

EDN: BSVMPK

УДК 544.77:532.13

## Study of Colloidal Stability and Viscosity of Concentrated Aqueous Silicasols

Maxim I. Pryazhnikov<sup>\*a</sup>, Angelica D. Skorobogatova<sup>a</sup>,  
Ivan V. Nemtsev<sup>a, b, c</sup> and Andrey V. Minakov<sup>a</sup>

*<sup>a</sup>Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

*<sup>b</sup>Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center SB RAS”  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

*<sup>c</sup>L.V. Kirensky Institute of Physics SB RAS  
Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center SB RAS”  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 05.06.2023, received in revised form 13.07.2023, accepted 27.07.2023

**Abstract.** A study of the colloidal stability of nanosuspensions obtained by diluting concentrated silicasols was carried out. A wide range of mass concentrations of nanoparticles (from 1 to 50 wt.%) and average sizes of primary particles (from 10 to 35 nm) were considered. The analysis of sedimentation experiments showed that the considered samples have a very high colloidal stability. The characterization of the nanoparticle sizes by electron microscopy was carried out. The particle size distributions in the suspension were obtained by acoustic spectroscopy. Almost all of the considered silica sols have been shown to have a very narrow particle size distribution. The dependences of the dynamic viscosity of nanosuspensions on the concentration and size of nanoparticles are obtained. Based on the dependences, empirical correlations in a wide range of particle concentrations were obtained.

**Keywords:** silicasols, suspension of nanoparticles, viscosity, rheology, acoustic spectroscopy, colloidal stability.

**Acknowledgements.** The study was carried out within the framework of the state task of the Siberian Federal University (number FSRZ-2020–0012). The authors are also grateful to the Krasnoyarsk Regional Center for Collective Use of the FITC KNC SB RAS for characterizing nanoparticles and performing electron microscopy.

---

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: mpryazhnikov@sfu-kras.ru



## Коллоидная стабильность и вязкость концентрированных водных силиказолой

**М. И. Пряжников<sup>а</sup>, А. Д. Скоробогатова<sup>а</sup>,  
И. В. Немцев<sup>а, б, в</sup>, А. В. Минаков<sup>а</sup>**

*<sup>а</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск*

*<sup>б</sup>Федеральный исследовательский центр  
«Красноярский научный центр СО РАН»  
Российская Федерация, Красноярск*

*<sup>в</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН,  
ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН»  
Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** Проведено исследование коллоидной устойчивости наносuspензий, полученных разбавлением концентрированных силиказолой. Рассмотрен широкий диапазон массовых концентраций наночастиц (от 1 до 50 масс.%) и средних размеров первичных частиц (от 10 до 35 нм). Анализ седиментационных экспериментов показал, что рассмотренные образцы обладают очень высокой коллоидной устойчивостью. Проведена характеристика размеров наночастиц с помощью электронной микроскопии, получены распределения частиц по размерам в суспензии методом акустической спектроскопии. В результате было показано, что почти все рассматриваемые силиказолы имеют очень узкое распределение частиц по размеру. Получены зависимости динамической вязкости наносuspензий от концентрации и размера наночастиц. На их основе построены эмпирические корреляции в широком диапазоне концентраций частиц.

**Ключевые слова:** силиказолы, суспензия наночастиц, вязкость, реология, акустическая спектроскопия, коллоидная устойчивость.

**Благодарности.** Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет (номер FSRZ-2020–0012). Авторы также благодарны Красноярскому региональному центру коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН за характеристику наночастиц и выполнение электронной микроскопии.

## 1. Введение

Создание новых технологий требует использования новых материалов с необычными свойствами. В ряду таких материалов стоят наножидкости (наносуспензии) – дисперсные системы с наночастицами. Исследование свойств и применения наножидкостей в различных приложениях (в энергетике, нефтегазовой индустрии, в трибологии, в биотехнологиях и т.д.) стало одним из ключевых трендов в науке двух последних десятилетий [1–2].

При этом до недавнего времени подавляющее большинство работ, связанных с изучением наножидкостей, было посвящено исследованию процессов теплообмена и прежде всего коэффициенту теплопроводности наножидкостей. Именно с исследования коэффициента теплопроводности началась бурная история изучения свойств и возможностей применения наножидкостей в различных приложениях. В революционной работе Стефана Чои 1995 года [3] впервые было показано, что при добавке в теплоноситель небольшого количества наночастиц можно в разы повысить его коэффициент теплопроводности. Собственно, Чои и ввел термин «наножидкость» – суспензия с частицами размером меньше 100 нм. С тех пор исследования свойств наножидкостей развивались с экспоненциальной скоростью. За это время появилось несколько тысяч экспериментальных работ по этой тематике [4–7]. Выяснилось, что наножидкости обладают рядом уникальных свойств, зависящих от большого количества факторов, основными из которых являются концентрация, размер, форма и материал наночастиц, свойства базовой жидкости, температура и добавки поверхностно-активных веществ. Наличие такой многофакторной зависимости осложняет понимание механизмов аномального поведения коэффициентов переноса наножидкостей и во многом объясняет тот разброс данных и наличие противоречий, встречающихся в работах различных авторов.

Отдельно нужно сказать об исследованиях вязкости наносуспензий, которых также выполнено достаточно большое количество в последнее время [8–11]. В начале исследования коэффициент вязкости связывали исключительно с эффективностью теплообмена при использовании наножидкостей. Вязкость жидкостей определяет характер течения и существенно влияет на потерю давления в каналах при прокачивании. А поскольку при добавлении наночастиц в теплоноситель вязкость наносуспензии, как правило, повышается, это влияние рассматривалось как негативный фактор. Однако позднее появилось множество других приложений, в которых влияние наночастиц на вязкость и реологию жидкостей носит исключительно положительный характер. Примерами этого могут служить активно развивающиеся направления по управлению реологическими свойствами буровых растворов с помощью добавок наночастиц [12–13] и применению в задачах интенсификации нефтеотдачи при заводнении пласта [14–15].

Однако, несмотря на просто огромное число работ в этой области, свойства наносуспензий требуют дальнейшего изучения и получения новых систематических экспериментальных данных. В нашей работе представлены результаты изучения физико-химических свойств силиказолей с частицами диоксида кремния различного размера.

## 2. Методика приготовления суспензий и описание образцов

В работе рассматривались суспензии, полученные разбавлением концентрированных (30–50 масс.%) силиказолей дистиллированной водой. Высококонцентрированные золи были получены следующим образом. Сначала проводилось растворение силиката натрия в воде с получе-

Таблица 1. Информация об исходных силиказолях для приготовления суспензий

Table 1. Information on the original silicasols for the preparation of suspensions

Образец	Производитель / Страна	Диаметр, нм	Концентрация, мас.%	pH	Стабилизация
1030	РусСилика, Россия	10	30	9.6	Na <sup>+</sup>
WA1530	РусСилика, Россия	15	30	2.3	Al компонент
AD 1530	РусСилика, Россия	15	30	5.9	Al компонент
2040AS	РусСилика, Россия	20	40	8.9	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
3550	РусСилика, Россия	35	50	9.7	Na <sup>+</sup>
3550P	РусСилика, Россия	35	50	9.6	Na <sup>+</sup>
TM-50	SigmaAldrich, США	22	50	9.0	Na <sup>+</sup>

нием натриевого жидкого стекла. Далее проводились процессы ионного обмена (для удаления ионов натрия из реакционной среды) с одновременным золеобразованием и дальнейшей термостабилизацией силиказоля. Затем стабильный силиказоль фильтровался и концентрировался до необходимой концентрации.

В табл. 1 представлено краткое описание исходных образцов, по данным их производителей, из которых приготавливали суспензии для дальнейшего исследования. Исходные концентрированные золи представляли собой опалесцирующие водные дисперсии коллоидных частиц аморфного диоксида кремния, отличия которых заключались в составе, методе стабилизации и размерах дисперсной фазы. В золе 1030 наночастицы диоксида кремния имеют отрицательный поверхностный заряд, стабилизированный ионами щелочных металлов (Na<sup>+</sup>). Стабилизацией катионами натрия и отрицательным зарядом также характеризуются золи марок 3550, 3550P и TM-50. В состав концентрированного золя 3550P дополнительно входит биоцид, для защиты от появления в нём микроорганизмов. В золе 2040AS нанодисперсный порошок SiO<sub>2</sub> имеет отрицательный поверхностный заряд и стабилизирован присутствием ионов аммония (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). Наночастицы диоксида кремния в составе золь WA1530 и AD 1530 обработаны стабилизирующим алюминиевым компонентом. Кроме заряда наночастиц и способа их стабилизации, все используемые золи отличались значениями водородного показателя.

Размер частиц в силиказолях варьировался от 10 до 35 нм, а концентрация – от 0,125 до 50 мас%. Рассматриваемые силиказоли представляют собой фактически прозрачные и устойчивые коллоидные системы.

Исследуемые наносуспензии были получены разбавлением концентрированных силиказолей дистиллированной водой. Обычно для приготовления суспензий для разрушения конгломератов наночастиц суспензии подвергаются длительной обработке ультразвуковым диспергатором [16]. В данном случае этого не требовалось и суспензии приготавливались простым разбавлением.

### 3. Коллоидная устойчивость

Коллоидная устойчивость суспензий контролировалась с помощью анализатора Turbiscan LAB. Принцип работы анализатора основан на методе многократного рассеяния света [17]. Из-

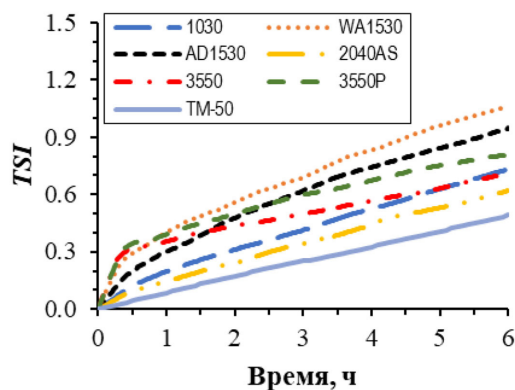


Рис. 2. Индекс устойчивости  $TSI$  различных суспензий с концентрацией 2 %

Fig. 2. Stability index  $TSI$  of various suspensions at 2wt%

мерены профили пропускания и обратного рассеяния света (ИК-область, 880нм) в течение длительного времени. Анализ профилей показал, что рассмотренные суспензии обладают высокой коллоидной устойчивостью. Суспензии остаются устойчивыми в течение нескольких недель после их приготовления.

Для количественной оценки используется индекс дестабилизации, основанный на вычислении накопительной суммы отклонений каждого следующего скана от предыдущего:

$$TSI = \sum_i \frac{\sum_h |scan_i(h) - scan_{i-1}(h)|}{H},$$

где  $H$  – высота столба жидкости в виале. Чем более устойчива суспензия, тем ниже для нее параметр  $TSI$ . Проведено сравнение индекса устойчивости  $TSI$  различных суспензий (рис. 2).

Было получено, что значение индекса устойчивости, измеренного в течение 6 часов, различных суспензий меньше 1. Это говорит о том, что суспензии обладают высокой коллоидной стабильностью [17].

#### 4. Электронная микроскопия

Электронно-микроскопические исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения FE-SEM Hitachi S-5500. Все электронные снимки сделаны в режиме вторичных электронов (SE) при ускоряющем напряжении 3 кВ, токе пучка 10 мкА и фокусном расстоянии от 100 до 200 мкм. Пример электронной микрофотографии частиц 2040AS приведен на рис. 3а. Помимо фотографий были получены гистограммы распределения частиц по размерам (рис. 3б), полученные с помощью онлайн-сервиса ParticlesNN [18]. Это сервис создан на основе нейронной сети CascadeRCNN, обученной на изображениях наночастиц, полученных с помощью метода сканирующей туннельной микроскопии. Обученная нейронная сеть способна распознавать наночастицы как четкие контуры. Онлайн-сервис производит обработку полученных результатов, определяя размеры контуров, их статистические параметры (степень покрытия, концентрацию, средний размер, распределение частиц по размерам) [19].

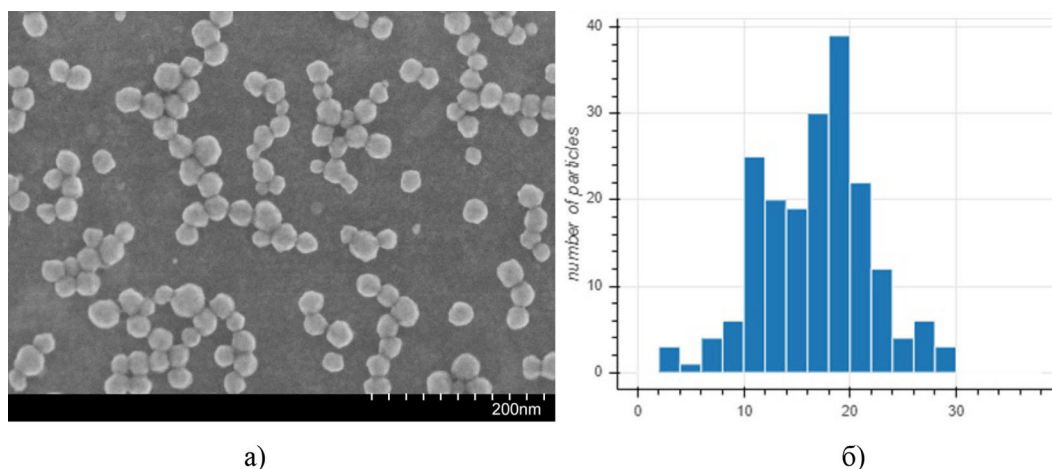


Рис. 3. Электронные микрофотографии наночастиц 2040AS (а) и гистограмма распределения наночастиц по размерам (б)

Fig. 3. Electron micrographs of 2040AS (a) and histogram of size distribution of nanoparticles (б)

Таблица 2. Средний размер частиц в нанометрах, оцененный по электронным микрофотографиям

Table 2. Average particle size in nanometers estimated from electron micrographs

Образец	Размер, определенный с помощью [18]	Размер наночастиц, определенный по электронной микрофотографии
1030	10–12	10
AD 1530	12–14	13
WA1530	12–14	15
2040AS	18–20	21
3550	28–30	крупные – 90, средние – 55, мелкие – 29
3550P	30–35	крупные – 89, средние – 53, мелкие – 24
TM-50	18–21	21

Средний размер частиц, оцененный вручную и полученный с помощью сервиса ParticlesNN по электронным микрофотографиям, для рассмотренных суспензий представлен в табл. 2. Исходя из электронных микрофотографий было получено, что наночастицы в суспензиях 1030, WA1530, AD 1530, 2040AS имеют узкое распределение наночастиц по размеру. Суспензии 3550 и 3550P имеют большой разброс частиц по размерам.

### 5. Распределение частиц по размерам и затухание ультразвука в силиказолях

Проведены измерения распределения частиц по размерам в жидкости. Размеры частиц и электрокинетического потенциала в наносуспензиях измеряли с применением акустического и электроакустического спектрометра DT1202, Dispersion Technologies. Акустический метод основан на измерении степени ослабления ультразвукового сигнала и используется для опре-

деления размеров частиц [20–22]. Электроакустический спектральный анализ основан на эффекте возникновения ультразвуковых волн при наложении переменного электрического поля на суспензию заряженных частиц, которые испытывают трение в процессе колебаний. Анализируя спектры затухания, вычисляется коллоидный вибрационный ток, а также  $\zeta$ -потенциал суспензии.

Было проведено измерение спектров затухания ультразвука и получены распределения частиц по размерам в суспензиях (см. рис. 4). Для каждой исследуемой суспензии спектры затухания ультразвука измерялись три раза. Коэффициенты затухания для всех силиказолой монотонно возрастают с увеличением частоты излучения, что говорит о преимущественно вязкостном механизме затухания. Кроме того, видно, что с увеличением размера наночастиц коэффициент затухания ультразвука увеличивается (рис. 4 слева). Результаты исследования механизмов затухания ультразвукового излучения в наносуспензиях представлены в нашей работе [21–22]. Было показано, что при малых размерах частиц доминирующим механизмом затухания звука является его вязкостное поглощение, а при увеличении размера наночастиц начинает доминировать рассеивание звука непосредственно на частицах. Это объясняет то обстоятельство, что с увеличением размера наночастиц в суспензии в широком диапазоне частот коэффициент затухания возрастает.

Сводные данные по гидродинамическому размеру, дисперсии, геометрическому стандартному отклонению и электрокинетическому потенциалу приведены в табл. 3. Суспензии, у которых геометрическое стандартное отклонение больше 1.2, условно принято считать полидисперсными. Такими суспензиями можно считать образцы 3550 и 3550P. Суспензии 1030, WA1530, AD 1530, 2040AS, TM-50 имеют узкое распределение частиц по размерам (см. рис. 4справа).

Сопоставление данных о среднем размере наночастиц, полученных с помощью электронной микроскопии (табл. 2) и электроакустического спектрометра (табл. 3), показало, что средний размер наночастиц в жидкости в целом оказался близок размеру наночастиц на фотографиях, хотя и немного больше. Это говорит о том, что для данных суспензий наночастицы не образуют крупных агрегатов. О чем косвенно говорит достаточно высокое (по модулю) значение дзета-потенциала суспензий.

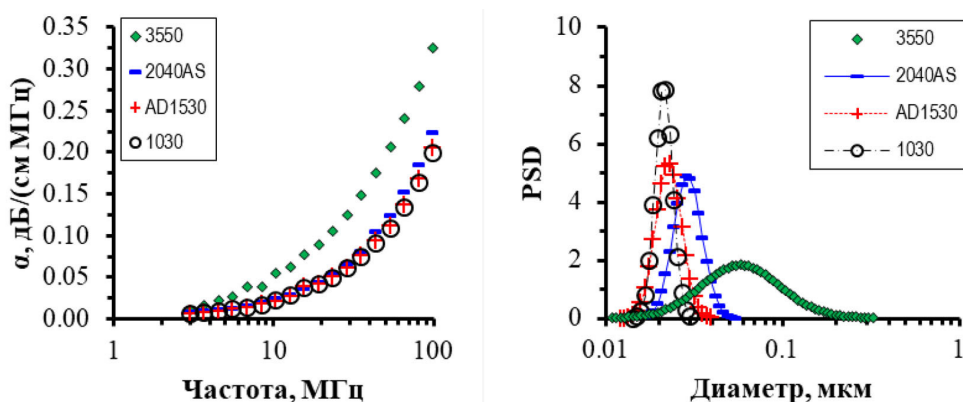


Рис. 4. Спектры затухания ультразвука (слева) и распределение частиц по размерам в суспензиях (справа)

Fig. 4. Ultrasound attenuation spectra (left) and particle size distribution in suspensions (right)



Таблица 3. Средний размер ( $d$ ), дисперсия ( $\sigma^2$ ), геометрическое стандартное отклонение ( $\sigma$ ) и электрокинетический потенциал суспензий ( $\zeta$ )Table 3. Mean size ( $d$ ), variance ( $\sigma^2$ ), geometric standard deviation ( $\sigma$ ), and electrokinetic potential of suspensions ( $\zeta$ )

Образец	$d$ , нм	$\sigma^2$	$\sigma$	$\zeta$ , мВ
1030	20.3	0.063	1.065	-38.7
WA1530	24.1	0.055	1.057	-18.8
AD 1530	21.9	0.049	1.050	-36.0
2040AS	28.2	0.084	1.088	-35.8
3550	57.2	0.225	1.252	-34.7
3550P	56.9	0.229	1.257	-34.5
TM-50	30.8	0.109	1.115	-34.8

## 6. Вязкость силиказолей

Измерение вязкости осуществлялось при помощи ротационного вискозиметра Brookfield DV2T, принцип действия которого основан на измерении закручивания калиброванной пружины при вращении шпинделя в исследуемой жидкости с постоянной скоростью. Измерение коэффициента вязкости проводилось с помощью адаптера для низких значений вязкости ULA. Частота вращения шпинделя варьировалась от 1 до 200 об/мин (диапазон скоростей сдвига 0,01 до 250 с<sup>-1</sup>). Вискозиметр имеет заявленную погрешность  $\pm 2\%$  в зависимости от используемого диапазона скорости сдвига. Поскольку наносуспензии во многих случаях склонны к проявлению неньютоновских свойств [23], то в данном исследовании во всех рассмотренных случаях осуществлялось измерение зависимости коэффициента вязкости от скорости сдвига во всем доступном диапазоне изменения. В процессе измерения тщательно контролировалась температура. Все данные получены при температуре 25 °С.

Ниже на рис. 5 представлены зависимости коэффициента вязкости и напряжения сдвига от скорости сдвига. Анализ полученных данных показал, что, во-первых, все рассмотренные суспензии наночастиц диоксида кремния являются ньютоновскими вплоть до концентраций 30–50 масс.%. Зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига для них носят линейный характер.

Во-вторых, вязкость наносуспензий значительно выше, чем вязкость обычных дисперсных суспензий, даже при очень низких концентрациях наночастиц не описывается классическими теориями. Вязкость дисперсных жидкостей интенсивно изучается уже более ста лет. Соответствующая теория для крупнодисперсных суспензий с малыми концентрациями частиц была построена в классической работе Эйнштейна [24]. Он показал, что дисперсная частица генерирует в несущей жидкости возмущения поля скорости, которые дают соответствующие вклады в тензор напряжений. Это позволило получить известную формулу для расчета коэффициента вязкости  $\mu$  суспензий от объемной доли  $\varphi$  частиц

$$\mu = \mu_0(1 + 2.5\varphi),$$

где  $\mu_0$  – коэффициент вязкости базового флюида. Однако в настоящее время надежно установлено, что вязкость наносуспензий не описывается классическими теориями [24–25]. Так,



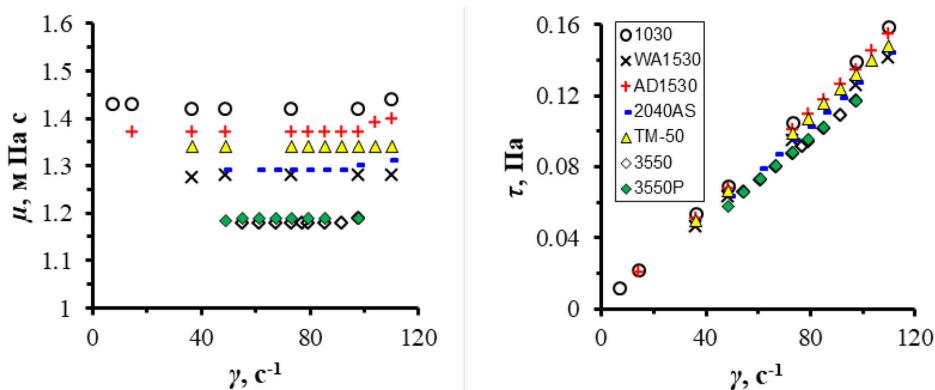


Рис. 5. Зависимость коэффициента вязкости (слева) и напряжения сдвига (справа) от скорости сдвига  $\gamma$  для суспензий при концентрации наночастиц 10 %

Fig. 5. Dependence of the viscosity coefficient  $\mu$  (left) and shear stress  $\tau$  (right) on the shear rate  $\gamma$  for suspensions at a nanoparticle concentration of 10 %

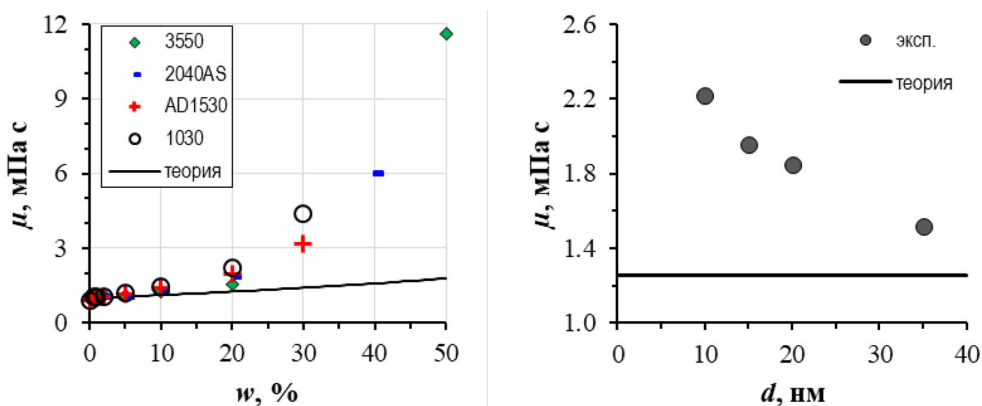


Рис. 6. Зависимости коэффициента вязкости суспензий от концентрации наночастиц  $w$  (слева) и от размера наночастиц  $d$  (справа)

Fig. 6. Dependences of the viscosity coefficient of suspensions on the concentration of nanoparticles  $w$  (left) and on the size of nanoparticles  $d$  (right)

например, для массовой концентрации наночастиц оксида кремния, равной 10 % (это соответствует объемной концентрации 4.8 %), коэффициент относительной вязкости суспензий 1030 (коэффициент вязкости суспензии по отношению к коэффициенту вязкости воды) равен 1.42, в то время как значение, предсказываемое теорией Эйнштейна, составляет 1.12 (см. рис. 6).

В-третьих, экспериментально показана зависимость коэффициента вязкости наносуспензии от размера наночастиц. При одинаковой концентрации наночастиц наносуспензии с разным размером наночастиц могут иметь существенно разную вязкость. Подтверждение этого приведено на рис. 6 справа, где показана зависимость коэффициента вязкости суспензий с разным размером наночастиц при 20 масс.%. Классические теории вязкости дисперсий не учитывают влияние размера частиц.

На основе данных измерений были получены корреляции, описывающие зависимости коэффициента вязкости суспензий от концентрации наночастиц:

$$\begin{aligned} \mu_{susp}(w) &= \mu_w (1 + 1.211w + 38.52w^2) && \text{для 1030} \\ \mu_{susp}(w) &= \mu_w (1 + 3.587w + 15.73w^2) && \text{для AD 1530} \\ \mu_{susp}(w) &= \mu_w (1 + 2.857w + 12.08w^2) && \text{для WA1530} \\ \mu_{susp}(w) &= \mu_w (1 + 6.399w - 30.26w^2 + 125.0w^3) && \text{для 2040AS} \\ \mu_{susp}(w) &= \mu_w (1 + 5.836w - 48.86w^2 + 167.6w^3) && \text{для 3550} \\ \mu_{susp}(w) &= \mu_w (1 + 5.894w - 39.28w^2 + 131.5w^3) && \text{для 3550P} \end{aligned}$$

### Заключение

Проведено исследование физико-химических свойств наносuspензий с частицами диоксида кремния различного размера. Рассмотрено семь различных образцов, существенно отличающихся размерами и способами стабилизации частиц.

Проведена характеристика размеров наночастиц с помощью электронной микроскопии, получены распределения размеров частиц в суспензии методом акустической спектроскопии. В результате было показано, что рассматриваемые силиказоли имеют очень узкое распределение частиц по размеру.

Проведено исследование коллоидной устойчивости рассматриваемых суспензий. Анализ седиментационных экспериментов показал, что рассмотренные наносuspензии, полученные разбавлением силиказолой, обладают очень высокой коллоидной устойчивостью. Суспензии остаются устойчивыми в течение нескольких месяцев после их приготовления. Это выгодно отличает их от исследованных нами ранее наносuspензий, приготовленных из сухих порошков двухшаговым методом.

Выполнено изучение вязкости и реологии приготовленных наносuspензий из разбавленных силиказолой. Показано, что данные наносuspензии являются ньютоновскими даже для очень высоких концентраций наночастиц (50 масс.%). Подтверждено, что вязкость наносuspензий значительно выше, чем вязкость обычных микродисперсных суспензий, и даже при очень низких концентрациях наночастиц не описывается классическими теориями (Эйнштейн [24], Бэтчелор [25] и т.д.). Экспериментально установлена зависимость коэффициента вязкости рассматриваемых наносuspензий от размера наночастиц.

### Список литературы / References

- [1] Mehta B., Subhedar D., Panchal H., Said Z. Synthesis, stability, thermophysical properties and heat transfer applications of nanofluid: A review. *Journal of Molecular Liquids* 2022. 364, 120034.
- [2] Awais M., Bhuiyan A. A., Salehin S., Ehsan M. M., Khan B., Rahman Md. H. Synthesis, heat transport mechanisms and thermophysical properties of nanofluids: A critical overview. *International Journal of Thermofluids* 2021. 10, 100086.
- [3] Choi S., 1995. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticle. In: Siginer D. A., Wang H. P. (Eds.), *Developments and Applications of Non-Newtonian Flows*, American Society of Mechanical Engineers, 231, 99e105. FED, 66.

- [4] Younes H., Mao M., Murshed S.M.S., Lou D., Hong H., Peterson G.P. Nanofluids: Key parameters to enhance thermal conductivity and its applications. *Applied Thermal Engineering* 2022. 207, 118202.
- [5] Lenin R., Joy P.A., Bera C. A review of the recent progress on thermal conductivity of nanofluid. *Journal of Molecular Liquids* 2021. 338(116929), 1–20.
- [6] Minakov A.V., Pryazhnikov M.I., Guzei D.V., Platonov D.V. Study of the viscosity coefficient and thermal conductivity of suspensions with single-walled carbon nanotubes. *Technical Physics Letters* 2020. 46(2), 126–129.
- [7] Bashirnezhad K., Bazri S., Safaei M.R., Goodarzi M., Dahari M., Mahian O., Dalkılıça A.S., Wongwises S. Viscosity of nanofluids: A review of recent experimental studies. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2016. 73, 114–123.
- [8] Murshed S.M.S., Estellé P. A state of the art review on viscosity of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2017. 76, 1134–1152.
- [9] Vinod S., Philip J. Thermal and rheological properties of magnetic nanofluids: Recent advances and future directions. *Advances in Colloid and Interface Science* 2022. 307, 102729.
- [10] Rudyak V. Ya., Minakov A.V., Smetanina M.S., Pryazhnikov M.I. Experimental data on the dependence of the viscosity of water- and ethylene glycol-based nanofluids on the size and material of particles. *Doklady Physics* 2016. 61(3), 152–154.
- [11] Minakov A.V., Rudyak V. Ya., Pryazhnikov M.I. Systematic experimental study of the viscosity of nanofluids. *Heat Transfer Engineering* 2020. 42(12), 1024–1040.
- [12] Cheraghian G. Nanoparticles in drilling fluid: A review of the state-of-the-art. *Journal of Materials Research and Technology* 2021. 13, 737–735.
- [13] Mikhienkova E.I., Lysakov S.V., Neverov A.L., Zhigarev V.A., Minakov A.V., Rudyak V. Ya. Experimental study on the influence of nanoparticles on oil-based drilling fluid properties. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 2022. 208, 109452.
- [14] Mariyate J., Bera A. Recent progresses of microemulsions-based nanofluids as a potential tool for enhanced oil recovery. *Fuel* 2021. 306, 121640.
- [15] Schneider M., Cesca K., de Amorim S.M., Hotza D., Rodríguez-Castellón E., Moreira R.F.P.M. Synthesis and characterization of silica-based nanofluids for enhanced oil recovery. *Journal of Materials Research and Technology* 2023. 24, 4143–4152.
- [16] Goharshadi E., Ding Y., Jorabchi M., Nancarrow P. Ultrasound-assisted green synthesis of nanocrystalline ZnO in the ionic liquid. *Ultrason. Sonochem* 2009. 16(1), 120–123.
- [17] Mengual O., Meunier G., Cayré I., Puech K., Snabre P. TURBISCAN MA 2000: Multiple light scattering measurement for concentrated emulsion and suspension instability analysis. *Talanta* 1999. 50, 445–456.
- [18] <http://particlesnn.nsu.ru>
- [19] Okunev A.G., Mashukov M.Y., Nartova A.V., Matveev A.V. Nanoparticle recognition on scanning probe microscopy images using computer vision and deep learning. *Nanomaterials* 2020. 10, 1285.
- [20] Dukhin A.S. Rheology in longitudinal (ultrasound) mode, review. *Colloid Journal*. 2021. 83(1), 1–19.
- [21] Pryazhnikov M.I., Minakov A.V. Bulk Viscosity of a suspension of silicon oxide nanoparticles. *Technical Physics Letters* 2020. 46(6), 606–609.

[22] Minakov A.V., Pryazhnikov M.I., Damdinov B.B., Nemtsev I.V. Acoustic spectroscopy study of the bulk viscosity of nanosuspensions. *Acoustical Physics* 2022. 68(2), 155–161.

[23] Minakov A.V., Rudyak V. Ya., Pryazhnikov M. I. Rheological behavior of water and ethylene glycol based nanofluids containing oxide nanoparticles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 2018. 554, 279–285.

[24] Einstein A. Eine neue Bestimmung der Molekul-dimension (a new determination of the molecular dimensions). *Annalen der Physik* 1906. 324(2), 289–306.

[25] Batchelor G. K. The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. *Journal of Fluid Mechanics* 1977. 83, 97–117.