

## ЭЛЕКТРОЛИТНАЯ КОАГУЛЯЦИЯ ГИДРОЗОЛЕЙ ГИДРОКСИДА ГАДОЛИНИЯ И ЕЕ МЕХАНИЗМЫ

В. С. Макулова, А. С. Гродский, И. А. Белова

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

Поступила в редакцию 20.01.2022 г.

**Аннотация.** Синтезирован гидрозоль гидроксида гадолия методом конденсации. Основной характеристикой гидрозоль является их агрегативная устойчивость, в связи чем цель данной работы заключалась в исследовании электролитной коагуляции синтезированного золя при различной концентрации дисперсной фазы. Для этого использовали турбидиметрический метод. В ходе работы были определены такие коллоидно-химические характеристики, как размер и концентрация частиц дисперсной фазы, область pH агрегативной устойчивости гидрозоля, а также проведены электрофоретические исследования. Установлены пороги быстрой коагуляции гидрозоля  $c_{кр}$  электролитами, содержащими одно- и двухзарядные анионы, а именно нитратом и сульфатом натрия. Показано, что коагуляция золя нитратом натрия протекает по концентрационному механизму, при этом значение порога быстрой коагуляции не зависит от концентрации дисперсной фазы и составляет примерно 31 ммоль/л. При агрегации частиц сульфатом натрия коагуляция происходит преимущественно по нейтрализационному механизму. В этом случае значения порогов быстрой коагуляции ниже, чем  $c_{кр}$  в присутствии нитрата натрия, и практически линейно возрастают с увеличением концентрации дисперсной фазы гидрозоля.

Данные, полученные при исследовании электролитной коагуляции золя, и электрофоретические измерения указывают на то, что его агрегативная устойчивость в значительной степени определяется действием электростатического фактора и зависит от значения  $\zeta$ -потенциала частиц, а также pH дисперсионной среды. Исследование обратимости коагуляции гидрозоля показало, что при добавлении нитрата натрия агрегация частиц дисперсной фазы может быть как обратимой (до порога быстрой коагуляции), так и необратимой (при достижении порога быстрой коагуляции и более высоких концентрациях нитрата натрия). Необратимая коагуляция гидрозоля при введении в него сульфата натрия имеет место даже при концентрациях электролита, значительно меньших, чем порог быстрой коагуляции.

Показано, что обратимо частицы в золе агрегируют, взаимофиксируясь на дальних расстояниях (во втором энергетическом минимуме), поскольку потенциальный барьер, препятствующий их агрегации в первом минимуме, в этих условиях снижается незначительно. Необратимая коагуляция гидрозоля имеет место при существенных изменениях в параметрах двойного электрического слоя на поверхности частиц, в результате чего потенциальный барьер исчезает, а частицы агрегируют в первом энергетическом минимуме, образуя между собой довольно прочные связи, не разрушаемые при воздействии ультразвукового поля.

**Ключевые слова:** гидрозоль гидроксида гадолия, агрегативная устойчивость, электролитная коагуляция, механизм коагуляции, обратимость агрегации частиц.

В последнее время заметно увеличился интерес к редкоземельным элементам. Это связано с возросшим спросом на материалы, обладающие уникальными свойствами, что, в свою очередь, вызвало увеличение научных исследований, посвященных редкоземельным элементам и наночастицам на их основе. Так, наночастицы оксида самария могут проявлять каталитическую актив-

ность [1], а также являться газочувствительным покрытием для оптоволокна при изготовлении датчиков газа [2]. Нанокристаллические структуры оксида иттрия, легированные эрбием, обладают люминесцентными свойствами [3]. Наночастицы оксида европия выступают в качестве нанолюминофоров и флуоресцентных меток [4], входят в состав нанокompозитов, являющихся суперконденсаторами [5], а также являются легирующими агентами, придающими соединениям

люминесцентные свойства [6, 7], в частности, наночастицам оксида гадолиния, что позволяет улучшить визуализацию при их сочетании с радиофармацевтическими препаратами [8]. Соединения на основе гадолиния, преимущественно в виде наночастиц, могут быть перспективными материалами для создания контрастных агентов для магнитно-резонансной томографии, а также для адресной доставки лекарственных средств [9, 10].

Одним из актуальных направлений является получение и изучение нанодисперсий (гидрозолей) на основе редкоземельных элементов. Так, все больший интерес представляет использование данных систем в методах золь-гель технологии. На сегодняшний день этот метод является востребованным во многих областях, т. к. позволяет не только улучшать свойства традиционных материалов, но и создавать принципиально новые. В частности, авторами работы [11] предложен метод синтеза полимерных нанокомпозитов, обладающих магнитными свойствами, с использованием золей оксида гадолиния в качестве прекурсора, а также нанокомпозитов, стойких к УФ-деградации, с использованием золей оксидов цинка и церия.

Для создания композиций, в которых в качестве исходных компонентов используются гидрозоли, должна обеспечиваться седиментационная и агрегативная устойчивость этих золей, в том числе устойчивость к входящим в состав композиций электролитам. В связи с этим целью данной работы являлось получение устойчивого гидрозоля гидроксида гадолиния и исследование его коагуляции электролитами.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для получения гидрозоля гидроксида гадолиния использовали метод конденсации. Образование нерастворимых частиц дисперсной фазы происходило в результате взаимодействия водных растворов хлорида гадолиния и аммиака. Синтез проводили в кипящей дистиллированной воде. После охлаждения системы наблюдалось образование осадка, который формировался вследствие агрегации частиц, вызванной высокой ионной силой дисперсионной среды. Для удаления избытка электролита проводили промывку полученного осадка дистиллированной водой следующим образом: его помещали в пробирку центрифуги, смешивали с определенным объемом дистиллированной воды и центрифугировали со скоростью 3000 об/мин в течение 10 минут, затем удаляли из пробирок надосадочную

жидкость. Эту процедуру повторяли несколько раз. Степень промывки осадка контролировали по электропроводности промывных вод. Промытый осадок смешивали с определенным объемом дистиллированной воды и подвергали воздействию ультразвукового поля частотой 22 кГц в течение двух минут, в результате чего получали опалесцирующий золь [12]. Данная методика позволила получить устойчивый к седиментации гидрозоль, не изменяющий дисперсный состав в течение длительного времени (контроль осуществляли в течение трех месяцев).

Размер частиц дисперсной фазы и их  $\zeta$ -потенциал находили при помощи анализатора размеров частиц и дзета-потенциала Photocor Compact-Z. Концентрацию гидрозоля определяли методом фотометрического титрования [13], коагуляцию изучали турбидиметрическим методом [14] с помощью фотометра КФК-3-01 «ЗОМЗ» при длине волны 440 нм, выбранной по спектру поглощения гидрозоля. Определение значений рН гидрозоля проводили с использованием прибора рН Meter HI 2210 «HANNA» со стеклянным электродом.

Была предпринята попытка определить состав частиц дисперсной фазы гидрозоля на основе данных рентгенофазового анализа, однако рентгенограмма порошка, полученного из золя с помощью лиофильной сушки, показала, что частицы являлись слабозакристаллизованными. Это не позволило сделать правильные выводы о химическом составе дисперсной фазы. В связи с этим состав частиц определяли методом компьютерного моделирования с помощью программного обеспечения SPECIES «Academic Software». Использовали константы устойчивости различных форм гидроксида гадолиния, рассчитанные в работе [15].

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Синтезированный гидрозоль имел рН среды 8 единиц и концентрацию дисперсной фазы 18.1 г/л. Средний гидродинамический размер частиц составил 30-40 нм. Данные электрофоретических измерений показали, что частицы дисперсной фазы заряжены положительно, и их электрокинетический потенциал равен 40 мВ, из чего следует, что частицы в золе являются сильнозаряженными.

Зависимости концентраций основных форм гадолиния, выраженных в процентах от общего содержания гадолиния в системе, от рН среды представлены на рисунке 1. Из него следует, что в анализируемой системе могут быть различные

формы гадолиния, но при  $\text{pH} = 8.0$  в ней преобладают формы гидроксида гадолиния (III). Учитывая это, в дальнейшем будем называть исследуемую дисперсную систему гидрозолеом гидроксида гадолиния.

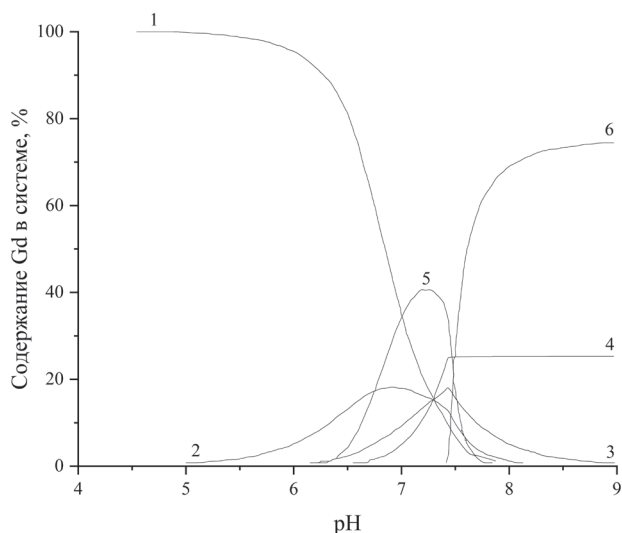


Рис. 1. Зависимости концентраций (%) основных форм гадолиния от общего содержания гадолиния в системе, от  $\text{pH}$  среды: 1 –  $\text{Gd}^{3+}$ , 2 –  $\text{GdOH}^{2+}$ , 3 –  $\text{Gd(OH)}_2^+$ , 4 –  $\text{Gd(OH)}_3$ , 5 –  $\text{Gd}_3(\text{OH})_4^-$ , 6 –  $\text{Gd(OH)}_3$  крист.

Устойчивость дисперсных систем с водной дисперсионной средой существенно зависит от ее значений  $\text{pH}$  [14, 16, 17]. В связи с этим вначале проводили определение области  $\text{pH}$  агрегативной устойчивости синтезированного гидрозоля. Из рисунка 2 видно, что данная область находится в интервале значений  $\text{pH}$  от 7.5 до 9.8, поскольку при этих  $\text{pH}$  оптическая плотность золя не изменяется.

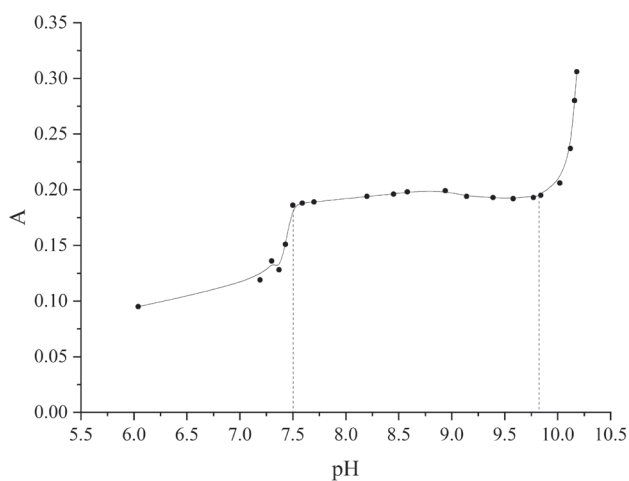


Рис. 2. Зависимость оптической плотности от  $\text{pH}$  дисперсионной среды гидрозоля

На представленной зависимости  $D = f(\text{pH})$  можно выделить еще два участка: при  $\text{pH} > 9.7$  оптическая плотность золя резко возрастает, что указывает на протекание агрегации частиц, а при  $\text{pH} < 7.5$  оптическая плотность со снижением  $\text{pH}$  уменьшается, что связано с растворением частиц дисперсной фазы.

Для определения факторов устойчивости частиц дисперсной фазы исследуемого гидрозоля к агрегации изучали кинетику коагуляции разбавленного гидрозоля электролитами, содержащими однозарядные и двухзарядные коагулирующие ионы. Исследования проводили при различных концентрациях электролитов в золе, в качестве которых были использованы нитрат и сульфат натрия. Кинетические кривые  $D = f(\tau)$  гидрозоля с концентрацией 2 г/л в присутствии нитрата натрия показаны на рис. 3. Из представленных зависимостей видно, что при концентрации электролита  $c_{\text{эл}}$ , равной 10 ммоль/л, оптическая плотность системы со временем практически не изменяется, что говорит о ее агрегативной устойчивости. При концентрациях нитрата натрия 20 ммоль/л и выше наблюдается рост оптической плотности системы, что свидетельствует об образовании агрегатов из частиц дисперсной фазы. Вид кинетических кривых, полученных при введении нитрата натрия с еще более высокой концентрацией, практически совпадает с кривой 4, представленной на рисунке 3.

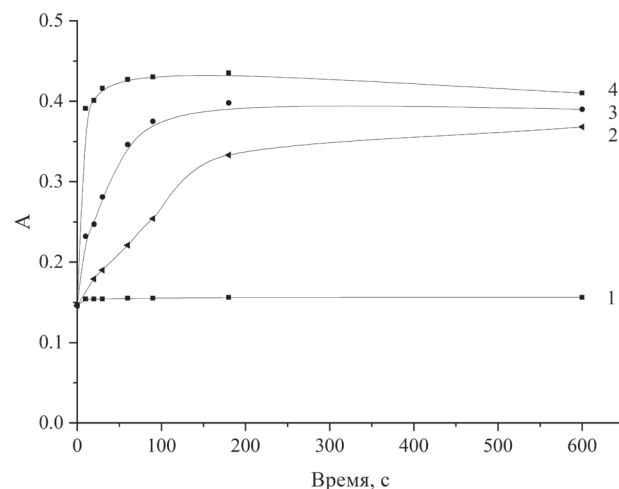


Рис. 3. Зависимости оптической плотности гидрозоля с концентрацией 2 г/л от времени при различных концентрациях нитрата натрия: 1 – 10 ммоль/л; 2 – 20 ммоль/л; 3 – 25 ммоль/л; 4 – 30 ммоль/л.

Зависимости  $D = f(\tau)$ , полученные для исследуемого гидрозоля при введении в него сульфата натрия – электролита с двухзарядным коагулиру-

ющим ионом – имеют аналогичный вид (рис. 4), но в этом случае агрегация частиц происходит при значительно меньших концентрациях электролита.

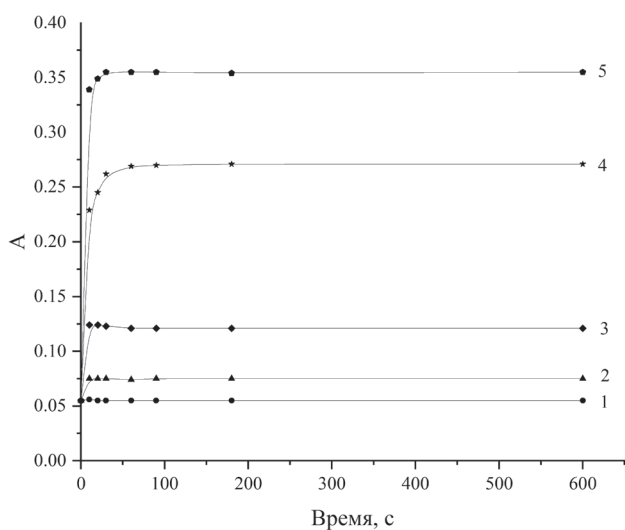


Рис. 4. Зависимости оптической плотности гидрозоля с концентрацией 2 г/л от времени при различных концентрациях сульфата натрия: 1 – 0.05 ммоль/л; 2 – 0.15 ммоль/л; 3 – 0.35 ммоль/л; 4 – 0.5 ммоль/л; 5 – 0.8 ммоль/л.

По зависимостям  $D = f(\tau)$  рассчитывали значения порогов быстрой коагуляции  $c_{кр}$  в соответствии с методикой, приведенной в [14]. Для этого по линейным участкам роста оптической плотности гидрозоля находили значения  $\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{dD}{d\tau}$ , строили их зависимости от концентрации электролита и определяли  $c_{кр}$  (рис. 5).

Полученные таким образом значения  $c_{кр}$  золя с различной концентрацией дисперсной фазы приведены в таблице 1. Из нее видно, что значения порогов быстрой коагуляции в присутствии нитрата натрия почти на два порядка выше, чем значения  $c_{кр}$ , установленные для золя, в который вводился сульфат натрия. Из таблицы 1 также следует, что для указанных электролитов наблюдается разная зависимость  $c_{кр}$  от концентрации дисперсной фазы в золе. Так, с ростом концентрации

гидрозоля гидроксида гадолиния при введении в него нитрата натрия значение  $c_{кр}$  практически не изменяется. При введении же в золь сульфата натрия значения  $c_{кр}$  закономерно повышаются, причем почти линейно.

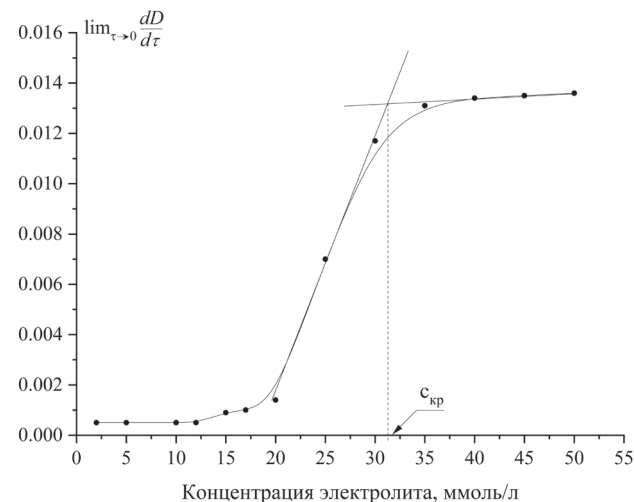


Рис. 5. Зависимость  $\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{dD}{d\tau}$  от концентрации нитрата натрия для гидрозоля с концентрацией 2 г/л.

Последнее указывает на преимущественно нейтрализационный механизм коагуляции исследуемого гидрозоля в присутствии сульфата натрия, который ведет себя как неиндифферентный электролит, коагулирующее действие которого, прежде всего, связано со специфической адсорбцией сульфат-ионов на поверхности частиц и частичной нейтрализацией их заряда, а соответственно, и уменьшением сил их электростатического отталкивания. Однозарядные нитрат-ионы не обладают подобной адсорбционной способностью. Поэтому при введении в золь гидроксида гадолиния нитрата натрия наблюдаемая быстрая коагуляция протекает по другому механизму, обусловленному, в первую очередь, сжатием двойного электрического слоя на поверхности частиц, в результате чего действие сил их электростатического отталкивания также ослабляется.

На основании изложенного можно заключить, что агрегативная устойчивость синтезированного

Таблица 1

Значения порогов быстрой коагуляции  $c_{кр}$  гидрозоля гидроксида гадолиния при различных концентрациях дисперсной фазы ( $pH = 7.6-7.8$ )

Концентрация гидрозоля, г/л	Порог быстрой коагуляции $c_{кр}$ в присутствии нитрата натрия, ммоль/л	Порог быстрой коагуляции $c_{кр}$ в присутствии сульфата натрия, ммоль/л
0.5	–	0.33
1.0	32	0.51
1.5	31	0.63
2.0	31.5	0.85
2.5	30	–

гидрозоля определяется преимущественно электростатическим фактором. На это, в частности, указывают и данные электрофоретических исследований гидрозоля при различных концентрациях нитрата натрия (рис. 6), а также зависимость  $\zeta$ -потенциала частиц дисперсной фазы от pH среды (рис. 7).

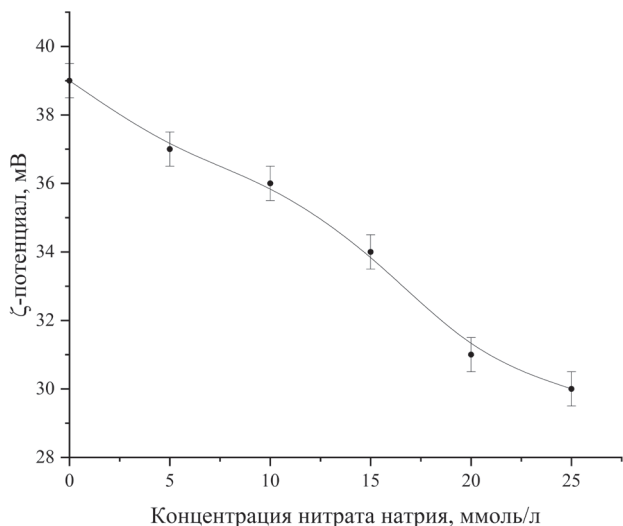


Рис. 6. Зависимость  $\zeta$ -потенциала частиц дисперсной фазы гидрозоля от концентрации нитрата натрия

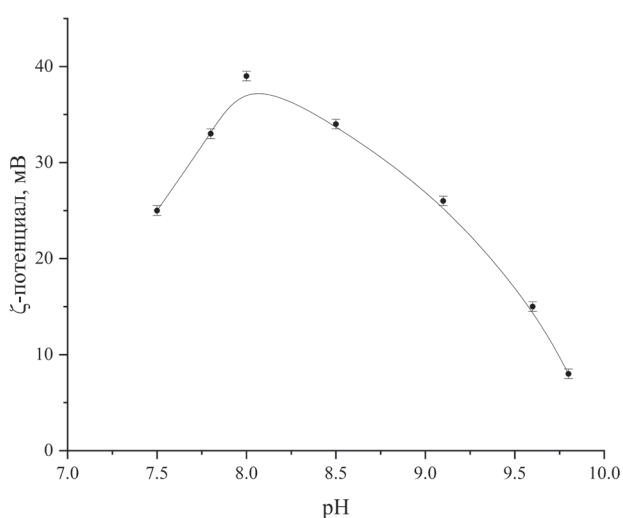


Рис. 7. Зависимость  $\zeta$ -потенциала частиц дисперсной фазы гидрозоля от pH дисперсионной среды.

Различие при коагуляции гидрозоля гидроксида гадолиния в присутствии нитрата и сульфата натрия проявляется не только в механизме процесса, но и в прочности контактов, возникающих между частицами при их агрегации. Этот вывод был сделан на основании результатов, полученных при исследовании обратимости коагуляции синтезированного золя. Как и ранее, процессы, протекающие в золе, контролировали, измеряя изменение его оптической плотности во времени. Обратимость коагуляции из-

учали следующим образом. После введения в золь электролита и достижения постоянного значения оптической плотности системы, ее подвергали кратковременному воздействию ультразвукового поля (в течение 10 секунд). Затем после выхода оптической плотности на максимальные значения систему опять несколько раз подвергали десятисекундному воздействию ультразвука. Полученная таким образом зависимость  $D = f(\tau)$  для золя с концентрацией нитрата натрия 20 ммоль/л представлена на рисунке 8. Из него видно, что при данной концентрации нитрата натрия, которая меньше порогового значения  $c_{кр}$ , в результате воздействия ультразвуком происходит полное разрушение агрегатов, о чем свидетельствует снижение значения оптической плотности до уровня оптической плотности исходного золя. Из рисунка 8 также следует, что в данном образце после прекращения действия ультразвукового поля разрушенные контакты между частицами быстро восстанавливаются, поскольку оптическая плотность системы вновь повышается, а при последующем воздействии ультразвука и его снятии процессы дезагрегирования и агрегации частиц в золе повторяются.

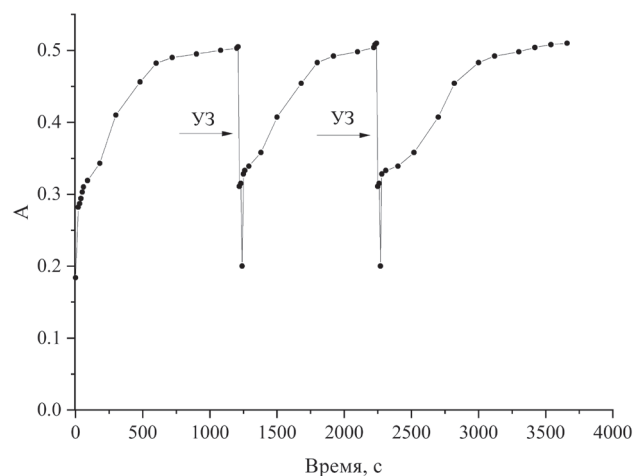


Рис. 8. Изменение оптической плотности гидрозоля ( $c = 2$  г/л) после введения раствора нитрата натрия ( $c_{эл} = 20$  ммоль/л) и последующего воздействия ультразвука

Описанные эффекты наблюдались и при других концентрациях дисперсной фазы в гидрозоле, если концентрация нитрата натрия была меньше  $c_{кр}$ . Если же концентрация этого электролита превышала пороговое значение, золь при любых его концентрациях коагулировал необратимо, и после десятисекундного ультразвукового облучения агрегаты, образовавшиеся в нем, не разрушались, наблюдался даже небольшой рост оптической плотности системы во времени. Рассмотренные эффекты иллюстрирует рисунок 9, на котором по-



казано изменение оптической плотности золя после введения в него раствора нитрата натрия (его концентрация в золе составляла 40 ммоль/л) и последующего воздействия ультразвука. Необратимая агрегация частиц в золе наблюдалась также и при введении в него сульфата натрия, причем даже при концентрациях последнего, существенно меньших порогового значения  $c_{кр}$ .

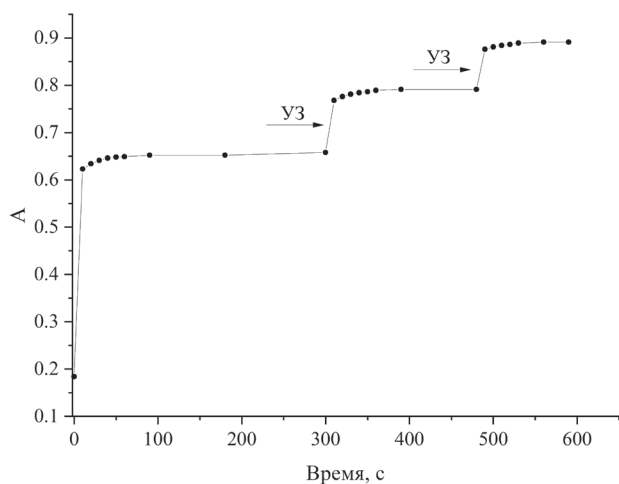


Рис. 9. Изменение оптической плотности гидрозоль ( $c = 2$  г/л) после введения раствора нитрата натрия ( $c_{эл} = 40$  ммоль/л) и последующего воздействия ультразвука.

Обратимость коагуляции исследуемого золя нитратом натрия при концентрациях, не превышающих  $c_{кр}$ , согласно [18-20] можно объяснить тем, что в этом случае частицы дисперсной фазы агрегируют на дальних расстояниях (во втором энергетическом минимуме на потенциальной кривой их взаимодействия). На таких расстояниях между частицами возникают самые слабые, так называемые коагуляционные контакты [21], и они могут быть легко разрушены при механическом воздействии, в частности, в результате ультразвуковой кавитации.

Необратимость коагуляционного процесса в гидрозоль гидроксида гадолиния, наблюдаемая при введении в него сульфата натрия и нитрата натрия при концентрациях последнего, превышающих  $c_{кр}$ , указывает на то, что в этих условиях между частицами возникают довольно прочные контакты, что возможно только в том случае, если частицы агрегируют на близких расстояниях, т.е. в первом энергетическом минимуме.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование электролитной коагуляции гидрозоль гидроксида гадолиния показало, что частицы в нем могут агрегировать как необратимо,

образуя контакты в первом энергетическом минимуме, так и обратимо на дальних расстояниях (во втором энергетическом минимуме). Обратимая агрегация наблюдается при введении в золь электролитов с однозарядными анионами при концентрациях, не превышающих порог быстрой коагуляции  $c_{кр}$ . Гидрозоль необратимо коагулирует при концентрациях нитрата натрия, превышающих 30 ммоль/л. Необратимая коагуляция золя при введении в него сульфата натрия имеет место даже при концентрациях, значительно меньших  $c_{кр}$ .

При введении в гидрозоль электролитов, содержащих однозарядные анионы, частицы агрегируют по концентрационному механизму за счет сжатия диффузной части двойного электрического слоя на их поверхности. Введение в золь электролитов, содержащих двухзарядные анионы, приводит к его коагуляции по нейтрализационному механизму, что обусловлено, прежде всего, уменьшением поверхностного и, соответственно, электрокинетического потенциала частиц.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gao J., Zhao Y., Yang W., Tian J., Guan F., Ma Y., Hou J., Kang J., Wang Y. // *Materials Chemistry and Physics*. 2002. Vol. 77, No. 1, pp. 65-69.
- Renganathan B., Sastikumar D., Srinivasan R., Ganesan A.R. // *Materials Science and Engineering: B*. 2014. Vol. 186, pp. 122-127.
- Vetrone F., Boyer J.C., Capobianco J.A., Speghini A., Bettinelli M. // *J. Mater. Res*. 2004. Vol. 19, No. 11, pp. 3398-3407.
- Pavlovich O. V. // *Biotechnologia Acta*. 2014. Vol. 7, No. 1, pp. 117-122.
- Aryanrad P., Naderi H.R., Kohan E., Ganjali M.R., Baghernejade M., Dezfuli A.S. // *RSC Adv*. 2020. Vol. 10, 17543-17551.
- Mandal P., Singh U.P., Roy S. // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron*. 2021. Vol. 32, pp. 3958-3965.
- Bordun O.M., Bordun I.O., Kukharsky I.Yo., Kofliuk I.N. // *J. Appl. Spectrosc*. 2019. Vol. 86, pp. 711-714.
- Shi X., Cao C., Zhang Z., Tian J., Hu Z. // *J. Nanobiotechnol*. 2021. Vol. 19, Art. numb. 212.
- Singh G., McDonagh B.H., Hak S., Peddis D., Bandopadhyay S., Sandvig I., Sandvigef A., Glommbg W.R. // *J. Mater. Chem. B*. 2017. Vol. 5, pp. 418-422.
- Stefanakis D., Ghanotakis D.F. // *J. Nanopart. Res*. 2010. Vol. 12, pp. 1285-1297.
- Шаповров А.С., Ванцев А.С., Кирюхин Д.П., Соколов М.Н., Бузник В.М. // *Конденсиро-*

ванные среды и межфазные границы. 2011. Т. 13. №3. С. 374-380.

12. Макулова В.С., Белова И.А., Гродский А.С., Григорьев Д.Ю. // «Новые материалы и перспективные технологии», сборник материалов Пятого междисциплинарного научного форума с международным участием, 30 октября – 1 ноября 2019 г., Москва, 2019, Т. I, С. 173-175.

13. Нипрук О.В., Кирьянов К.В., Пыхова Ю.П., Святкина С.В., Кулешова Н.В. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2008. №2. С. 54-61.

14. Белова И.А., Гродский А.С., Киенская К.И. // Известия Вузов. Химия и хим. технология. 2009. Т. 52. №11. С. 70-73.

15. Kragten J., Desno-Weever L.G. // Talanta. 1980. Vol. 27, pp. 1047-1050.

16. Шабанова Н.А., Попов В.В., Саркисов П.Д. Химия и технология нанодисперсных окси-

дов: учебное пособие. Москва, ИКЦ «Академкнига», 2006, 309 с.

17. Нейман Р.Э. Коагуляция синтетических латексов. Воронеж, Издательство Воронежского университета, 1967, 187 с.

18. Гродский А.С., Шабанова Н.А., Александрова Е.М. // VI Конференция по поверхностным силам, сборник докладов, 14-16 мая 1979 г., Москва, 1979, с. 45.

19. Белова И.А., Киенская К.И., Гродский А.С., Назаров В.В. // Коллоидный журнал. 2008. Т. 70. №5. С. 601-606.

20. Малова А.В., Гродский А.С., Белова И.А. // Коллоидный журнал. 2016. Т. 78. №4. С. 450-457.

21. Назаров В.В., Гродский А.С. Коллоидная химия. Практикум и задачник: учебное пособие. Санкт-Петербург, Издательство «Лань», 2019, 436 с.

*Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева*

*\*Макулова В. С., аспирант кафедры коллоидной химии*

*E-mail: makulova.v.s@muctr.ru*

*Гродский А. С., кандидат химических наук, доцент кафедры коллоидной химии*

*E-mail: grodskii.a.s@muctr.ru*

*Белова И. А., кандидат химических наук, доцент кафедры коллоидной химии*

*E-mail: belova.i.a@muctr.ru*

*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia*

*\*Makulova V. S., postgraduate student, Department of Colloidal Chemistry*

*e-mail: makulova.v.s@muctr.ru*

*Grodskii A. S., PhD, Associate Professor, Department of Colloidal Chemistry*

*e-mail: grodskii.a.s@muctr.ru*

*Belova I. A., PhD, Associate Professor, Department of Colloidal Chemistry*

*e-mail: belova.i.a@muctr.ru*

## ELECTROLYTE COAGULATION OF GADOLINIUM HYDROXIDE HYDROSOLS AND ITS MECHANISMS

V. S. Makulova, A. S. Grodskii, I. A. Belova

*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia*

**Abstract.** The hydrosol of gadolinium hydroxide was synthesized by the condensation method. The main characteristic of hydrosols is their aggregative stability, in connection with which the purpose of this work was to study the electrolyte coagulation of the synthesized sol at different concentrations of the dispersed phase. The turbidimetric method was used for this. In the course of the work, such colloid-chemical characteristics as the size and concentration of particles of the dispersed phase, the pH range of the aggregative stability of the hydrosol were determined, and electrophoretic measurements were carried out. The thresholds of rapid coagulation of the hydrosol  $c_{cr}$  by electrolytes containing singly and doubly charged anions, namely, sodium nitrate and sulfate, have been established. It is shown that the coagulation of the sol with sodium nitrate proceeds according to the concentration mechanism, while the value of the rapid coagulation threshold does not depend on the concentration of the dispersed phase and is about 31 mmol/l. When particles are aggregated with sodium sulfate, coagulation occurs predominantly by the neutralization mechanism. In this case, the values of the rapid coagulation thresholds are lower than  $c_{cr}$  in the presence of

sodium nitrate and increase almost linearly with an increase in the concentration of the dispersed phase of the hydrosol.

The data obtained by investigation of the electrolyte coagulation of the sol and electrophoretic measurements indicate that its aggregative stability is largely determined by the action of the electrostatic factor and depends on the value of the  $\zeta$ -potential of the particles as well as the pH of the dispersion medium. A study of the reversibility of hydrosol coagulation showed that when sodium nitrate is added, the aggregation of particles of the dispersed phase can be both reversible (up to the rapid coagulation threshold) and irreversible (when the rapid coagulation threshold is reached and higher sodium nitrate concentrations are reached). Irreversible coagulation of the hydrosol when sodium sulfate is added to it takes place even at electrolyte concentrations much lower than the rapid coagulation threshold.

It is shown that the particles in the sol aggregate reversibly, interlocking at long distances (in the second energy minimum), since the potential barrier preventing their aggregation in the first minimum decreases insignificantly under these conditions. Irreversible coagulation of the hydrosol takes place with significant changes in the parameters of the electric double layer on the surface of the particles, as a result of which the potential barrier disappears and the particles aggregate in the first energy minimum, forming fairly strong bonds between themselves that are not destroyed when exposed to an ultrasonic field.

**Keywords:** gadolinium hydroxide hydrosol, aggregation stability, electrolyte coagulation, coagulation mechanism, reversibility of particle aggregation.

## REFERENCES

- Gao J., Zhao Y., Yang W., Tian J., Guan F., Ma Y., Hou J., Kang J., Wang Y., *Materials Chemistry and Physics*, 2002, Vol. 77, No. 1, pp. 65-69.
- Renganathan B., Sastikumar D., Srinivasan R., Ganesan A.R., *Materials Science and Engineering: B*, 2014, Vol. 186, pp. 122-127.
- Vetrone F., Boyer J.C., Capobianco J.A., Speghini A., Bettinelli M., *J. Mater. Res.*, 2004, Vol. 19, No. 11, pp. 3398-3407.
- Pavlovich O.V., *Biotechnologia Acta*, 2014, Vol. 7, No. 1, pp. 117-122.
- Aryanrad P., Naderi H.R., Kohan E., Ganjali M.R., Baghernejade M., Dezfali A.S., *RSC Adv.*, 2020, Vol. 10, 17543-17551.
- Mandal P., Singh U.P., Roy S., *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2021, Vol. 32, pp. 3958-3965.
- Bordun O.M., Bordun I.O., Kukharsky I.Yo., Kofliuk I.N., *J. Appl. Spectrosc.*, 2019, Vol. 86, pp. 711-714.
- Shi X., Cao C., Zhang Z., Tian J., Hu Z. // *J. Nanobiotechnol.*, 2021, Vol. 19, Art. numb. 212.
- Singh G., McDonagh B.H., Hak S., Peddis D., Bandopadhyay S., Sandvig I., Sandvigef A., Glommbg W.R., *J. Mater. Chem. B*, 2017, Vol. 5, pp. 418-422.
- Stefanakis D., Ghanotakis D.F., *J. Nanopart. Res.*, 2010, Vol. 12, pp. 1285-1297.
- Shaporev A.S., Vanetsev A.S., Kiryukhin D.P., Sokolov M.N., Buznik V.M., *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy*, 2011, Vol. 13, No. 3, pp. 374-380.
- Makulova V.S., Belova I.A., Grodskii A.S., Grigor'ev D.Yu., «New materials and perspective technologies», *Proceedings of the 5th interdisciplinary scientific forum with international participation*, October 30 – November 1, 2019, Moscow, 2019, Vol. I, pp. 173-175.
- Nipruk O.V., Kir'yanov K.V., Pykhova Yu.P., Svyatkina S.V., Kuleshova N.V., *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*, 2008, No. 2, pp. 54-61.
- Belova I.A., Grodskii A.S., Kienskaya K.I., *Izvestiya Vuzov. Khimiya i khim. tekhnologiya*, 2009, Vol. 52, No. 11, pp. 70-73.
- Kragten J., Decno-Weever L.G., *Talanta*, 1980, Vol. 27, pp. 1047-1050.
- Shabanova N.A., Popov V.V., Sarkisov P.D. *Khimiya i tekhnologiya nanodispersnykh oksidov: uchebnoe posobie*. Moscow, IKTs «Akademkniga», 2006, 309 p.
- Neiman R.E. *Koagulyatsiya sinteticheskikh lateksov*. Voronezh, Izdatel'stvo Voronezhskogo universiteta, 1967, 187 p.
- Grodskii A.S., Shabanova N.A., Aleksandrova E.M. VI Konferentsiya po poverkhnostnym silam, sbornik dokladov, May 14-16, 1979, Moscow, 1979, p. 45.
- Belova I.A., Kienskaya K.I., Grodskii A.S., Nazarov V.V., *Colloid J.*, 2008, Vol. 70, No. 5. pp. 601-606.
- Malova A.V., Grodskii A.S., Belova I.A., *Colloid J.*, 2016. Vol. 78, No. 4. pp. 450-457.
- Nazarov V.V., Grodskii A.S. *Kolloidnaya khimiya. Praktikum i zadachnik: uchebnoe posobie*. Saint Petersburg, Publ. «Lan'», 2019, 436 p.