



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 544.08:544.72:544.777

doi: 10.17308/sorpchrom.2023.23/11145

Применение композита поливиниловый спирт – магнетит для повышения точности метода оптической микрометрии

**Хусниддин Рустамович Каримов^{1✉},
Анастасия Владимировна Староверова², Михаил Геннадьевич Токмачев²,
Николай Борисович Ферапонтов², Хамза Турсунович Тробов¹**

¹Самаркандский государственный университет, Самарканд, Узбекистан,

khusniddin_rustamovich@mail.ru[✉]

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Аннотация. В основе метода оптической микрометрии (МОМ) лежит зависимость объема сенсора, которым обычно является гранула полимерного геля, от состава раствора, в котором эта гранула находится. Предполагается, что сенсор имеет форму шара, но на практике обычно его форма несколько отличается от шаровидной и имеет форму эллипсоида вращения. Это незначительные отличия, но при вычислениях их желательно учитывать. С этой целью в работе предложено фиксировать положение сенсора в ячейке. В этом случае изменение степени набухания гранулы не сопровождается изменением ее положения в ячейке, и отклонения ее формы от сферической усредняются. Этот результат достигается путем введения в сенсор (гранулу) магнетита и установкой магнита под ячейкой с анализируемым раствором. В работе описан способ получения гранул (сенсоров) на основе сшитого поливинилового спирта (ПВС) с осажденным в них магнетитом. Исследования показали, что в этом случае присутствие магнетита в гранулах не оказывает влияния на их степень набухания. Этот факт подтвердили и исследования кинетики набухания. Кинетика набухания как гранул с магнетитом, так и гранул без него была исследована в растворах несорбирующегося электролита (КС1) и в растворах электролита (MgCl₂), где растворенный электролит образует с полимером координационную связь. Анализ результатов, полученных в работе, позволил сделать по крайней мере два вывода. Во-первых, применение в методе оптической микрометрии в качестве сенсоров гелей с магнетитом практически решает проблему, связанную с поиском гранул сферической формы, необходимых для повышения точности метода. Фиксированное положение гранулы в ячейке позволяет проводить измерения на гранулах в форме эллипсоидов вращения. Во-вторых, показано, что метод оптической микрометрии, укомплектованный указанным в работе оборудованием и материалом, позволяет проводить измерения концентраций анализируемых растворов с точностью 0.4%.

Ключевые слова: полимерный гель, магнетит, композит, степень набухания, кинетика

Для цитирования: Каримов Х.Р., Староверова А.В., Токмачев М.Г., Ферапонтов Н.Б., Тробов Х.Т. Применение композита поливиниловый спирт – магнетит для повышения точности метода оптической микрометрии // *Сорбционные и хроматографические процессы. 2023. Т. 23, № 2. С. 216-224.* <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11145>

Original article

Application of composite polyvinyl alcohol – magnetite for increase of the accuracy of optical micrometry method

**Khusniddin R. Karimov^{1✉}, Anastasia V. Staroverova², Mikhail G. Tokmachev²,
Nikolai B. Ferapontov², Khamza T. Trobov¹**

¹Samarkand State University, Samarkand, Uzbekistan, khusniddin_rustamovich@mail.ru[✉]

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation



Abstract. The method of optical micrometry (MOM) is based on the dependence of the sensor volume, which is usually a polymer gel granule, on the composition of the solution in which this granule is located. It is assumed that the sensor has the shape of a ball, but in practice, usually its shape is somewhat different from spherical and has the shape of an ellipsoid of revolution. These are minor differences, but it is desirable to take them into account for calculations. For this purpose, in this study it was proposed to fix the position of the sensor in the cell. In this case, the change in the degree of swelling of the granule is not accompanied by a change in its position in the cell and the deviations of its shape from spherical are averaged. This result is achieved by introducing magnetite into the sensor (granule) and placing a magnet under the cell with the analysed solution. The study describes a method for the formation of granules (sensors) based on cross-linked polyvinyl alcohol (PVA) with magnetite deposited in them. Studies have shown that in this case the presence of magnetite in the granules does not affect their degree of swelling. This fact was also confirmed by studies of swelling kinetics. The swelling kinetics of both granules with magnetite and without it was studied in solutions of a nonsorbable electrolyte (KS1) and in electrolyte solutions ($MgCl_2$), where the dissolved electrolyte forms a coordination bond with the polymer. Analysis of the results obtained in the study allowed to draw at least two conclusions. First, the use of gels with magnetite as sensors in the method of optical micrometry practically solves the problem associated with the search for spherical granules necessary to improve the accuracy of the method. The fixed position of the granule in the cell allows to perform measurements on granules in the form of ellipsoids of revolution. Secondly, it was shown that the method of optical micrometry, supplemented with the equipment and material specified in the study, allows to measure the concentrations of analysed solutions with an accuracy of 0.4%.

Keywords: polymer gel, magnetite, composite, degree of swelling, kinetics.

For citation: Karimov Kh.R., Staroverova A.V., Tokmachev M.G., Ferapontov N.B., Trobov Kh.T. Application of composite polyvinyl alcohol – magnetite for increase of the accuracy of optical micrometry method. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2023. 23(2): 216-224. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11145>

Введение

В методе оптической микрометрии (МОМ) [1, 2] полимерные гели используются в качестве чувствительных элементов (сенсоров), которые изменяют свою степень набухания в зависимости от свойств внешнего раствора. Наиболее удобной формой чувствительного элемента, помещаемого в раствор, является форма шара. Она позволяет быстро и достаточно просто вычислять изменение объема чувствительного элемента, которое является функцией свойств анализируемого раствора. Определение состава анализируемого раствора в МОМ проводят как на основании равновесных, так и кинетических данных об изменении степени набухания гранулы в анализируемом растворе. Отметим, что использование кинетических данных значительно расширяет как возможности метода, так и его чувствительность. Кроме того, использование кинетики позволяет определять не только концентрацию, но и природу растворенного вещества [3-10].

Одним из факторов, от которого зависит точность получаемых результатов, является природа чувствительного элемента (сенсора), которым в МОМ является гранула (или гранулы) геля сшитого полимера. Важными характеристиками гранул являются их степень набухания и индифферентное отношение к химическому составу анализируемого раствора. Кроме того, к свойствам таких полимеров предъявляются и другие требования. Во-первых, эти свойства должны воспроизводиться от партии к партии, во-вторых, применяемые гранулы должны иметь сферическую форму, близкую к идеальной, в-третьих, изменение степени набухания при повторных измерениях одного и того же раствора должны воспроизводиться.

Основной проблемой метода, препятствующей точному определению концентрации анализируемого раствора, является отличная от сферической форма сенсоров, так как используемые в методе гранулы практически никогда не имеют точной сферической формы. Чаще всего форма сенсора – это форма эллипсоида

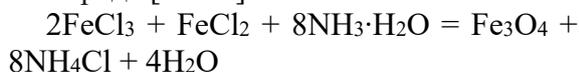
вращения с разными значениями размеров радиусов. При проведении анализа часто происходит изменение положения гранулы в ячейке, а это может приводить к серьезным отклонениям рассчитываемых величин от истинных и заметно снизить точность анализа. Для решения данной проблемы в работе в качестве сенсоров предложено использовать полимерные гели гранул сшитого поливинилового спирта (ПВС) с частицами магнетита и ячейки с установленными под ними магнитами [11]. В этом случае гранула сенсора неподвижно фиксируется на дне ячейки. Эта фиксация позволяет избежать ошибок, появляющихся в связи с влиянием несферической формы гранулы.

В работе проверено влияние присутствия магнетита на равновесные и кинетические свойства геля. В результате проведенных экспериментов было установлено, что степень набухания исследованного в работе геля композита, включающего полимер (ПВС), магнетит и воду в аналогичных условиях соответствует степени набухания такого же геля, но с находящимся в нем магнетитом.

Экспериментальная часть

Получение композита с магнетитом. Используемый в работе композит состоял из сшитого поливинилового спирта (ПВС) в качестве матрицы геля и магнетита. Сшитый полимер получали путем сшивания в щелочной среде линейного ПВС 18/11 эпихлоргидрином (20% ЭХГ) по методике [12] и последующей операцией гранулирования сшитого полимера в реакторе с вазелиновым маслом и с мешалкой при 75°C. После гранулирования гранулы отмывали от масла и помещали в водный раствор солей железа в мольном соотношении $Fe^{2+} : Fe^{3+}$ как 1:2. Приготовленную суспензию помещали в чашку Петри и ставили на верхнюю площадку эксикатора, на дно которого заливали водный раствор аммиака. Этот способ яв-

ляется одним из наиболее простых методов синтеза магнитных частиц посредством химического осаждения в щелочной среде [13-15].



В предлагаемой работе данная методика была реализована в полимерном геле.

Анализ свойств образцов композита с магнетитом. Известно, что магнетит относится к ферромагнетикам, то есть обладает самопроизвольной намагниченностью. Следовательно, о нахождении магнетита в полученных образцах можно судить по наличию электромагнитного взаимодействия полученных гранул с магнетитом. Другим способом анализа, используемым в работе, являлась сканирующая электронная микроскопия (СЭМ).

Для нахождения массовой доли магнетита по отношению к массе ПВС обезвоженные образцы были взвешены, а затем прокалены в муфельной печи при температуре 700°C в течение 2 часов. Температуру и время обжига определяли в соответствии с данными из [16]. После прокаливания образцы вновь были взвешены. Было установлено, что в результате интенсивного выделения коксовых газов в некоторых бюксах произошла потеря массы основного продукта, поэтому приводимый результат является полуколичественным. С учетом указанных потерь массовая доля магнетита в гранулах составляла 60-65%.

Обсуждение результатов

В зависимости от поставленной задачи исходный объем гранулы геля может изменяться от нескольких десятков до нескольких сотен кубических микрон, но при равновесии он является величиной постоянной для раствора данного состава. Причина изменения степени набухания (объема) геля связана с изменением состава внешнего раствора. Если изменение измеряемого объема происходит в

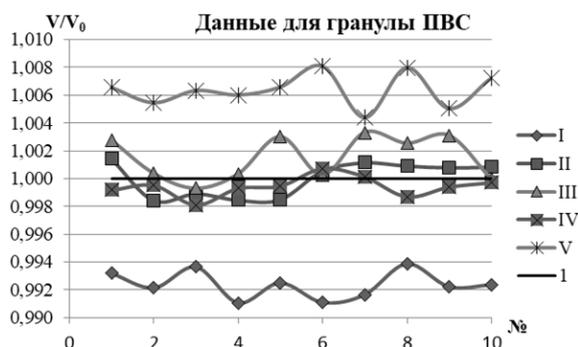


Рис. 1. Изменение степени набухания гранулы полимерного геля от номера фотографии в каждой десятке (точки). 1 – гранула сравнения. I-II-III-IV-V – гранулы которые взяты для исследования.

Fig. 1. Change in the degree of swelling of the polymer gel granule from the photograph number in each ten samples (points). 1 – comparison granule. I-II-III-IV-V – granules used for research.

Таблица 1. Статистические характеристики данных, приведенных на рис.1.

Table 1. Statistical characteristics of the data shown in Fig. 1.

Десятки	I	II	III	IV	V	Суммарные данные
Среднее	0.9924	1	1.0015	0.9994	1.0064	0.9999
Медиана	0.9923	1.0007	1.0015	0.9994	1.0064	1.0002
СКО*	0.001	0.0013	0.0016	0.0007	0.0012	0.0047
Размах	0.0028	0.003	0.004	0.0026	0.0037	0.0170
Макс	0.9939	1.0014	1.0033	1.0007	1.0081	1.0081
Мин	0.9911	0.9984	0.9993	0.9981	1.0044	0.9911
Число фотографий N	10	10	10	10	10	50

растворе постоянного состава, то причиной этого является ошибка измерения, что чаще всего связано с несферической формой гранулы.

В МОМ существуют два типа ошибок, влияющих на точность анализа, – это погрешность прибора и ошибки, связанные с геометрией формы гранул. Для определения приборной погрешности в работе были проанализированы результаты фотографирования пяти гранул, диаметр каждой из которых порядка 1 мм.

В первой серии снимков гранулы находились в воде. Не изменяя их положения, были сделаны по десять фотографий каждой гранулы. Фотографирование проводили с помощью видеокамеры Selestron 44421, размер линейки 5 мм пикс/мм, с разрешением 750 пикселей/мм. Полагая, что ошибку определения диаметра гранулы по фотографии в 1 пиксель, прихо-

дим к априорной оценке ошибки определения объема гранулы в 0.4%. После обработки экспериментальных результатов было установлено, что вычисленные по фотографиям объемы гранул в каждом десятке колеблются в пределах именно 0.4%. Таким образом, в результате влияния погрешности самого прибора, оценка значения объема гранулы, находящейся в неподвижном состоянии, может колебаться в указанном диапазоне.

Затем для учета влияния изменения положения гранул планшет с ячейками вместе с гранулами встряхивали и делали еще по 10 фотографий каждой гранулы. Было установлено, что после встряхивания измеряемые размеры гранул заметно изменялись. Это однозначно говорит о том, что форма таких гранул отличалась от шарообразной. Для сопоставления степени изменений объемов гранул разного размера использовали величины относитель-

тельных объемов V_i/V_0 . В качестве величины V_0 брали среднее значение объемов каждой гранулы из первой серии, а в качестве величины V_i - измеряемый объем анализируемой гранулы. Обработка данных показала, что для гранул, чья форма отличается от сферической, оценка значения определяемого объема может колебаться в диапазоне 2.0%. В качестве иллюстрации приведены результаты фотографирования одной гранулы (рис. 1). Сначала, не изменяя положения гранулы, были сделаны десять ее фотографий (кривая 1), затем гранулу вместе с ячейкой встряхнули и сделали еще десять фотографий той же гранулы (кривая 2). Далее аналогичным способом были получены фотографии кривых 3, 4 и 5, которые иллюстрируют изменение размеров все той же гранулы, находящейся в разных положениях относительно объектива микроскопа.

Различное расположение кривых – следствие неправильной формы гранулы и, соответственно, разного положения гранулы в ячейке.

В результате установлено, что, во-первых, полученные после обработки размеры гранулы в каждом десятке, то есть размеры гранулы в неподвижном состоянии колеблются в пределах 0.4 %. Во-вторых, хорошо видно, что после встряхивания измеряемые размеры гранул заметно изменяются. Следовательно, формы измеряемых гранул не шарообразные, поэтому после встряхивания принимаемое ими положение в ячейке, отличается от предыдущего. Из обработанных данных следует, что в результате несферичности формы гранул оценка значения их объема в данном случае может колебаться в диапазоне 2.0%. В таблице 1 приведены статистические характеристики полученного набора данных.

Влияние магнетита на поведение гранул геля ПВС. Для оценки влияния гранул с магнетитом, одну из них помещали в ячейку, заполненную водой, под кото-

рой был установлен магнит. Выдерживали гранулу в воде некоторое время для достижения равновесного состояния. При этом находящаяся в ячейке гранула была неподвижно зафиксирована на дне ячейки. Затем ячейку переносили на столик микроскопа. Не вынимая гранулу из ячейки под микроскопом делали 10 фотографий. На основании этих снимков находили величину V_0 , исходное значение ее объема. Для определения отклонений, вызванных отличной от сферической формы гранулы, взбалтыванием пытались изменить положение гранулы в ячейке и проводили повторную съемку (еще 10 снимков), и затем повторяли данную процедуру еще три раза. В результате было сделано 50 фотографий гранулы или 5 серий из 10 подряд идущих фотографий. Таким образом была получена информация о поведении гранулы с магнетитом в воде (рис. 2, табл. 2).

При фотографировании было установлено, что при встряхивании в воде гранулы с магнетитом ее объем (в пределах чувствительности прибора) сохраняется постоянным. Значит отклонения объемов гранулы с магнетитом от среднего не превышают 0.4%, что составляет погрешность прибора. Таким образом было показано, что в случае использования гранул с магнетитом, снимается необходимость точного соблюдения сферической формы гранулы, так как фотографирование гранулы с магнетитом дает результат, аналогичный тому, что был получен для обычной гранулы, фотографируемой в неподвижном состоянии.

Дальнейшая проверка влияния присутствия магнетита на поведение геля ПВС в растворах разного состава была осуществлена путем сравнения результатов кинетики набухания гранул геля ПВС с магнетитом и без него в растворах хлоридов калия и магния. Причина выбора данных электролитов заключалась в том, что хлорид калия является одним из наиболее индифферентных к полимеру электролитов, и изменение степени набухания геля

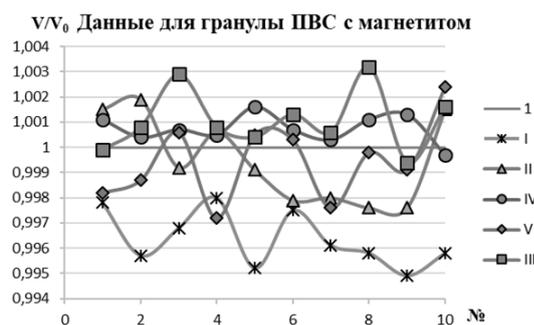


Рис. 2. Изменение степени набухания гранулы ПВС с магнетитом от номера фотографии в каждом десятке (точки). 1 – гранула сравнения. I-II-III-IV-V – гранулы которые взяты для исследования.

Fig. 2. Change in the degree of swelling of PVA granules with magnetite from the photograph number in each ten samples (points). 1 – comparison granule. I-II-III-IV-V – granules used for research.

Таблица 2. Статистические характеристики данных, приведенных на рис.2.

Table 2. Statistical characteristics of the data shown in Fig. 2.

	I	II	III	IV	V	Итого
Среднее	0.9964	0.9995	1.0011	1.0007	0.9994	0.9994
Медиана	0.9960	0.9992	1.0008	1.0007	0.9995	1.0001
СКО	0.0011	0.0017	0.0012	0.0006	0.0016	0.0021
Размах	0.0031	0.0043	0.0038	0.0019	0.0052	0.0083
Макс	0.9980	1.0019	1.0032	1.0016	1.0024	1.0032
Мин	0.9949	0.9976	0.9994	0.9997	0.9972	0.9949
Число фотографий N	10	10	10	10	10	50

Таблица 3. Составы приготовленных растворов

Table 3. The compositions of the prepared solutions.

Электролит	Концентрация (молярность)
KCl	3.10
MgCl ₂	1.5

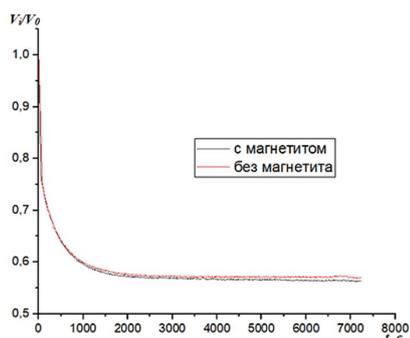


Рис. 3. Кинетика набухания гранулы геля ПВС и гранулы геля ПВС с магнетитом в растворе KCl (C=3.1M).

Fig. 3. Swelling kinetics of a PVA gel granule and a PVA gel granule with magnetite in a KCl solution (C=3.1M).

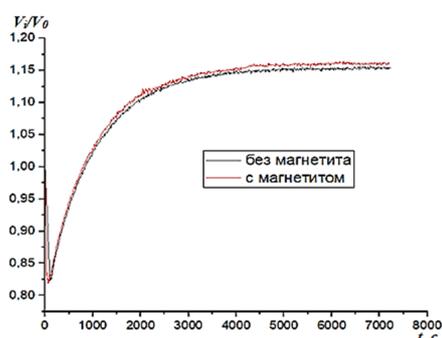


Рис. 4. Кинетика набухания гранулы геля ПВС и гранулы геля ПВС с магнетитом в растворе MgCl₂ (C=1.5M).

Fig. 4. Swelling kinetics of PVA gel granule and PVA gel granule with magnetite in a MgCl₂ solution (C=1.5M).

при изменении концентрации раствора происходит исключительно в результате

изменения активности воды. Хлорид магния, напротив, образует координацион-

ные связи с полярными группами полимера, что приводит к заметному увеличению степени набухания геля.

Для проведения экспериментов готовили два изоактивных раствора, состав которых приведен в таблице 3.

Результаты проведенных экспериментов приведены на рис. 4 и 5. На них хорошо видно, что в обоих случаях формы кинетических кривых, полученных на гранулах «чистого» геля ПВС и на гранулах геля ПВС с магнетитом, в пределах чувствительности метода не различимы. Таким образом, присутствие магнетита в геле ПВС не проявляется ни на его равновесных, ни на кинетических свойствах. Полученный результат дает возможность использовать композит с магнетитом в аналитических целях при создании баз данных.

Заключение

Анализ результатов, полученных в работе, позволяет сделать по крайней мере

Список литературы

1. Ковалева С.С., Рубин Ф.Ф., Ферапонтов Н.Б. Особенности поведения сшитого поливинилового спирта в водных растворах низкомолекулярных электролитов. // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2006. Т.6, № 2. С. 198-210.

2. Ферапонтов Н.Б., Ковалева С.С., Рубин Ф.Ф. Определение природы и концентрации растворенных веществ методом набухающей гранулы. // *Журн. аналит. химии*. 2007. Т.62, №10. С. 1-7.

3. Budtova T., Navard P. Swelling kinetics of a polyelectrolyte gel in water and salt solutions. Coexistence of swollen and collapsed phases // *Macromolecules*. 1998. Vol. 31. P. 8845-8850.

4. Zhao Y., Chen W., Yang Y., Yang X., Xu H. Swelling behavior of ionically cross-linked polyampholytic hydrogels in varied salt solutions // *Colloid Polym. Sci.* 2007. Vol. 285. P. 1395-1400.

два вывода. Во-первых, применение в методе оптической микрометрии в качестве сенсоров гелей с магнетитом практически решает проблему, связанную с поиском гранул сферической формы, необходимых для повышения точности метода. Фиксированное положение гранулы в ячейке позволяет проводить измерения и с гранулами в форме эллипсоидов вращения. Во-вторых, показано, что метод оптической микрометрии, укомплектованный указанным в работе оборудованием и материалом, позволяет проводить измерения концентраций анализируемых растворов с точностью 0.4%.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

5. Schott H. Swelling kinetics of polymers // *J. Macromol. Sci., part B: Physics*. 1992. Vol. 31, I. 1. P. 1-9.

6. Карпов С.И., Матвеева М.В., Селеменов В.Ф. Кинетика поглощения аминокислот гелевым катионитом КУ-2-8 // *Журн. физ. химии*. 2001. Т. 75, № 2. С. 266-271.

7. Tokmachev M.G., Ferapontov N.B., Gagarin A.N. Analysis of the swelling or shrinking kinetics of crosslinked hydrophilic polymers by mathematical modeling // *Journal of Mathematical Chemistry*. 2017. Vol. 55, Is. 1. P. 142-152.

8. Кавалерская Н.Е., Струсовская Н.Л., Ферапонтов Н.Б. Кинетика набухания и сорбционные свойства геля сшитого полиакриламида // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2009. Т. 9, № 6. С. 796-804.

9. Changjie Wang, Yong Li and Zhibing Hu. Swelling kinetics of polymer gel // *Macromolecules*. 1997. Vol. 30, no16. P. 4727-4732.



10. Li S. Vatanparast R., Lemmetyinen H. Cross-linking kinetics and swelling behaviour of aliphatic polyurethane // *Polymer*. 2000. Vol. 41, no 15. P. 5571-5576.
11. Ivanov A.V., Smirnova M.A., Tikhanova O.A., Tokmachev M.G., Gagarin A.N., Ferapontov N.B. Granulated metamaterial «cross-linked polyvinyl alcohol-magnetite» for use in optical micrometry // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2021. Vol. 55, no 5. P.1009-1014.
12. Ямсков И.А., Буданов М.В., Даванков В.А. Гидрофильные носители на основе поливинилового спирта для иммобилизации ферментов // *Биоорганическая химия*. 1979. Т. 5, № 11. С. 1728-1734.
13. Гервальд А.Ю., Прокопов Н.И., Ширякина Ю.М. Синтез суперпарамагнитных наночастиц магнетита // *Вестник МИТХТ им. М.В. Ломоносова*. 2010. Т. 5, № 3. С. 45-49.
14. Костюшин В.Г., Нуриев А.В., Кожитов Л.В., Морчепко А.Т., Читанов Д.Н., Похолок К.В. Использование фазового магнитного анализа для исследования п контроля состава и свойств композитов Ре/С // *Российские нанотехнологии*. 2012. Т. 7, № 7. С. 32-35.
15. Костюшин В.Г., Нуриев, А.В. Остафийчук Б.К., Мокляк В.В. Мессбауэровские исследования магнитных полимерных нанокомпозицтов на основе магнетита и поливинилового спирта // *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2013. Т. 4. С. 24-31.
16. Сенкевич С.И., Дружинина Т.В., Харченко И.М., Кряжев Ю.Г. Термопревращения поливинилового спирта - сырья для получения углеродных материалов // *Химия твердого топлива*. 2007. № 1. С. 51-58.
1. Kovaleva S.S., Rubin F.F., Ferapontov N.B. Osobennosti povedeniya sshitogo polivinilovogo spirta v vodnykh rastvorakh nizkomolekulyarnykh elektrolitov. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2006; 6(2): 198-210. (In Russ.)
2. Ferapontov N.B., Kovaleva S.S., Rubin F.F. Opredelenie prirody i koncentracii rastvorenykh veshchestv metodom nabukhayushchej granuly. *ZHurn. analit. khimii*. 2007; 62(10); 1-7. (In Russ.)
3. Budtova T., Navard P. Swelling kinetics of a polyelectrolyte gel in water and salt solutions. Coexistence of swollen and collapsed phases. *Macromolecules*. 1998; 31: 8845-8850.
4. Zhao Y., Chen W., Yang Y., Yang X., Xu H. Swelling behavior of ionically cross-linked polyampholytic hydrogels in varied salt solutions. *Colloid Polym. Sci*. 2007; 285: 1395-1400.
5. Schott H. Swelling kinetics of polymers. *J. Macromol. Sci., part B: Physics*. 1992; 31(1); 1-9.
6. Karpov S.I., Matveeva M.V., Selemenev V.F. Kinetika pogloshcheniya amino-kislot gelevym kationitom KU-2-8. *ZHurn. fiz. khimii*. 2001; 75(2): 266-271. (In Russ.)
7. Tokmachev M.G., Ferapontov N.B., Gagarin A.N. Analysis of the swelling or shrinking kinetics of crosslinked hydrophilic polymers by mathematical modeling. *Journal of Mathematical Chemistry*. 2017; 55(1): 142-152.
8. Kavalerskaya N.E., Strusovskaya N.L., Ferapontov N.B. Kinetika nabukhaniya i sorbcionnye svojstva gelya sshitogo poliakrilamida. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2009; 9(6): 796-804. (In Russ.)
9. Changjie Wang, Yong Li and Zhibing Hu. Swelling kinetics of polymer gel. *Macromolecules*. 1997; 30(16): 4727-4732.
10. Li S. Vatanparast R., Lemmetyinen H. Cross-linking kinetics and swelling behaviour of aliphatic polyurethane. *Polymer*. 2000; 41(15); 5571-5576.
11. Ivanov A.V., Smirnova M.A., Tikhanova O.A., Tokmachev M.G., Gagarin A.N., Ferapontov N.B. Granulated metamaterial «cross-linked polyvinyl alcohol-magnetite» for use in optical micrometry.



Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2021; 55(5): 1009-1014.

12. YAmnikov I.A., Budanov M.V., Davankov V.A. Gidrofil'nye nositeli na osnove polivinilovogo spirta dlya immobilizatsii fermentov. *Bioorganicheskaya khimiya*. 1979; 5(11): 1728-1734. (In Russ.)

13. Gerval'd A.YU., Prokopov N.I., SHiryakina YU.M. Sintez superparamagnitnykh nanochastich magnetite. *Vestnik MITKHT im. M.V. Lomonosova*. 2010; 5(3): 45-49. (In Russ.)

14. Kostyushin V.G., Nuriev A.B., Kozhitov L.V., Morchepko A.T., CHitanov D.N., Pokholok K.V. Ispol'zovanie

fazovogo magnitnogo analiza dlya issledovaniya p kontrolya sostava i svojstv kompozitov Re/S. *Rossijskie nanotekhnologii*. 2012; 7(7): 32-35.

15. Kostyushin V.G., Nuriev, A.B. Ostafijchuk B.K., Moklyak V.V. Messbauerovskie issledovaniya magnitnykh polimernykh nanokompozitov na osnove magnetita i polivinilovogo spirta. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Materialy elektronnoy tekhniki*. 2013; 4: 24-31. (In Russ.)

16. KHarchenko I.M., Kryazhev YU.G. Termoprevra-shcheniya polivinilovogo spirta - syr'ya dlya polucheniya uglerodnykh materialov. *KHimiya tverdogo topliva*. 2007;1: 51-58. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Х.Р. Каримов – базовый докторант Самаркандского Государственного Университета, Самарканд, Узбекистан

А.В. Староверова – студентка химического факультета МГУ, Москва, Россия

М.Г. Токмачев – доцент физического факультета МГУ, Москва, Россия, Россия

Н.Б. Феропонтов – ведущий научный сотрудник химического факультета МГУ, Москва, Россия

Т.Т. Тробов – профессор Самаркандского Государственного Университета, Самарканд, Узбекистан

Kh.R. Karimov – basic doctoral student of Samarkand State University, Samarkand, Uzbekistan. E-mail: khusniddin_rustamovich@mail.ru

A.V. Staroverova – Student of the Faculty of Chemistry, Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: staroverovan01@yandex.ru

M.G. Tokmachev – associate professor, department of physics, Moscow Lomonosov State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: miket@mail.ru

N.B. Ferapontov – senior researcher, department of chemistry, Moscow Lomonosov State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: n.ferapontov@phys.chem.msu.ru

Kh.T. Trobov – professor of Samarkand State University, Samarkand, Uzbekistan, E-mail: trobov.xamza@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16.11.2022; одобрена после рецензирования 20.02. 2023; принята к публикации 01.03.2023.

The article was submitted 16.11.2022; approved after reviewing 20.02. 2023; accepted for publication 01.03.2023.