние освещения на процесс самоорганизации в цистеин-серебряном растворе // Вестник Тверского государственного университета, Серия: Химия. 2021. Т. 43. № 1. С. 60-68.
28. Баранова О.А., Хижняк С.Д., Пахомов П.М. Влияние величины pH на синтез наночастиц серебра в водном цистеин-серебряном растворе // Журнал структурной химии. – 2016. - №6. – С. 152-158.
29. Shen J.-S., Li D.-H., Zhang M.-Bo., Zhou J., Zhang H. et al. / Langmuir, 2011, 27 (1), P. 481-486; DOI: 10.1021/la103153e
30. I. Odriozola, P. Casuso, I. Loinaz, G. Cabañero, H. Grande, Org. Biomol. Chem., 2011, 9, 5059-5061; DOI: 10.1039/C1OB05520H

Об авторах:

БАРАННИК Александр Андреевич – аспирант 1 года обучения химико-технологического факультета кафедры физической химии Тверского государственного университета (170002, г. Тверь, Садовый пер., д. 35), инженер лаборатории 640 метрологического обеспечения измерения дисперсных параметров аэрозолей, взвесей и порошкообразных материалов ФГУП «ВНИИФТРИ» (141570, г. Солнечногорск, пгт. Менделеево (промзона ВНИИФТРИ); e-mail: aabarannik2001@mail.ru

АВЕРКИН Дмитрий Вадимович – научный сотрудник лаборатории 640 метрологического обеспечения измерения дисперсных параметров аэрозолей, взвесей и порошкообразных материалов ФГУП «ВНИИФТРИ» (141570, г. Солнечногорск, пгт. Менделеево, промзона ВНИИФТРИ); e-mail: averkindmitry@gmail.com

ХИЖНЯК Светлана Дмитриевна – кандидат химических наук, доцент кафедры физической химии, зав. лабораторией спектроскопии ЦКП Тверского государственного университета (170002, г. Тверь, Садовый пер., д. 35); e-mail: sveta_khizhnyak@mail.ru

ИВАНОВА Александра Ивановна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной физики, зав. лабораторией электронной микроскопии ЦКП Тверского государственного университета (170002, г. Тверь, Садовый пер., д. 35); e-mail: alex.ivanova33@mail.ru

ПАХОМОВ Павел Михайлович – доктор химических наук, профессор, зав. кафедрой физической химии Тверского государственного университета (170002, г. Тверь, Садовый пер., д. 35); e-mail: pavel.pakhomov@mail.ru

EFFECT OF ANIONIC SURFACTANTS ON SINGLE-STAGE GEL FORMATION IN LOW-CONCENTRATION AQUEOUS L-CYSTEINE- AgNO_3 -KI SYSTEM

A.A. Barannik^{1,2}, D.V. Averkin², S.D. Khizhnyak¹,
A.I. Ivanova¹, P.M. Pakhomov¹

¹Tver State University, Tver

²All-Russian Research Institute of Physical-Engineering
and Radiotechnical Measurements, Mendeleevo

The work investigated the effect of anionic surfactants based on sodium salts of fatty acids – sodium lauryl sulfate and sodium laurate – on single-stage gelation in low-concentration aqueous systems based on the amino acid L-cysteine, silver nitrate and potassium iodide. Transparent hydrogels stable over time and exhibiting photostability were obtained in the sodium lauryl sulfate concentration range of 0.125-0.375 mM; the ratio of molar concentrations of silver salt to amino acid in all hydrogels was 1.83; the concentration of potassium iodide was 0.75 mM, the concentration of sodium laurate varied from $8 \cdot 10^{-8}$ to $8 \cdot 10^{-7}$ mM. The gelation process in aqueous L-cysteine- AgNO_3 -KI-surfactant systems was studied using vibroviscometry, UV-visible spectroscopy, dynamic light scattering (DLS), electrophoretic light scattering, and scanning electron microscopy (SEM). It was found that anionic surfactants do not initiate gelation in the L-cysteine- AgNO_3 system, but in the presence of potassium iodide they increase the viscosity, stability over time, and photostability of hydrogels. Presumably, the surfactant anion acts as a linker between positively charged cluster chains in the L-cysteine- AgNO_3 system, promoting the formation of a more developed spatial gel network and preventing the reduction of excess Ag(I).

Keywords: hydrogel, silver nanoparticles, anionic surfactants, L-cysteine, silver nitrate, iodide anion, supramolecular structure

Дата поступления в редакцию: 03.09.2025.

Дата принятия в печать: 10.09.2025.