

**В. Е. Проскурина, А. А. Алексеева, Л. Р. Дюкина, Э. Б. Цатурян,
С. С. Туганов, А. С. Акмалова, Ю. Г. Галяметдинов**

ФЛОКУЛИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ В ВОДНО-СОЛЕВЫХ СРЕДАХ

Ключевые слова: магнитные наночастицы, ионогенные сополимеры акриламида, флокуляция, голубая глина.

Синтезированы магнитные флокулянты на основе наночастиц магнетита Fe_3O_4 и ионогенных полиакриламидных флокулянтов. Определены коллоидно-химические характеристики магнетита – диаметр $d = 50,8$ нм и электрокинетический потенциал $\zeta = -40,6$ мВ. В режиме свободного (нестесненного) оседания проанализировано влияние концентрации и флокулирующих свойств магнитных наноконкомпозитов на процесс седиментации суспензии голубой глины количественно по величинам флокулирующего эффекта и флокулирующей активности. Определена концентрационная область, в которой добавки магнитных наноконкомпозитов различной природы работают с функцией флокулянта. Седиментация частиц глины связана с участием макромолекул магнитных флокулянтов в образовании мостичных связей, что подтверждается параметром, характеризующим соотношение количества макромолекул магнитных флокулянтов и частиц глины. Проанализировано влияние ионной силы при изменении концентрации магнитных флокулянтов на седиментацию суспензии голубой глины. Установлено, что режим введения магнитных флокулянтов в водно-солевой среде и неидентичность свойств формирующихся флокул связаны с различиями в структуре двойных электрических слоев частиц глины. С ростом концентрации электролита (NaCl) меняется специфика конформационного состояния магнитного флокулянта: переход от развернутой конформации макромолекулярного клубка к более свернутой глобулярной структуре, а значит уменьшается и вероятность участия конкретной макромолекулы в образовании мостичной связи. Отмечено наличие межмолекулярных взаимодействий между композициями из положительно и отрицательно заряженных фрагментов магнитных флокулянтов. Выявленные закономерности и эффекты процесса флокуляции в режиме свободного (нестесненного) оседания могут быть применены для направленного регулирования устойчивости суспензий с участием магнитных наноконкомпозитов.

**V. E. Proskurina, A. A. Alekseeva, L. R. Dyukina, E. B. Tsaturyan,
S. S. Tuganov, A. S. Akmalova, Y. G. Galyametdinov**

MAGNETIC NANOCOMPOSITES FLOCCULATING PROPERTIES IN WATER-SALT MEDIA

Keywords: magnetic nanoparticles, ionic copolymers of acrylamide, flocculation, blue clay.

Magnetic flocculants based on Fe_3O_4 magnetite nanoparticles and ionogenic polyacrylamide flocculants have been synthesized. The magnetite colloidal chemical characteristics are determined – diameter $d = 50,8$ nm and electrokinetic potential $\zeta = -40,6$ mV. The magnetic nanocomposites concentration and flocculating properties effect on the blue clay suspension sedimentation process was analyzed in the mode of free (unconstrained) sedimentation in flocculating effect and flocculating activity terms. The concentration range in which magnetic nanocomposites additives of various nature operate with the flocculant function has been determined. Clay particles sedimentation is associated with the magnetic flocculants macromolecules participation in the bridging bonds formation, which is confirmed by the parameter characterizing the magnetic flocculants macromolecules and clay particles number ratio. The ionic force effect the upon a change in the magnetic flocculants concentration on the blue clay suspension sedimentation is analyzed. It has been established that the mode of magnetic flocculants administration in an aqueous-salt medium and the non-identical properties of the formed floccules are associated with differences in the clay particles double electric layers structure. With increasing electrolyte (NaCl) concentration, the magnetic flocculant changes conformational state specificity: the transition from the unfolded conformation of the macromolecular tangle to a more folded globular structure, which means that the particular macromolecule participation probability a in the bridging bond formation decreases. The presence of intermolecular interactions between magnetic flocculants positively and negatively charged fragments compositions is noted. The flocculation process revealed patterns and effects in the mode of free (unconstrained) subsidence can be applied to the directional regulation of the suspensions stability involving magnetic nanocomposites.

Введение

Наноконкомпозитные материалы, управляемые магнитным полем, являются перспективным направлением в науке, изучающей материалы, имеющие определённые уникальные свойства и обладающие широким спектром применения в области нанотехнологии, фармацевтической промышленности, медицины и биотехнологии [1-3]. В настоящее время синтезирован широкий спектр магнитных наночастиц (МНЧ): на основе металлов Co, Fe, Ni, оксидов железа, ферритов $MgFe_2O_4$, $CoFe_2O_4$, $MnFe_2O_4$, $LiFe_5O_8$, а

также CoPt, FePt, MnAl, $SmCo_5$, $Fe_{14}Nd_2$ [4]. Из всех структур оксида железа Fe_3O_4 обладает наиболее плотно упакованной кубической инвертированной структурой шпинели и полуметаллическими свойствами, демонстрируя большой потенциал в биомедицинских областях [5-8]. Для решения проблемы агрегации и полидисперсности магнетита реализуют функционализацию его поверхности с помощью положительно и отрицательно заряженных макромолекул высокомолекулярного соединения [9-11]. Модификация поверхности магнитных наночастиц полимерами позволяет

добавить в наноматериал дополнительные свойства: коллоидная стабилизация в водных или органических растворителях, специфическое взаимодействие с биологическими молекулами, биосовместимость. Полученные магнитные наноконпозиты проявляют суперпарамагнитные свойства, что означает, что под действием внешнего магнитного поля они намагничиваются до намагниченности насыщения, а когда магнитное поле удаляется, они не проявляют остаточного магнитного взаимодействия. Это свойство зависит от размера МНЧ [12-14]. В связи с этим исследования, направленные на синтез магнитных флокулянтов путем взаимодействия полимеров с магнитными частицами, в ходе которого усиливается процесс флокулообразования в суспензиях являются актуальными и перспективными.

Цель данной работы – синтез магнитных флокулянтов на основе наночастиц магнетита и ионогенных сополимеров акриламида и анализ их флокулирующих свойств на суспензии голубой глины в режиме нестесненного оседания при варьировании ионной силы и порядка введения флокулирующих добавок. Полученные магнитные флокулянты должны повысить эффективность адсорбции и селективность разделения многокомпонентных дисперсных систем.

Экспериментальная часть

В качестве объекта исследования была выбрана голубая глина, охарактеризованная по средним размерам частиц $R_{cp} = 0,87 \cdot 10^{-6}$ м и электрокинетическим потенциалом $\zeta = -33,0$ мВ. Для суспензии голубой глины по данным гранулометрического анализа характерна полидисперсность по размерам ($R_{min} = 0,65 \cdot 10^{-6}$ м и $R_{max} = 2,0 \cdot 10^{-6}$ м).

В качестве флокулирующих агентов были выбраны ионогенные водорастворимые синтетические сополимеры: сополимер акриламида с акрилатом натрия (А) с молекулярной массой с $M = 13,5 \cdot 10^6$ и концентрацией ионогенных звеньев $\beta = 71,2$ мол% и сополимер акриламида с гидрохлоридом диметиламиноэтилметакрилата (К) с $M = 4,2 \cdot 10^6$ и $\beta = 75$ мол%.

Метод седиментационного анализа осуществляли на весовом седиментометре СВ-1, оснащенном программным обеспечением «DTS Application Software» компании Sedimentation Instruments. Работа под управлением операционной системы Windows™ позволила получить графическую интерпретацию результатов измерения с выходом на гранулометрические характеристики дисперсных систем.

Для определения среднего размера частиц и значения электрокинетического потенциала использовали прибор анализатор размера частиц и дзета-потенциала серии Zetasizer Nano-ZS (Malvern Instruments Ltd) (Великобритания), оснащенного гелий-неоновым лазером (633 нм, 4 мВт). Детектор обратного рассеянного излучения располагался под углом 173° . При анализе автокорреляционной функции использовали приближение твердых сферических частиц. Определение ζ -потенциала в

водных системах проводили методом электрофоретического рассеяния с применением технологии МЗ-PALS. Перед выполнением измерений образец магнетита фильтровали через фильтр «Millipore» с мембраной Durgore PVDF и диаметром пор 0,45 мкм. Ошибки измерений размера и ζ -потенциала частиц составили $\pm 2\%$ и $\pm 0,12$ (мкм·см)/(В·с⁻¹) соответственно.

ИК-спектры получали на Фурье-спектрометре ALPHA-T S/N 102706 («Bruker») в спектральном диапазоне 400-4000 см⁻¹, разрешением 4 см⁻¹, в таблетках с КВг. Отнесение характеристических полос проводили по справочным материалам [15].

Для создания магнитного поля использовали неодимовый магнит: N38 (12,5 кГс) диаметром 60 мм и толщиной 30 мм. Неодимовый магнит был установлен в нижней части измерительного цилиндра. С помощью датчика Холла измерена величина магнитного поля: 10,8 мТл.

Результаты и их обсуждение

Магнитные флокулянты (МФ) состоят из магнетита, покрытого защитным слоем в виде органических соединений: сополимеры, биомолекулы и поверхностно-активные вещества, необходимость которого обусловлена внутренней нестабильностью магнитных наночастиц, что может привести к потере их магнитных свойств. МФ физически и химически стабильны, биосовместимы и экологически безопасны. На современном уровне исследований могут быть применены в диагностических методах, таких как магниторезонансная томография и биосенсорика [16, 17].

Магнитные наночастицы Fe₃O₄ были синтезированы с использованием метода химического соосаждения. По методике Рене Массарта [18] дегазированная вода Millipore (100 мл) энергично перемешивалась в атмосфере N₂. После нагрева воды до 80° С, добавляют 0,99 г FeCl₂ · 4H₂O и 2,7 г FeCl₃ · 6H₂O. Как только соли полностью растворились добавляют 10 мл NH₄OH (15 мас%) для создания pH 9,3–9,5. Время реакции 30 мин. Полученные наночастицы Fe₃O₄ были собраны с использованием постоянного магнита, промыты четыре раза водой Millipore и рассеяны в воде Millipore для дальнейшего использования. Фокусируясь на более деликатных деталях эксперимента, исследователи пытаются подбирать условия таким образом, чтобы получать наночастицы желаемого размера, формы и свойств [19]. Методом динамического светорассеяния определены размеры синтезированных наночастиц магнетита $d = 841$ нм. На ультразвуковом диспергаторе УЗДН-2Т при рабочей частоте 40 кГц образец магнетита диспергировали в течение 20 мин, при этом размер частиц $d = 50,8$ нм и $\zeta = -40,6$ мВ. Затем в водный раствор анионных и катионных полиакриламидных флокулянтов вводили расчетную массу наночастиц Fe₃O₄ и перемешивали в течение 5 ч. Образцы магнитных флокулянтов (МФА и МФК) отделяли с помощью постоянного

магнита и промывали водой Millipore, затем сушили в вакуумной печи при 105 °С в течение 24 ч. Далее определяли флокулирующее поведение синтезированных МФ в зависимости от их концентрации.

Формирование магнитных нанокомпозитов подтверждали методом ИК Фурье-спектроскопии. В спектре МФК отмечаются интенсивные колебания, присущие магнетиту и катионному сополимеру акриламида. Характерный пик для магнетита составляет 564 см⁻¹ (вибрация Fe-O); присутствием Fe-O в Fe₃O₄. Полоса поглощения при 3402 см⁻¹ была отнесена к группе-NH₂, пики при 1653 и 1404 см⁻¹ были приписаны C=O и C-N связям в амидных группах, соответственно. Характерный пик при 947 см⁻¹ относится к катионной группе четвертичного аммония-N⁺(CH₃)₃. На поверхности образца магнетита Fe₃O₄ ионы Fe²⁺ и Fe³⁺ взаимодействуют с карбоксилатными анионами сополимера акриламида за счет реакции лигандного обмена.

Закономерности флокулирующего действия различных по природе магнитных флокулянтов представлены на суспензии голубой глины в режиме свободного (нестесненного) оседания под действием внешнего магнитного поля. Наибольшие значения скорости седиментации частиц дисперсной фазы достигаются при максимальной концентрации образца МФА (рис. 1). Адсорбция МФА на частицах голубой глины обусловлена высокой эффективностью образца МФА в процессе образования мостичных связей [20, 21]. В магнитном поле на магнитные частицы в основном действуют магнитная сила, сила тяжести, гидродинамическое сопротивление и силы взаимодействия между частицами [22].

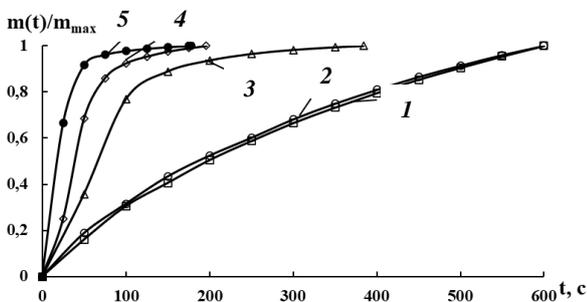


Рис. 1 – Кривые седиментации суспензии голубой глины (C_{ДФ} = 0,8 %) с участием магнитного нанокомпозита МФА в водной среде. [МФА]·10⁵, кг/м³: 0(1); 5 (2); 10 (3); 15 (4); 20(5)

Fig. 1 – Sedimentation curves of blue clay suspension (C_{DF} = 0.8%) with the participation of magnetic nanocomposite MFA in an aqueous medium. [MFA]·10⁵, kg/m³: 0(1); 5 (2); 10 (3); 15 (4); 20(5)

Предположительно, магнитная сила превышает гидродинамическое сопротивление, поэтому магнитный нанокомпозит МФА быстро перемещается вдоль линии магнитного поля, что способствует быстрому флокулообразованию в суспензии глины. Подтверждением увеличения скорости седиментации частиц глины с ростом концентрации вводимой добавки магнитных нанокомпозитов служат

результаты таблицы 1, а именно возрастание числа макромолекул магнитных флокулянтов, приходящихся на число частиц бентонитовой глины в объеме суспензии.

Таблица 1 – Соотношение количества макромолекул магнитных флокулянтов и частиц голубой глины при различных концентрациях МФА и МФК при I = 0

Table 1 – Ratio of the number of macromolecules of magnetic flocculants and blue clay particles at various concentrations of MFA and MFC at I = 0

Параметр	C·10 ⁵ , кг/м ³	МФА	МФК
Число макромолекул N _м ·10 ⁻¹¹	5	2,23	7,15
	10	4,46	14,3
	15	6,69	21,4
	20	8,92	28,6
N _м /N _ч	5	1,13	3,61
	10	2,25	7,22
	15	3,38	10,8
	20	4,50	14,4
N _ч ·10 ⁻¹⁰		19,8	

На следующем этапе работы оценено влияние на седиментацию суспензии голубой глины технологических факторов, а именно порядка введения флокулянтов А, К, МФА и МФК в чередовании их комбинаций в качестве двойной, тройной и четверной добавок при варьировании ионной силы среды (таблица 2).

Интегральные флокулирующие эффекты D и флокулирующие активности λ рассчитаны по формулам [23]:

$$D = \frac{\bar{u}_i}{\bar{u}_0} - 1,$$

$$\lambda = \left[\frac{\bar{u}_i}{\bar{u}_0} - 1 \right] \cdot \frac{1}{C} = \frac{D}{C},$$

где \bar{u}_0, \bar{u}_i – средние скорости седиментации суспензии глины соответственно в присутствии магнитных флокулянтов (концентрации C) и в их отсутствии.

Как видно из таблицы 2, порядок введения МФА и МФК оказывает влияние на структуру двойных электрических слоев частиц глины. Сопоставление экспериментальных значений флокулирующего эффекта с расчетными (D_{расч}) показывает, что во всех случаях магнитные флокулянты МФА и МФК в водной и водно-солевой средах работают как антагонисты (D < D_{расч}) на стадии образования вторичных, третичных и четвертичных флокул. Таким образом, можно сделать вывод о влиянии порядка введения компонентов на процесс флокулообразования в системе.

Для подтверждения эффективности процесса седиментации суспензии глины при изменении режима введения активных добавок из МФА и МФК необходимо учитывать наличие специфических взаимодействий между макромолекулами

анализируемых магнитных флокулянтов с помощью метода вискозиметрического анализа [23].

Таблица 2 – Влияние порядка введения магнитных флокулянтов на флокулирующие параметры в водно-солевых средах

Table 2 – Effect of the order of addition of magnetic flocculants on flocculation parameters in water-salt media

Состав смесевых композиций	$C \cdot 10^5, \%$	D	$D_{расч}$
I = 0			
МФА	5,0	7,8	7,8
МФ(АК)	10,0	1,2	9,9
МФ(АКА)	15,0	8,0	95
МФ(АКАК)	20,0	4,2	118
МФК	5,0	0,24	0,24
МФ(КА)	10,0	6,7	9,9
МФ(КАК)	15,0	3,2	12,5
МФ(КАКА)	20,0	12,8	118
I = 0,0025 М			
МФА	5,0	1,5	1,5
МФ(АК)	10,0	0,35	2,02
МФ(АКА)	15,0	2,25	6,56
МФ(АКАК)	20,0	0,67	8,15
МФК	5,0	0,21	0,21
МФ(КА)	10,0	0,42	2,02
МФ(КАК)	15,0	0,61	2,66
МФ(КАКА)	20,0	0,92	8,15
I = 0,01 М			
МФА	5,0	1,5	1,5
МФ(АК)	10,0	0,97	2,28
МФ(АКА)	15,0	7,12	7,18
МФ(АКАК)	20,0	4,28	9,72
МФК	5,0	0,31	0,31
МФ(КА)	10,0	2,46	2,28
МФ(КАК)	15,0	0,78	3,29
МФ(КАКА)	20,0	33,2	9,72
I = 0,05 М			
МФА	5,0	1,2	1,2
МФ(АК)	10,0	0,51	2,96
МФ(АКА)	15,0	3,4	7,71
МФ(АКАК)	20,0	2,1	14,7
МФК	5,0	0,8	0,8
МФ(КА)	10,0	1,4	2,96
МФ(КАК)	15,0	1,9	6,13
МФ(КАКА)	20,0	6,02	14,7

Расчетные значения флокулирующих эффектов $D_{расч}$ для композиций из магнитных флокулянтов МФА и МФК определяли по формулам:

$$\begin{aligned}
 D_{расч}(МФ(АК)) &= D_{расч}(МФ(КА)) \\
 &= (1 + D_{МФА})(1 + D_{МФК}) - 1 \\
 D_{расч}(МФ(АКА)) &= (1 + D_{МФА})^2(1 + D_{МФК}) - 1 \\
 D_{расч}(МФ(КАК)) &= (1 + D_{МФК})^2(1 + D_{МФА}) - 1 \\
 D_{расч}(МФ(АКАК)) &= D_{расч}(МФ(КАКА)) \\
 &= (1 + D_{МФК})^2(1 + D_{МФА})^2 - 1
 \end{aligned}$$

Для получения удобного параметра оценки конформационных изменений воспользуемся в качестве базисного известным соотношением Флори, которое можно преобразовать в следующий вид [24]:

$$F = \left(\frac{\eta_{уд}}{C}\right)_{эксп.}^{1/3} \cdot \left(\frac{\eta_{уд}}{C}\right)_{расч.}^{-1/3} - 1.$$

При значениях $F > 0$ МФ взаимодействуют между собой и среднеквадратичные размеры макромолекул МФ увеличиваются. Этот результат коррелирует с данными седиментационного анализа. Условие $F < 0$ свидетельствует о сжатии макромолекулярных клубков в присутствии макромолекул другого МФ. Для анализируемых составов смесевых композиций МФ реализуется вариант $F < 0$ (рис. 2). На рис. 2 отмечен экстремум (минимум) для $W_{МФА} = 0,6$, что свидетельствует о наличии специфических взаимодействий заряженных фрагментов макромолекул МФА и МФК.

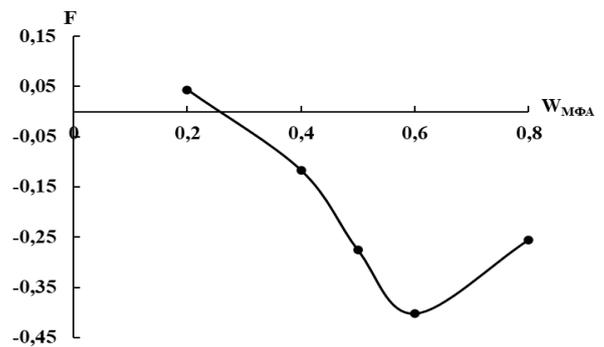


Рис. 2 – Зависимость параметра F от состава смеси магнитных наноконкомпозитов МФА и МФК при $([МФА]+[МФК]) = 0,1 \text{ кг/м}^3$

Fig. 2 – Dependence of parameter F on the composition of the mixture of magnetic nanocomposites MFA and MFC at $([MFA]+[MFC]) = 0.1 \text{ kg/m}^3$

Для анализируемых флокулирующих агентов А, К, МФА и МФК величины параметра λ при минимальной концентрации $C = 5 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}^3$ с ростом ионной силы I закономерно уменьшаются (рис. 3).

Особенно данный эффект наблюдается при участии образцов А и МФА. С ростом ионной силы происходит уменьшение эффективных размеров макромолекулярных клубков, это обусловлено тем, что ионы электролита Na^+ и Cl^- экранируют карбоксилатные анионы, а значит уменьшают полиэлектролитный эффект отталкивания между отрицательно заряженными акрилатными группами вдоль по цепи макромолекулы, и как следствие, электростатический потенциал снижается.

Таким образом, по результатам комплексных исследований, установлен оптимальный режим флокуляции при варьировании порядка введения индивидуальных магнитных флокулянтов в водно-солевых средах. Отмечено наличие межмолекулярных взаимодействий между композициями из положительно и отрицательно заряженных фрагментов магнитных флокулянтов.

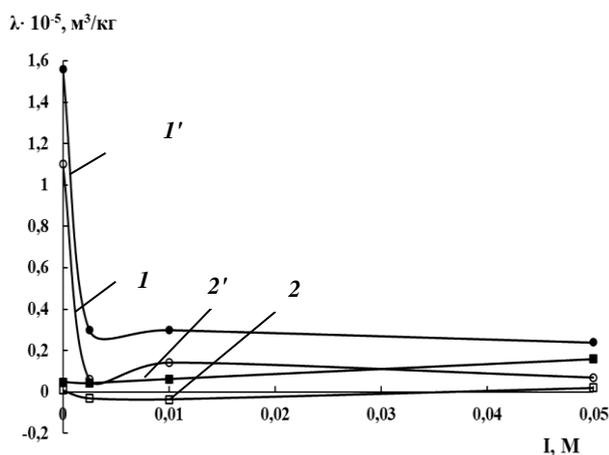


Рис. 3 – Зависимость флокулирующей активности λ от ионной силы I для ионогенных сополимеров акриламида А (1), К(2) и магнитных флокулянтов МФА (1'), МФК (2') при $C = 5 \cdot 10^{-5}$ кг/м³

Fig. 3 – Dependence of flocculating activity λ on ionic strength I for ionogenic copolymers of acrylamide A (1), K (2) and magnetic flocculants MFA (1'), MFC (2') at $C = 5 \cdot 10^{-5}$ kg/m³

Финансирование работы: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) от 29.12.2022 г. № 075-01508-23-00. Тема исследования «Создание научных основ получения новых multifunctional materials широкого спектра применения» (FZSG-2023-0008).

Литература

1. C. Wang, C. Lin, R. Ming, X. Li, P. Jonkheijm, M. Cheng, F. Shi, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 2874-287781 (2021).
2. О.А. Соболева, Л.А. Царькова, *Коллоидный журнал*, **82**, 4, 476-487 (2021).
3. D.V. Pryazhnikov, I.V. Kubrakova, *Journal of Analytical Chemistry*, **76**, 6, 685-706 (2021).
4. S. Liu, B. Yu, S. Wang, Y. Shen, H. Cong, *Advances in colloid and interface science*, **281**, 102165 (2020).
5. J. Ma, X. Fu, L. Jiang, G. Zhu, J. Shi, *Environmental Science and Pollution Research*, **25**, 26, 25955-25966 (2018).
6. Y. Xiong, B. Wu, X. Huang, C. Li, B. Lu, J. Liu, K. Peng, *J Environ Sci*, **105**, 173-183 (2021).
7. Ю.И. Диканский, А.Г. Испирян, С.А. Куникин, *Известия вузов. Физика*, **62**, 10, 176-180 (2019).
8. K. K. Narayanasamy, M. Cruz-Acuna, C. Rinaldi, J. Everett, J. Dobson, N.D. Telling, *J. Colloid. Interface. Sci.*, **532**, 536 (2018).
9. В.Е. Проскурина, А.А. Алексеева, Ю.Г. Галяметдинов, *Вестник технологического университета*, **27**, 2, 14-18 (2024).
10. Г.И. Джардималиева, В.И. Иржак, С.Ю. Братская, В.Ю. Майоров, Ю. О. Привар, Э.Д. Касымова, К.А. Кыдралиева, *Коллоидный журнал*, **82**, 1, 11-17 (2020).
11. В.Е. Проскурина, Е.С. Кашина, А.П. Рахматуллина // *Коллоидный журнал*, **84**, 1, 1-8 (2023).
12. Р. Таубаева, Р. Месарош, К. Мусабеков, Ш. Барань // *Коллоидный журнал*, **77**, 1, 100-107 (2015).
13. В.Е. Проскурина, Ю.Г. Галяметдинов, *Высокомолекулярные соединения. Серия С.*, **66**, 1, 125-133 (2024).

14. Y. Xiong, B. Wu, X. Huang, C. Li, B. Lu, J. Liu, K. Peng, *J Environ Sci*, **105**, 173-183 (2021).
15. Б.Н. Тарасевич. ИК-спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы. М.: МГУ, 14-27 (2012).
16. X. Xiao, Y. Yu, Y. Sun, X. Zheng, A. Chen, *Journal of Environmental Sciences*, **108**, 22-32 (2021).
17. А.М. Бочек, Н.М. Забивалова, Е.Н. Попова, М.Ф. Лебедева, В.К. Лаврентьев, В.Е. Юдин, *Высокомолекулярные соединения. Серия А.*, **63**, 1, 6-80 (2021).
18. R. Massart, *IEEE Trans. Magn.*, **17**, 2, 124471248 (1981).
19. I. Martinez-Mera, M.E. Espinoza-Pesqueira, R. Perez-Hernandez, J. Arenas-Alatorre, *Materials Letters*, **61**, 4447-4451 (2007).
20. M. Yatskov, N. Korczyk, N. Budenkova, O. Mysina, S. Kyrylyuk, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, **128**, 10, 14 (2024).
21. S. Rahim, F.J. Iftikhar, M.I. Malik, *Metal Nanoparticles for Drug Delivery and Diagnostic Applications*, 301-328 (2020).
22. В.Е. Проскурина, Е.С. Кашина, Д.В. Губочкина, И.О. Занина, С.С. Голдобина, Ю.Г. Галяметдинов, *Вестник техн. ун-та*, **22**, 7, 71-75 (2019).
23. В.Е. Проскурина, А.А. Алексеева, С.С. Туганов, Л.Р. Дюкина, Е.И. Жданова, Э.Б. Цатурян, Ю.Г. Галяметдинов, *Вестник технологического университета*, **27**, 8, 34-39 (2024).
24. В.Е. Проскурина, Е.С. Кашина, А.П. Рахматуллина, *Журнал прикладной химии*, **95**, 9, 1194-1200 (2022).

References

1. C. Wang, C. Lin, R. Ming, X. Li, P. Jonkheijm, M. Cheng, F. Shi, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 2874-287781 (2021).
2. О.А. Соболева, Л.А. Царькова, *Russian Colloid Journal*, **82**, 4, 476-487 (2021).
3. D.V. Pryazhnikov, I.V. Kubrakova, *Journal of Analytical Chemistry*, **76**, 6, 685-706 (2021).
4. S. Liu, B. Yu, S. Wang, Y. Shen, H. Kong, *Advances in colloid and interface science*, **281**, 102165 (2020).
5. J. Ma, X. Fu, L. Jiang, G. Zhu, J. Shi, *Environmental Science and Pollution Research*, **25**, 26, 25955-25966 (2018).
6. Yu, X., Wu, B., Huang, S., Li, C., Lu, B., Liu, C., Peng, K., *J Environ Sci*, **105**, 173-183 (2021).
7. Yu. I. Dikansky, A. G. Ispiryan, S. A. Kunikin, *Izvestiya VUZov. Physics*, **62**, 10, 176-180 (2019).
8. K. K. Narayanasamy, M. Cruz-Acuna, C. Rinaldi, J. Everett, J. Dobson, N.D. Telling, *J. Colloid. Interface. Sci.*, **532**, 536 (2018).
9. V.E. Proskurina, A.A. Alekseeva, Yu.G. Galyametdinov, *Herald of Technological University*, **27**, 2, 14-18 (2024).
10. Г.И. Джардималиева, В.И. Иржак, С.Ю. Братская, В.Ю. Майоров, Ю.О. Привар, Э.Д. Касымова, К.А. Кыдралиева, *Colloid Journal*, **82**, 1, 11-17 (2020).
11. V.E. Proskurina, E.S. Kashina, A.P. Rakhmatullina // *Colloid Journal*, **84**, 1, 1-8 (2023).
12. R. Taubaeva, R. Mesaros, K. Musabekov, Sh. Baran // *Colloid Journal*, **77**, 1, 100-107 (2015).
13. V.E. Proskurina, Yu.G. Galyametdinov, *High-molecular compounds. Series C.*, **66**, 1, 125-133 (2024).
14. Y. Xiong, B. Wu, X. Huang, C. Li, B. Lu, J. Liu, K. Peng, *J Environ Sci*, **105**, 173-183 (2021).
15. B.N. Tarasevich. IR spectra of the main classes of organic compounds. Reference materials. M.: Moscow State University, 14-27 (2012).
16. X. Xiao, Y. Yu, Y. Sun, X. Zheng, A. Chen, *Journal of Environmental Sciences*, **108**, 22-32 (2021).

18. A.M. Bocek, N.M. Zabivalova, E.N. Popova, M.F. Lebedeva, V.K. Lavrentiev, V.E. Yudin, *High-molecular compounds. Series A.*, **63**, 1, 6-80 (2021).
19. R. Massart, *IEEE Trans. Magn.*, **17**, 2, 124471248 (1981).
20. I. Martinez-Mera, M.E. Espinoza-Pesqueira, R. Perez-Hernandez, J. Arenas-Alatorre, *Materials Letters*, **61**, 4447–4451 (2007).
21. M. Yatskevich, N. Korchik, N. Budenkova, O. Mysina, S. Kirilyuk, *East European Journal of Enterprise Technology*, **128**, 10, 14 (2024).
22. S. Rahim, F.J. Iftikhar, M.I. Malik, *Metal Nanoparticles for Drug Delivery and Diagnostic Applications*, 301-328 (2020).
23. V.E. Proskurina, E.S. Kashina, D.V. Gubochkina, I.O. Zanina, S.S. Goldobina, Yu.G. Galyametdinov, *Herald of Technological University*, **22**, 7, 71–75 (2019).
24. V.E. Proskurina, A.A. Alekseeva, S.S. Tuganov, L.R. Dyukina, E.I. Zhdanova, E.B. Tsaturyan, *Herald of Technological University*, **27**, 8, 34–39 (2024).
25. V.E. Proskurina, E.S. Kashina, A.P. Rakhmatullina, *Journal of Applied Chemistry*, 95, 9, 1194-1200 (2022).

© **В. Е. Проскурина** – д-р хим. наук, проф. каф. Физической и коллоидной химии (ФКХ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, v_proskurina@mail.ru; **А. А. Алексеева** – магистрант каф. ФКХ, КНИТУ, gavrilovaanastasia09@yandex.ru; **Л. Р. Дюкина** – студент каф. Технологии косметических средств (ТКС), КНИТУ, dyukinalilya@gmail.com; **Э. Б. Цатурян** – студент каф. ТКС, КНИТУ, n3zox1@yandex.ru; **С. С. Туганов** – соискатель каф. ФКХ, КНИТУ, 0401.tss@gmail.com; **А. С. Акмалова** – магистрант каф. ФКХ, КНИТУ, akmalova2000@yandex.ru; **Ю. Г. Галяметдинов** – д-р хим. наук, проф., зав. каф. ФКХ, КНИТУ yugal2002@mail.ru.

© **V. E. Proskurina** – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Professor at the Department of Physical and Colloid Chemistry (PCC), KNRTU, Kazan, Russia, v_proskurina@mail.ru; **A. A. Alexeeva** – Student at the PCC department, KNRTU, gavrilovaanastasia09@yandex.ru; **L. R. Dyukina** – Student at the Department of Cosmetic Technology (CT), KNRTU, dyukinalilya@gmail.com; **E. B. Tsaturyan** – Student at the CT department, KNRTU, n3zox1@yandex.ru; **S. S. Tuganov** – Postgraduate at the PCC department, KNRTU, 0401.tss@gmail.com; **A. S. Akmalova** – Student at the PCC department, KNRTU, akmalova2000@yandex.ru; **Yu. G. Galyametdinov** – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Professor, Head of the PCC department, KNRTU, yugal2002@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 21.05.25.

Дата принятия рукописи в печать – 06.06.25.