

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРУКТУРИРОВАННОГО ГИДРОЗОЛЯ ГИДРОКСИДА ГАДОЛИНИЯ

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

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

Поступила в редакцию 05.05.2022 г.

Аннотация. Из гидрозоля гидроксида гадолиния получен гель с концентрацией $Gd(OH)_3$, равной 62.4 г/л, путем концентрирования с помощью роторного испарителя без добавления электролитов. Проведены реологические исследования систем с концентрацией гидроксида гадолиния от 18.1 до 62.4 г/л. Получены кривые течения, характерные для дисперсных систем с жидкообразной структурой коагуляционного типа. Установлено, что структурированный гидрозоль обладает тиксотропными свойствами. Контакты между частицами в подобных структурах чаще всего возникают на расстояниях второго энергетического минимума. Возможность образования таких контактов в данном случае вызвана существенным ростом ионной силы при концентрировании гидрозоля, а также проявлением коллективного взаимодействия между частицами.

Рассчитана плотность частиц дисперсной фазы и ее эффективная объемная доля $\varphi_{эф}$, т.е. объемная доля, занимаемая частицами дисперсной фазы с учетом наличия воды, связанной частицами. Установлено, что частицы дисперсной фазы в гидрозоле гидроксида гадолиния содержат 20 масс. % связанной воды.

Прочность образовавшихся структур в гидрозоле гидроксида гадолиния с различной эффективной объемной долей дисперсной фазы характеризовали пределом текучести по Бингаму. Следует отметить, что прочность пространственной структуры в гидрозоле с увеличением объемной доли дисперсной фазы возрастает нелинейно, и наблюдается ее резкий рост при $\varphi_{эф} \geq 3$ об. %. Вероятнее всего это связано с деформацией поверхностных слоев на частицах, образующих структурную сетку, и с уменьшением расстояния взаимофиксации частиц во втором энергетическом минимуме. Образование связей между частицами в первом минимуме в данном случае вследствие отсутствия электролита в гидрозоле становится невозможным.

Структура, образующаяся в исследуемых системах, имела невысокую прочность, но даже при больших напряжениях сдвига пространственная сетка из частиц дисперсной фазы полностью не разрушалась, и минимальная вязкость гидрозоля в зависимости от его концентрации составляла от нескольких мПа·с до 77 мПа·с. Такой вывод подтверждается расчетами значений минимальной вязкости при полном разрушении структур, которые показали, что в этом случае они должны быть всего 0.98-1.76 мПа·с.

Ключевые слова: структурированный гидрозоль, гидроксид гадолиния, реологические свойства, эффективная объемная доля, тиксотропия, предел текучести.

Получение и исследование соединений на основе редкоземельных элементов на сегодняшний день является одним из актуальных направлений. Они обладают рядом уникальных характеристик, поэтому их используют для получения новых материалов в таких отраслях, как медицина [1, 2], лазерная техника и электроника [3], производство стекла и оптически прозрачной керамики [4, 5].

При создании различных композиций целесообразно вводить соединения редкоземельных элементов в высокодисперсном виде, так как это

приводит к более равномерному распределению добавок по объему системы и может способствовать уменьшению их количества, что позволяет удешевить конечную стоимость продукта. Одним из способов получения таких материалов является золь-гель технология, которая находит все более широкое применение [6, 7].

Получаемые дисперсные системы по своим характеристикам должны соответствовать определенным требованиям. Основными из них являются агрегативная устойчивость для золь и оптимальные реологические характеристики для

концентрированных структурированных систем. Гидрозоли кислородсодержащих соединений редкоземельных элементов, в частности гадолиния, имеют склонность к образованию пространственных структур, в связи с чем в данной работе проводили изучение реологических свойств структурированного гидрозоля гидроксида гадолиния.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Гидрозоль гидроксида гадолиния получали методом конденсации в соответствии с методикой, представленной в работе [8].

Для исследования структурно-механических свойств гидрозоля осуществляли его концентрирование с помощью роторного испарителя IKA RV10.

Измерение реологических характеристик проводили с использованием ротационного вискозиметра Реотест-2, работающего в режиме постоянной скорости сдвига, рабочий узел которого представлял собой систему коаксиальных цилиндров.

Концентрацию гидроксида гадолиния в гидрозоле находили методом фотометрического титрования в соответствии с методикой, приведенной в работе [9]. Для этого гидрозоль переводили в ионную форму путем добавления ацетатного буферного раствора с $\text{pH} = 4$, при котором происходило полное растворение частиц дисперсной фазы, сопровождающееся появлением в жидкой фазе ионов Gd^{3+} , концентрацию которых и определяли. Затем данную концентрацию пересчитывали на гидроксид гадолиния.

Плотность гидрозоля с различной концентрацией дисперсной фазы определяли с помощью анализатора плотности жидкостей DA-130N Kyoto Electronics.

Потерю массы при высушивании образца геля гидроксида гадолиния находили следующим образом: точную навеску геля помещали в предварительно высушенный до постоянной массы бюкс и выдерживали ее 2 ч при 110°C , затем бюкс помещали в эксикатор для охлаждения и взвешивали. Последующие взвешивания проводили после каждого часа дальнейшего высушивания до достижения постоянной массы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате концентрирования гидрозоля гидроксида гадолиния с концентрацией 18.1 г/л, средним размером частиц дисперсной фазы, составляющим 30 нм, и $\text{pH} = 8$, при котором золь агрегативно устойчив, был получен гель, имеющий концентрацию $\text{Gd}(\text{OH})_3$, равную 62.4 г/л. Реологические ис-

следования проводили для систем, концентрация которых находилась в диапазоне данных значений. На рисунке 1 представлены полученные кривые течения. Все они имеют вид, характерный для систем с жидкообразной структурой коагуляционного типа [10-12]. Образование таких структур наблюдалось даже при небольших концентрациях вещества, составляющего дисперсную фазу гидрозоля.

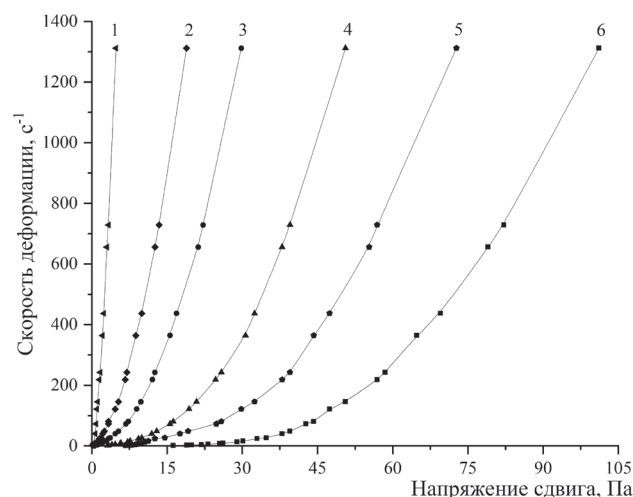


Рис. 1. Кривые течения гидрозоля гидроксида гадолиния при концентрациях (г/л) дисперсной фазы: 1 – 18.1, 2 – 40, 3 – 46, 4 – 55, 5 – 59, 6 – 62.4.

Прочность образовавшейся структурной сетки, учитывая вид кривых течения, характеризовали пределом текучести по Бингаму P_T , значения которого находили экстраполяцией линейных участков кривых течения в области высоких скоростей сдвига на ось абсцисс. Из рисунка 1 видно, что прочность пространственной структуры в золе возрастает с увеличением концентрации гидроксида гадолиния, но нелинейно.

Структурированный гидрозоль обладает тиксотропными свойствами [13], об этом свидетельствует характер кривых течения, полученных в режиме нагрузка-разгрузка (рисунок 2). Контакты между частицами в этих структурах возникают, скорее всего, на расстояниях второго энергетического минимума, т.е. при взаимофиксации частиц на дальних расстояниях. Возможность образования таких контактов в структурированных гидрозолях $\text{Gd}(\text{OH})_3$ без введения электролитов, в отличие от разбавленных систем, вызвана, прежде всего, существенным ростом ионной силы при концентрировании, а также проявлением коллективного взаимодействия между частицами [14, 15].

Во всех исследуемых системах образующиеся структуры имеют сравнительно невысокую прочность, но, несмотря на это, полного разрушения

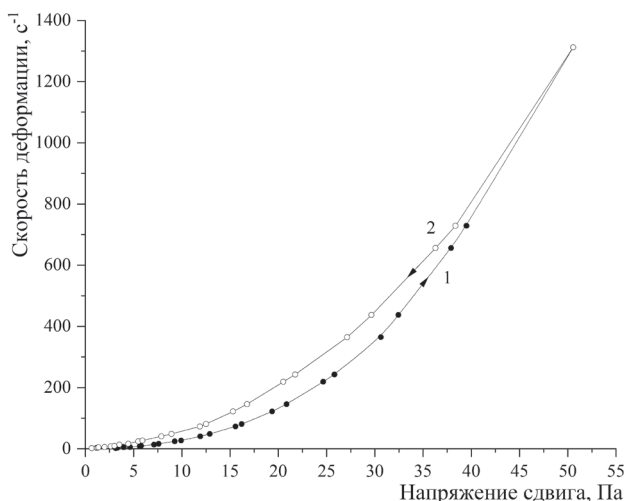


Рис. 2. Кривые течения гидрозоля гидроксида гадолиния с концентрацией 55 г/л, полученные при нагрузке (1) и разгрузке (2).

всех контактов между частицами при больших напряжениях сдвига не происходит, и эффективная вязкость гидрозолей не достигает постоянных минимальных значений. Этот вывод подтверждается расчетом минимальной вязкости η_{\min} по уравнению Эйнштейна при условии полного разрушения структурной сетки:

$$\eta_{\min} = \eta_0 (1 + \alpha \varphi_{\text{эф}}), \quad (1)$$

где η_0 – вязкость дисперсионной среды, α – коэффициент формы частиц (для частиц сферической формы $\alpha = 2,5$), $\varphi_{\text{эф}}$ – эффективная объемная доля дисперсной фазы.

Согласно модели Урьева-Потанина [16] η_{\min} после разрушения структуры может быть рассчитана по формуле:

$$\eta_{\min} = \frac{9\eta_0}{8 \left[1 - (\varphi_{\text{эф}} / \varphi_{\text{макс}})^{1/3} \right]}, \quad (2)$$

где $\varphi_{\text{макс}}$ – максимальная объемная доля дисперсной фазы в системе, соответствующая наиболее плотной упаковке частиц в структурной сетке (принимали $\varphi_{\text{макс}} = 0,64$).

В уравнениях (1) и (2) для расчета η_{\min} помимо значения η_0 необходимо знать величину эффективной объемной доли дисперсной фазы $\varphi_{\text{эф}}$, то есть объемной доли, занимаемой частицами дисперсной фазы, с учетом наличия воды, связанной частицами вещества, составляющего дисперсную фазу гидрозоля. Значения $\varphi_{\text{эф}}$ в соответствии с [17] рассчитывали, исходя из следующего уравнения:

$$\rho_3 = \rho_{\text{д.ф.}} \cdot \varphi_{\text{эф}} + \rho_0 (1 - \varphi_{\text{эф}}), \quad (3)$$

где ρ_3 – плотность золя, $\rho_{\text{д.ф.}}$ – плотность частиц дисперсной фазы с учетом связанной воды, ρ_0 – плотность дисперсионной среды.

Из уравнения (3) следует, что при данной массовой концентрации золя для нахождения величины $\varphi_{\text{эф}}$ требуется определить плотность золя ρ_3 и плотность дисперсной фазы $\rho_{\text{д.ф.}}$. Расчет плотности частиц дисперсной фазы проводили по методике, представленной в работе [18]. Для этого определяли потерю массы образца геля с концентрацией $\text{Gd}(\text{OH})_3$, равной 62.4 г/л, при температуре 110°C. Она составила 93%. При нагревании образца геля до этой температуры и последующем выдерживании в течение двух часов его масса оставалась постоянной, что свидетельствует об испарении дисперсионной среды, а молекулы связанной воды, входящие в состав частиц дисперсной фазы, не удалялись. Поэтому масса полученного остатка образца геля определялась массой гидроксида гадолиния $m_{\text{Gd}(\text{OH})_3}$ и массой связанной воды $m^* \text{H}_2\text{O}$, содержащейся внутри частиц дисперсной фазы. Это позволило рассчитать значение $m_{\text{Gd}(\text{OH})_3}$ при известной массовой концентрации гидроксида гадолиния, найти величину $m^* \text{H}_2\text{O}$, а также концентрацию дисперсной фазы геля по уравнению:

$$c_{\text{д.ф.}} = m_{\text{д.ф.}} / V = (m_{\text{Gd}(\text{OH})_3} + m^* \text{H}_2\text{O}) / V, \quad (4)$$

где $m_{\text{д.ф.}}$ – масса дисперсной фазы в образце геля, V – объем образца.

Количественную характеристику способности частиц вещества, составляющего дисперсную фазу, связывать воду можно выразить как параметр $n = m^* \text{H}_2\text{O} / m_{\text{Gd}(\text{OH})_3}$, тогда уравнение (4) примет следующий вид:

$$c_{\text{д.ф.}} = (m_{\text{Gd}(\text{OH})_3} + n \cdot m^* \text{H}_2\text{O}) / V = c_{\text{Gd}(\text{OH})_3} (1 + n). \quad (5)$$

что позволяет рассчитать концентрацию дисперсной фазы гидрозолей с различной массовой концентрацией.

Расчеты показали, что параметр n для исследуемого геля составляет 0.2. Можно считать, что установленное значение n для золей с меньшей концентрацией гидроксида гадолиния будет таким же, так как при переходе из золя в гель количество воды, связанное частицами, не должно изменяться при отсутствии внешних воздействий. Данное допущение позволило рассчитать концентрацию дисперсной фазы гидрозолей с различной массовой концентрацией $\text{Gd}(\text{OH})_3$. Согласно работам [19, 20], если объем золя является аддитивной величиной по отношению к объемам фаз в системе, плотность золя равна:

$$\rho_3 = \rho_0 + \frac{\rho_{\text{д.ф.}} - \rho_0}{\rho_{\text{д.ф.}}} \cdot c_{\text{д.ф.}} \quad (6)$$

Из формулы (6) видно, что при линейном характере зависимости $\rho_3 - c_{\text{д.ф.}}$ отрезок на графике,

отсекаемый на оси ординат, соответствует плотности дисперсионной среды ρ_0 , а по тангенсу угла наклона прямой можно рассчитать значение $\rho_{д.ф.}$. Данная зависимость для исследуемого гидрозоля представлена на рисунке 4.

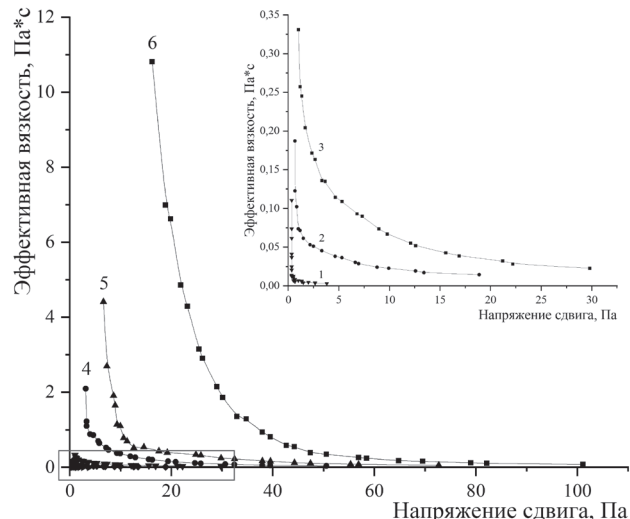


Рис. 3. Кривые эффективной вязкости гидрозоля гидроксида гадолиния при различных концентрациях (г/л) дисперсной фазы: 1 – 18.1, 2 – 40, 3 – 46, 4 – 55, 5 – 59, 6 – 62.4.

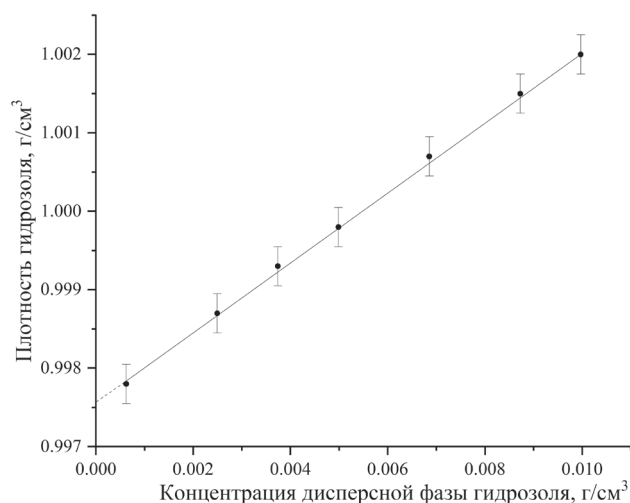


Рис. 4. Зависимость плотности гидрозоля от концентрации дисперсной фазы.

Значения эффективной объемной доли дисперсной фазы в гидрозолях при различных концентрациях $Gd(OH)_3$ были рассчитаны в соответствии с уравнением (3) и представлены в таблице 1. В этой таблице также приведены значения объемной доли гидроксида гадолиния ϕ , экспериментально найденные значения минимальной вязкости и рассчитанные по уравнениям (1) и (2) величины $\eta_{мин}$.

Из таблицы 1 следует, что эффективная объемная доля дисперсной фазы гидрозоля гидроксида гадолиния в 1.4 раза превышает объемную долю $Gd(OH)_3$. Это указывает на значительное количество связанной воды в частицах дисперсной фазы. Рассчитанные значения минимальной вязкости для исследованных структурированных зелей подтверждают сделанное ранее предположение о неполном разрушении пространственных структур даже при относительно высоких напряжениях сдвига.

Зависимость предела текучести от эффективной объемной доли дисперсной фазы представлена на рисунке 5. Можно отметить, что при невысоких значениях $\phi_{эф}$ прочность структуры изменяется почти линейно, а при значениях $\phi_{эф} \geq 3$ об. % наблюдается резкий рост значений P_T . Это связано, вероятнее всего, с деформацией поверхностных слоев на частицах, образующих структурную сетку, и, соответственно, с уменьшением расстояния взаимофиксации частиц во втором энергетическом минимуме. Вероятность же фиксации частиц в первом минимуме в данном случае исключается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование реологического поведения гидрозоля с различной концентрацией гидроксида гадолиния показало, что в нем, начиная с концентрации $c \approx 30$ г/л, возникают пространственные структуры, обладающие тиксотропными свойствами. Образующиеся структуры являются достаточно рыхлыми и непрочными, что обусловливается небольшой

Таблица 1

Характеристики гидрозоля гидроксида гадолиния с различной концентрацией

Концентрация $Gd(OH)_3$, г/л	ϕ , об. %	$\phi_{эф}$, об. %	$\eta_{мин}$ эксп., мПа·с	$\eta_{мин}$ рассчитанная по уравнению (1), мПа·с	$\eta_{мин}$ рассчитанная по уравнению (2), мПа·с
18.1	0.84	1.20	2.90	0.964	1.434
30	1.40	1.99	7.57	0.982	1.536
35	1.65	2.32	9.84	0.990	1.574
40	1.88	2.65	14.38	0.998	1.610
46	2.17	3.05	22.71	1.007	1.651
52	2.46	3.44	33.72	1.017	1.692
55	2.61	3.64	38.54	1.021	1.711
59	2.81	3.91	55.40	1.027	1.737
62.4	2.97	4.16	77.07	1.033	1.758

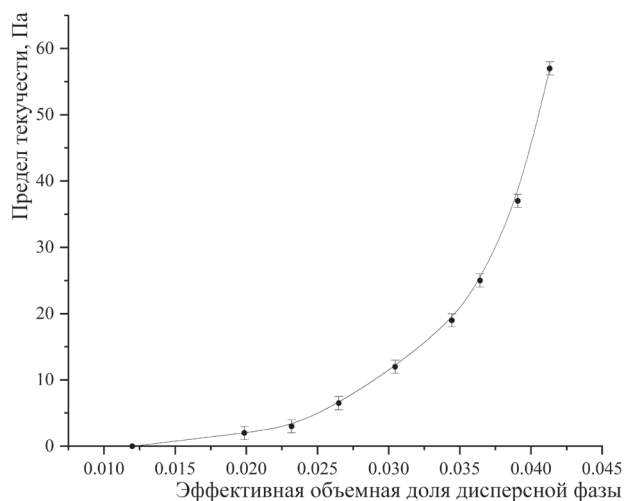


Рис. 5. Зависимость предела текучести от эффективной объемной доли дисперсной фазы гидрозоля.

концентрацией дисперсной фазы и небольшими размерами частиц. В таких системах в отсутствие электролитов подобные структуры не должны образовываться, но в данном случае вследствие роста ионной силы при увеличении концентрации дисперсной фазы становится возможным появление неглубокого второго энергетического минимума на потенциальной кривой, в котором частицы могут образовывать контакты коагуляционного типа. Образованию таких контактов способствует и проявление коллективного взаимодействия между частицами.

Установлено, что частицы в золе содержат 20 масс. % связанной воды, в результате чего объемная доля дисперсной фазы в системе увеличивается в 1.4 раза. Характерно, что, несмотря на небольшую концентрацию дисперсной фазы, даже при максимальных нагрузках полного разрушения структуры в гидрозоле гидроксида гадолиния не происходит, о чем свидетельствует сопоставление экспериментальных и расчетных значений минимальной вязкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Giese E.C. // *Clinical and Medical Reports*. 2018. Vol. 2, No. 1, pp. 1-2.
- Ascenzi P., Bettinelli M., Boffi A., Botta M., De Simone G., Luchinat C., Marengo E., Mei H., Aime S. // *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*. 2020. Vol. 31, pp. 821-833.
- Bunzli J.C.G., Comby S., Chauvin A.S., Vandevyver C.D.B. // *Journal of rare earths*. 2007. Vol. 25, No. 5, pp. 257-274.

- Мамаджанова Е.Х., Голубев Н.В., Малашкевич Г.Е., Сигаев В.Н. // *Успехи в химии и хим. технологии*. 2011. Т. 25. №5 (121). С. 97-101.

- Макаров Н.А., Лемешев Д.О., Иконников К.И., Макаревич Л.Ф. // *Успехи в химии и хим. технологии*. 2011. Т.25. №6 (122). С. 28-31.

- Esposito S. // *Materials*. 2019. Vol. 12. 669 (25 p.).

- Danks A.E., Hall S.R., Schnepf Z. // *Materials Horizons*. 2016. Vol. 3. No. 2. pp. 91-112.

- 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. 162-165.

- 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.

- Матвеев В.Н., Кирсанов Е.А. // *Вестник Московского университета. Серия 2. Химия*. 2011. Т. 52. №4. С. 243-276.

- Кирсанов Е.А., Матвеев В.Н. Неньютонское течение дисперсных, полимерных и жидкокристаллических систем. Структурный подход. Москва, Техносфера, 2016, 384 с.

- Кирсанов Е.А., Матвеев В.Н. Неньютонское течение структурированных систем. Москва, Техносфера, 2016, 384 с.

- Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. Санкт-Петербург, ЦОП «Профессия», 2010, 560 с.

- Ефремов И.Ф. Периодические коллоидные структуры. Ленинград, Химия, 1971, 192 с.

- Ефремов И.Ф., Усъяров О.Г. // *Успехи химии*. 1976. Т. 45. №5. С. 877-907.

- Урьев Н.Б., Потанин А.А. Текучесть суспензий и порошков. Москва, Химия, 1992, 256 с.

- Гродский А.С., Белова И.А. // *Химическая технология*. 2011. Т. 12. №12. С. 710-715.

- Белова И.А., Гродский А.С., Макулова В.С., Киенская К.И. // *Известия Академии наук. Серия химическая*. 2021. №10. С. 1917-1921.

- Назаров В.В., Валесян Е.К., Медведкова Н.Г. *Коллоидный журнал*. 1998. Т. 60. №3. С. 395-400.

- Александров А.В., Гаврилова Н.Н., Назаров В.В. // *Коллоидный журнал*. 2017. Т. 79. №3. С. 245-251.

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

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

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF A STRUCTURED GADOLINIUM HYDROXIDE HYDROSOL

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

Mendeleev University of Chemical Technology of Russia

Abstract. A gel with a concentration of $Gd(OH)_3$ equal to 62.4 g/l was obtained from gadolinium hydroxide hydrosol by concentrating with a rotary evaporator without adding electrolytes. Rheological studies of systems with a concentration of gadolinium hydroxide from 18.1 to 62.4 g/l were carried out. The flow curves characteristic for dispersed systems with a liquid-like structure of the coagulation type were obtained. It was found that the structured hydrosol had thixotropic properties. Contacts between particles in such structures most often occur at distances of the second energy minimum. The possibility of the formation of such contacts in this case is caused by a significant increase in the ionic strength during the concentration of the hydrosol, as well as by the manifestation of the collective interaction between the particles.

The density of particles of the dispersed phase and its effective volume fraction φ_{eff} were calculated, i.e. the volume fraction occupied by the particles of the dispersed phase, taking into account the presence of water bound by the particles. It was found that the particles of the dispersed phase in the hydrosol of gadolinium hydroxide contain 20 wt. % bound water.

The strength of the structures formed in the gadolinium hydroxide hydrosol with different effective volume fractions of the dispersed phase was characterized by the Bingham yield strength. It should be noted that the strength of the spatial structure in the hydrosol increases nonlinearly with an increase in the volume fraction of the dispersed phase and its sharp increase is observed at $\varphi_{\text{eff}} \geq 3$ vol. %. Most likely, this is due to the deformation of the surface layers on the particles that form the structural network, and to a decrease in the interfixation distance of particles in the second energy minimum. The formation of bonds between particles in the first minimum in this case becomes impossible due to the absence of an electrolyte in the hydrosol.

The structure formed in the systems under study had low strength, but even at high shear stresses, the spatial network of particles of the dispersed phase was not completely destroyed, and the minimum viscosity of the hydrosol, depending on its concentration, ranged from several mPa·s to 77 mPa·s. This conclusion is confirmed by calculations of the values of the minimum viscosity at the complete destruction of the structures, which showed that in this case they should be only 0.98-1.76 mPa·s.

Keywords: structured hydrosol, gadolinium hydroxide, rheological properties, effective volume fraction, thixotropy, yield strength.

REFERENCES

1. Giese E.C., Clinical and Medical Reports, 2018, Vol. 2, No. 1, pp. 1-2.
2. Ascenzi P., Bettinelli M., Boffi A., Botta M., De Simone G., Luchinat C., Marengo E., Mei H., Aime

S. Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali, 2020, Vol. 31, pp. 821-833.

3. Bunzli J.C.G., Comby S., Chauvin A.S., Vandevyver C.D.B., J. of rare earths, 2007, Vol. 25, No. 5, pp. 257-274.

4. Mamadzhanova E.H., Golubev N.V., Malashkevich G.E., Sigaev V.N., *Uspehi v himii i him. tehnologii*, 2011, Vol. 25, No. 5 (121), pp. 97-101.
5. Makarov N.A., Lemeshev D.O., Ikonnikov K.I., Makarevich L.F., *Uspekhi v khimii i khim. tehnologii*, 2011, Vol. 25, No. 6 (122), pp. 28-31.
6. Esposito S., *Materials*, 2019, Vol. 12, 669 (25 p.).
7. Danks A.E., Hall S.R., Schnepf Z., *Materials Horizons*, 2016, Vol. 3, No. 2, pp. 91-112.
8. 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. 162-165.
9. 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.
10. Matveenko V.N., Kirsanov E.A., *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2. Khimiya*, 2011, Vol. 52, No 4, pp. 243-276.
11. Kirsanov E.A., Matveenko V.N. *Nen'yutonovskoe techenie dispersnykh, polimernykh i zhidkokristallicheskh sistem. Strukturnyi podkhod*. Moscow, Tekhnosfera, 2016, 384 p.
12. Kirsanov E.A., Matveenko V.N. *Nen'yutonovskoe techenie strukturirovannykh sistem*. Moscow, Tekhnosfera, 2016, 384 p.
13. Malkin A.Ya., Isaev A.I. *Reologiya: kontseptsii, metody, prilozheniya*. Saint-Petersburg, TsOP «Professiya», 2010, 560 p.
14. Efremov I.F. *Periodicheskie kolloidnye struktury*. Leningrad, Khimiya, 1971, 192 p.
15. Efremov I.F., Us'yarov O.G. *Russian Chem. Reviews*, 1976, Vol. 45, No. 5, pp. 435-453.
16. Ur'ev N.B., Potanin A.A. *Tekuchest' suspensii i poroshkov*. Moscow, Khimiya, 1992, 256 p.
17. Grodskii A.S., Belova I.A., *Khimicheskaya tekhnologiya*, 2011, Vol. 12, No. 12, pp. 710-715.
18. Belova I.A., Grodskii A.S., Makulova V.S., Kienskaya K.I. *Russian Chem. Bulletin*, 2021, No. 10, pp. 1917-1921.
19. Nazarov V.V., Valesyan E.K., Medvedkova N.G. *Colloid. J.*, 1998, Vol. 60, No. 3, pp. 395-400.
20. Aleksandrov A.V., Gavrilova N.N., Nazarov V.V. *Colloid J.*, 2017, Vol. 79, No. 3, pp. 245-251.