ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, *2024*, *том 43*, *№ 7*, *с. 111—120*

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

УДК 542.06

ПОРИСТЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ СМЕШАННЫХ КОЛЛОИДНЫХ СУСПЕНЗИЙ В УСЛОВИЯХ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ И СВЧ-НАГРЕВА

© 2024 г. В. Н. Горшенёв[1], И. А. Маклакова[2], М. А. Яковлева[1*]

[1]*Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук, Москва, Россия*

[2]*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия*

[*]*E-mail: lina.invers@gmail.com*

Поступила в редакцию 08.06.2023;
после доработки 12.10.2023;
принята в печать 20.10.2023

Предложен новый способ смешения растворов и суспензий, содержащих термодинамически несмешивающиеся дисперсионные среды. Метод основан на использовании ультразвукового диспергирования и термостимулированного СВЧ-нагрева. Приведены результаты исследования ряда функциональных композитов, полученных при смешении растворов биодеградируемых полимеров в хлороформе с водными суспензиями природных полимеров. Рассмотрена возможность получения указанным способом полимерных композитов, допированных магнитными наночастицами и лекарственными препаратами. Установлено, что предложенный способ смешения позволяет совмещать суспензии полимеров различной природы в составе композитов, пригодных для создания пористых, гигроскопичных и магнитоуправляемых материалов для биомедицинского и экологического применения.

Ключевые слова: функциональные композиты, биосовместимые полимеры, тканевая инженерия, ультразвуковое диспергирование, СВЧ-нагрев.

DOI: 10.31857/S0207401X24070119

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на стыке физики и химии развивается перспективное направление – микроволновая химия [1–5]. Оно включает в себя химические превращения, связанные с использованием энергии микроволнового поля с электромагнитными волнами длиной от одного миллиметра до одного метра, с участием образцов материалов в твердой и жидкой фазах. В отличие от теплового нагрева за счет теплопередачи или нагрева под действием ультразвукового поля, микроволновое излучение способно в сотни раз ускорять многие химические реакции и вызывать быстрый объемный нагрев жидких и твердых образцов. В связи с этим методы СВЧ-обработки широко используются для получения функциональных композитных материалов [6, 7].

Смешанные полимерные композиции, полученные из суспензий, в которых дисперсионные среды термодинамически не смешиваются друг с другом, представляют большой интерес при создании гибридных материалов с новыми функциональными свойствами [8]. К возможным областям применения смешанных полимерных композиций, полученных в условиях ультразвукового диспергирования и микроволнового нагрева, можно отнести тканевую инженерию, в которой необходимо совмещение биоразлагаемых полимеров с различными лекарственными формами, а также композиты для решения экологических задач, в частности для удаления из водных сред нефтяных загрязнений и тяжелых металлов. Разработка новых способов и подходов к формированию пористых биокомпозитов в биологическом материаловедении обусловлена необходимостью получения материалов с широким спектром физико-химических и биологических свойств, которые могут быть обеспечены только за счет сочетания нескольких компонентов.

Цель данной работы – разработка способов смешения растворов полимеров и коллоидных

суспензий с термодинамически несмешивающимися дисперсионными средами в условиях ультразвукового диспергирования и СВЧ-нагрева, а также определение физико-химических характеристик и функциональных свойств полученных композиций.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

При создании биокомпозитов для замещения дефектов костной ткани в настоящее время наиболее часто используются природные компоненты – коллаген и гидроксиапатит, которые в многочисленных экспериментах на животных показали не только превосходную биосовместимость, но и способность стимулировать костеобразование и служить матрицей для формирующейся костной ткани [9, 10]. Для изготовления кальций-фосфатных пористых биокомпозитов в работе была синтезирована суспензия частиц гидроксиапатита (ГАП) по реакции

$$6CaHPO_4 \cdot H_2O + 4Ca(OH)_2 \rightarrow \rightarrow Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2 + 12H_2O. \quad (1)$$

Кальций-фосфатные композиты получали путем смешения синтезированных частиц ГАП с водными суспензиями коллагена, альгината натрия и растворами ряда биодеградируемых полимеров (полилактида (ПЛА), поли-3-гидроксибутирата (ПГБ) и поликапролактона (ПКЛ)) в хлороформе. Для приготовления биокомпозитов на основе биодеградируемых полимеров применяли мелкодисперсный порошок ПГБ производства компании Biomer (Germany) с молекулярной массой $M_w = 2.5 \cdot 10^5$ и плотностью $d = 1.248$ г/см^3, гранулы ПЛА марки 4032D производства компании Nature Works (USA) с $M_w = 1.7 \cdot 10^5$, $d = 1.27$ г/см^3 и ПКЛ производства компании Flexstep (Китай). Растворы полимеров с концентрацией 7–8% в хлороформе смешивали с кальций-фосфатными концентратами, которые синтезировались по реакции (1).

Для приготовления растворов полимеров использовали органические растворители отечественного производства (хлороформ и метилэтилкетон), имеющие класс чистоты не ниже “х.ч.”, а также фторопластовый лак марки ЛФ-32ЛН (Профизолит, Россия) и фторопласт Ф-62 (Пластполимер, Россия). Смешение применяемых в работе термодинамически несмешиваемых жидкостей (в частности, вода/хлороформ) проводили в ультразвуковом (УЗ) поле с применением УЗ-диспергатора УЗДН-А с рабочей частотой 22 кГц. После УЗ-диспергирования полученные в результате смешения композиции пастообразной консистенции помещали в формы и удаляли жидкие фазы при нагревании под действием микроволнового излучения в СВЧ-печи (модель R-4A82, SHARP) мощностью 800 Вт на частоте 2.45 ГГц.

Смешение компонентов различной природы в условиях ультразвукового диспергирования и микроволнового нагрева осуществляли по одной из трех разработанных схем смешения, выбираемых в зависимости от характеристик смешиваемых компонентов и предполагаемых областей применения получаемого функционального композита.

По **первой** схеме смешение жидких композиций проводили в условиях ультразвукового (или роторно-пульсирующего) диспергирования. После смешения компонентов в течение 1–3 мин в УЗ-поле жидкие фазы из смеси удалялись путем нагрева в СВЧ-печи. Быстрый нагрев смеси приводил к удалению жидкости и образованию пор в композите.

По **второй** схеме УЗ-смешение проводили по аналогии с получением эмульсий так, что компонент с меньшей температурой кипения диспергировался в жидкости с большей температурой кипения (или в жидкости с меньшей величиной дипольного момента).

По **третьей** экспериментальной схеме смешение проводили путем построения конструкции, в которой нижний слой получали в условиях УЗ-диспергирования смешиваемых компонентов (по первой схеме), а на нижний слой наслаивался верхний слой с большей температурой кипения и меньшей плотностью. Верхний слой жидкости при этом может состоять из водорастворимых мономеров и участвовать в процессе смешения с компонентами нижнего слоя при выбросе его на поверхность верхнего слоя.

Регистрацию результатов смешения проводили с применением оптической и электронной микроскопии и спектроскопии в видимой и ИК-областях. Оптические микрофотографии образцов в режимах пропускания и отражения были получены на бинокулярном оптическом микроскопе BS-702B, оснащенном цифровой USB-камерой

Altami UCMOS08000KPB с программным обеспечением Altami Studio 3.4.0.

Электронные микрофотографии поверхности и срезов композитов были получены с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-T330A производства компании JEOL (Japan) при ускоряющем напряжении 10 кВ. Предварительная подготовка образцов включала напыление тонкого слоя золота (~10 нм) на установке вакуумного напыления JFC-1500 (JEOL, Japan). Регистрация изображения проводилась по синхронизованной схеме, разработанной П.Л. Александровым [11, 12], с использованием камеры PowerShot A590 IS производства компании Canon (Japan), управлявшейся с пульта электронного микроскопа.

В биокомпозитах, полученных путем смешения биодеградируемых полимеров с лекарственными препаратами – антиоксидантом меланином и фотосенсибилизатором хлорином (*N*-диметилглюкаминовая соль хлорина e_6 – препарат Фотодитазин®), после выдержки в условиях деградации в модельных растворах определяли скорость высвобождения лекарственных веществ и сохранность их биологической активности. Выход препаратов из полученных пористых композиций в форме пленок оценивали методом УФ-спектрометрии. Спектры поглощения надосадочной жидкости записывали с использованием спектрофотометра UV-1700 производства компании Shimadzu (Japan) в кювете объемом 3 мл с длиной оптического пути l = 1см. В качестве раствора сравнения использовали фосфатный буфер (pH = 7.4) с добавлением азида натрия (NaN_3, 0.2 г/100 мл). Этот раствор является модельной средой для деградации биокомпозитов. Точную навеску пленки помещали в термостат при 37 °C. Затем, с интервалом в несколько дней, записывали спектры поглощения растворов. Содержание хлорина в растворе оценивали по интенсивности поглощения на длине волны λ = 405 нм, содержание меланина – на длине волны λ = 450 нм [13].

Антирадикальную активность меланина определяли с помощью гомогенной гидрофильной хемилюминесцентной системы, состоящей из гемоглобина, пероксида водорода и люминола [14, 15]. В качестве измеряемых параметров были взяты латентный период достижения максимальной интенсивности свечения и амплитуда свечения без и в присутствии ингибитора. Кинетику хемилюминесценции регистрировали на спектрофлуориметре RF 5301PC производства компании Shimadzu (Japan) на длине волны люминесценции λ = 470 нм при комнатной температуре. В качестве контроля использовали буферный раствор без добавления биоактивных компонентов.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате синтеза частиц гидроксиапатита по реакции (1) в суспензии природного полимера – коллагена [9, 10] – и удаления жидкости из композита под действием микроволнового излучения в СВЧ-печи были изготовлены пористые органоминеральные композиты для замещения дефектов костной ткани (рис. 1) [16, 17].

Для улучшения прочностных свойств композитов на основе природных полимеров (коллагена, альгината натрия и других) и увеличения времени их биодеградации были изготовлены смешанные биокомпозиты на основе природных и синтетических биодеградируемых полимеров.

Применяемые синтетические полимеры растворимы в хлороформе, а природные полимеры – в воде, поэтому смешение суспензий полимеров проводили в условиях ультразвукового диспергирования. В результате смешения природных и синтетических полимеров с водными суспензиями частиц гидроксиапатита по первой экспериментальной схеме были получены смешанные пористые кальций-фосфатные композиты. Смешение 7%-ных растворов полимеров в хлороформе с 3%-ным водным раствором альгината натрия производили в ультразвуковом поле, а высушивание смешанных композиций проводили в СВЧ-печи. После удаления жидких сред из смешанных композиций были получены пористые образцы сме-

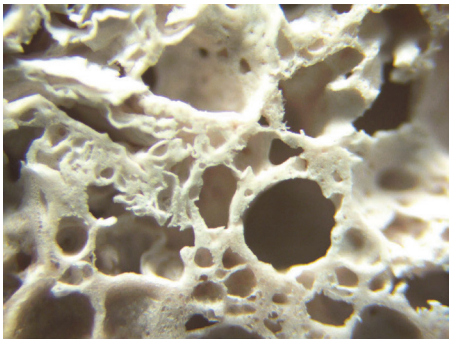

Рис. 1. Пористый образец композита коллаген/гидроксиапатит, полученный по первой схеме удаления жидкой фазы.

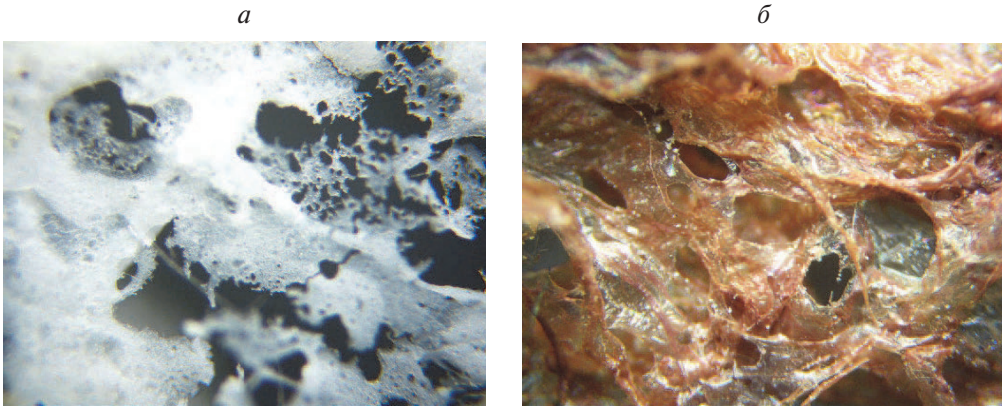

Рис. 2. Микрофотографии образцов, образовавшихся на водной поверхности в результате СВЧ-нагрева суспензий: *а* – образец из волокон ПГБ, *б* – образец из волокон ПГБ, допированных красителем (тетрафенилпорфирином).

шанных полимерных композитов, которые представляют большой интерес для тканевой инженерии при построении конструкций для замещения дефектов костной ткани.

В результате смешения полимерных компонентов по второй и третьей экспериментальным схемам также были получены пористые образцы биодеградируемых полимеров. После диспергирования в воде 7%-ного раствора ПГБ в хлороформе в течение 3 мин и последующего быстрого нагрева за счет поглощения СВЧ-энергии с удалением органического растворителя происходит формирование пористых образцов ПГБ белого цвета (рис. 2*а*). Аналогичный образец, допированный красителем (тетрафенилпорфирином), был изготовлен для визуализации выброса смеси компонентов из-под слоя воды при нагревании под действием СВЧ-излучения (рис. 2*б*). За 30 с СВЧ-нагрева произошел выброс образца с красителем на поверхность водной фазы.

В условиях УЗ-диспергирования и микроволнового нагрева были изготовлены образцы биодеградируемых композитов с лекарственными соединениями (фотосенсибилизатором и биоантиоксидантом). В результате смешения суспензий по третьей экспериментальной схеме в верхнем слое жидкости можно растворять полимерные компоненты, которые входят в состав смешанного композита. При таком подходе вылетающий из нижнего слоя полимер вместе с кипящим растворителем смешивается с компонентами верхнего слоя жидкости. По такой схеме эксперимента на слой 8%-ного раствора ПКЛ в хлороформе наслаивался слой 1%-ного раствора поли-*N*-винилпирролидона (ПВП) в воде, содержащего 25 мМ хлорина e_6 (препарат Фотодитазин®). В результате нагрева в СВЧ-печи в течение 30 с на поверхности верхнего слоя образовался смешанный композит.

Второй смешанный композит на основе ПЛА (7%-ный раствор в хлороформе) и ПВП (1%-ный раствор в воде с 50 мМ хлорина e_6) был получен путем смешения одинаковых количеств по массе компонентов в УЗ-поле и последующего нагрева в СВЧ-печи в течение 60 с. В результате нагрева произошел выброс композита на верхний слой воды. Для обоих смешанных композитов спектральными методами была изучена кинетика высвобождения препарата из полимерной матрицы и перехода его в буферный раствор (рис. 3).

Из спектров, представленных на рис. 3*а*, видно, что основной максимум поглощения, характерный для хлорина e_6 (405 нм), сохранился в обоих образцах, но его полуширина значительно увеличилась, а интенсивность на длине волны $\lambda = 665$ нм, напротив, заметно снизилась по сравнению со спектром поглощения исходного препарата [18]. Это может свидетельствовать об агрегации и частичной фотодеструкции хлорина в процессе приготовления образцов и по мере высвобождения его из полимерной матрицы. Аналогичное поведение наблюдалось для ряда тетрапирролов в полимерных пленках [19, 20]. Из данных, представленных на рис. 3*б*, можно видеть, что скорость высвобождения препарата для образца *1* в 2.7 раза выше, чем для образца *2*, что может быть связано с меньшей плотностью и более низкой температурой плавления композиций на основе ПКЛ, обладающих более оптимальными диффузионными характеристиками для иммобилизации и высвобождения лекарственных средств.

Также было зарегистрировано высвобождение антиоксиданта меланина из смешанной компо-

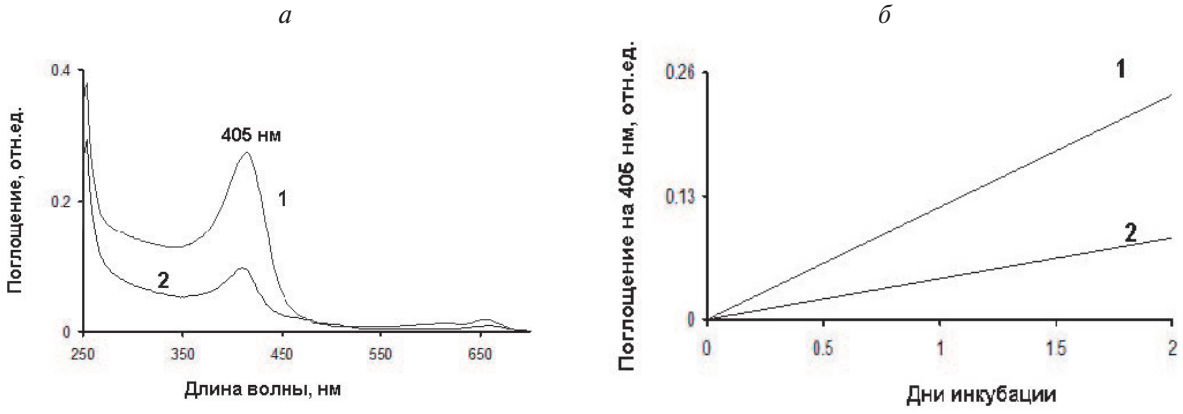

Рис. 3. *а* – Спектры поглощения хлорина на второй день инкубации образцов полимерных композитов; *б* – зависимость выхода хлорина из образцов композитов от времени инкубации в буферном растворе при температуре 37 °C; *1* – образец ПКЛ + ПВП + хлорин, *2* – образец ПЛА + ПВП + хлорин.

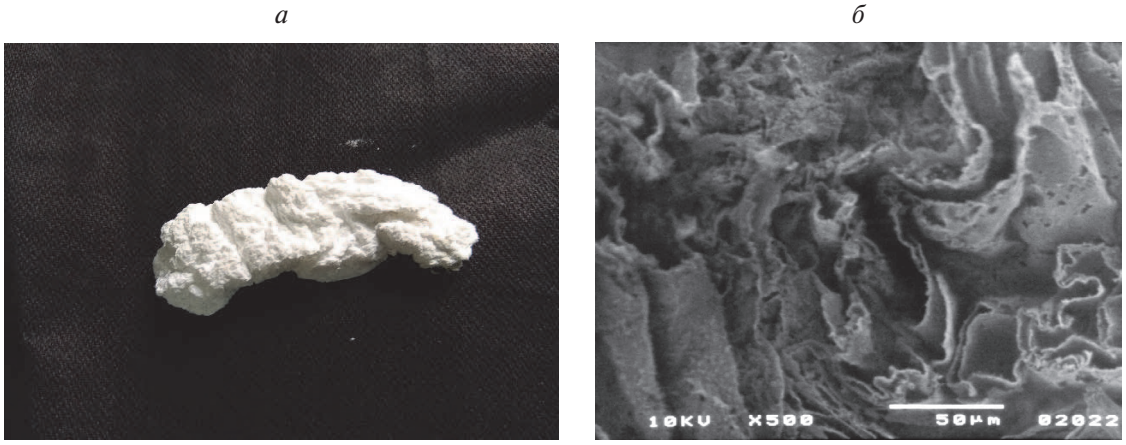

Рис. 4. *а* – Внешний вид вспененного образца сополимера Ф-62 после высушивания, *б* – электронная микрофотография среза образца сополимера.

зиции меланина с ПГБ и его перехода в буферный раствор. После выхода из полимерной матрицы меланин эффективно тушит люминесценцию люминола приблизительно в 3 раза, что свидетельствует о сохранении его антиоксидантных свойств в составе смешанной композиции [13].

Смешение термодинамически несмешиваемых коллоидных суспензий типа вода/хлороформ можно осуществлять с различными полимерными суспензиями в условиях УЗ-диспергирования и микроволнового нагрева и получать образцы материалов с новыми функциональными свойствами. Так, при диспергировании в УЗ-поле 5 г фторопластового лака в 20 г воды и нагреве в СВЧ-печи в течение 60 с образовалась фторопластовая пленка на поверхности воды весом до 0.4 г. Фторопластовая пленка имела характерные полосы в ИК-спектрах: мода CF_2 – пики при 1198, 741, 332, 439 $см^{-1}$, мода С–С – при 1290 $см^{-1}$.

Еще одним примером получения вспененного образца фторопласта Ф-62 (сополимер дифторэтилена с гексафторпропиленом с мольным отношением сомономеров 93/7) является диспергирование 5 мл 10%-ного раствора Ф-62 в метилэтилкетоне (МЭК) в 20 мл воды, которая является осадителем для данного класса полимеров. Суспензию белого цвета после диспергирования нагревали в течение 1 мин в СВЧ-печи. В результате образовался вспененный образец сополимера Ф-62 с неупорядоченной надмолекулярной структурой, представленный на рис. 4.

При диспергировании 5%-ного раствора Ф-62 в МЭК в суспензии магнитной жидкости (дисперсные частицы магнетита в буферном растворе, полученные по методике, описанной ранее [21]) и последующем микроволновом нагреве был получен смешанный полимерный композит с включением частиц магнетита. На рис. 5 представлены

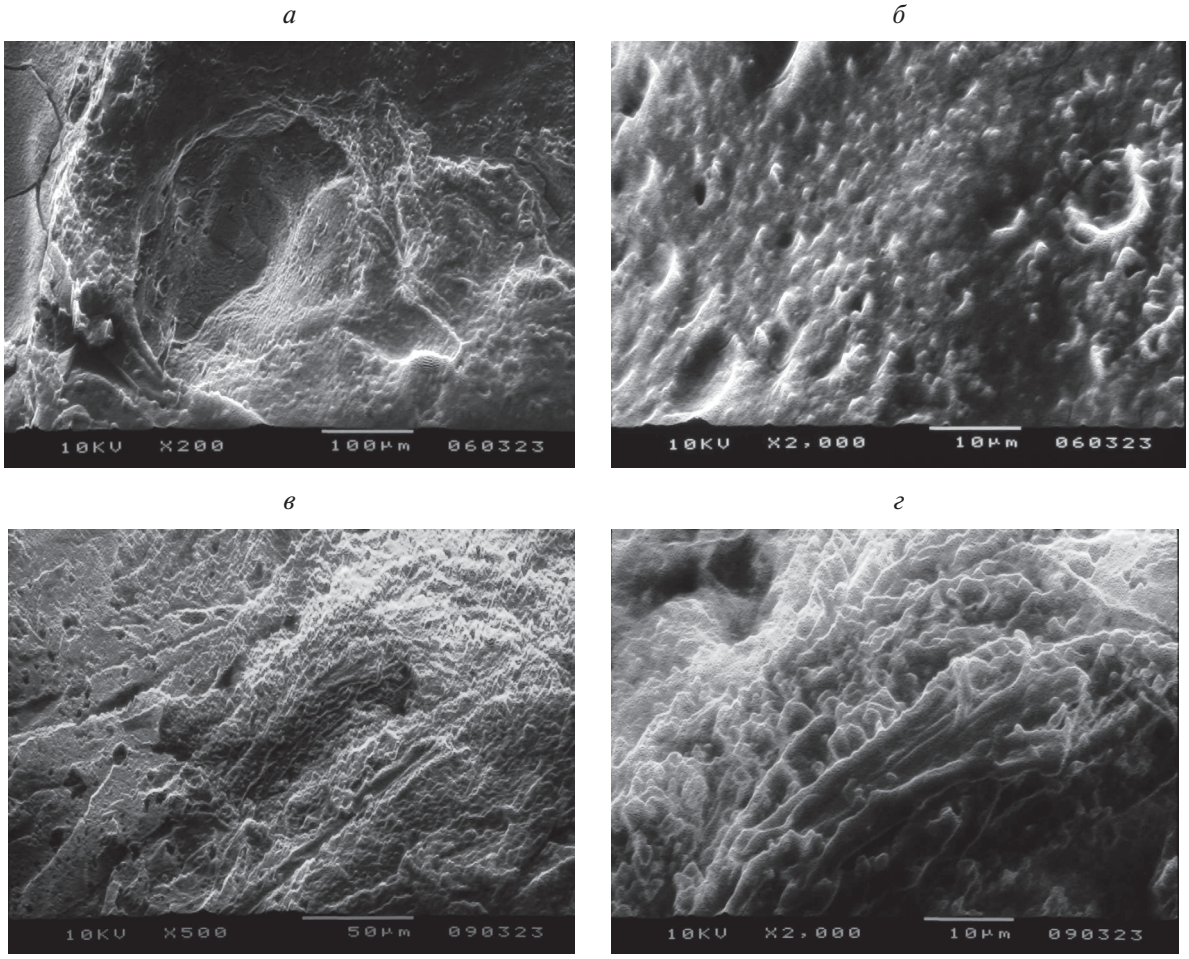

Рис. 5. Электронные микрофотографии образцов исходного сополимера Ф-62 (*а, б*) и его композита с магнитными частицами (*в, г*) после СВЧ-обработки.

электронные микрофотографии образцов исходного сополимера Ф-62 (рис. 5*а, б*) и его композита с магнитными частицами (рис. 5*в, г*) после СВЧ-обработки. Подобные композиты, сочетающие в себе сегнетоэлектрические свойства фторопласта [22] и ферримагнитные свойства допанта, относятся к мультиферроикам [23–26] и могут быть использованы для создания различных магнитоэлектрических устройств [27–29].

Новый подход к смешению полимерных компонентов в различных по природе дисперсионных средах был апробирован при смешении раствора фторопласта с водной композицией для полимеризации акриламидного геля (ПААГ). В результате микроволнового нагрева в течение 1 мин произошло образование композита, состоящего из смеси фторопласта и полиакриламида. Вспененная полимерная композиция применялась для сорбции 1 М раствора хлорида кобальта (II) за счет набухания полиакриламида. При этом гидрофобная часть композита за счет фторопластового компонента удерживала образец на поверхности раствора. При набухании в течение 40 мин вес образца увеличился в 22 раза, а после высушивания под действием СВЧ-излучения в течение 1 мин он уменьшился на 80%. Впоследствии полученный образец помещался в раствор восстановителя ($NaBH_4$) для придания ему ферромагнитных свойств.

На рис. 6 представлены фотографии образцов после набухания полученного полимерного композита в растворе хлорида кобальта (II) (рис. 6*а*) и его последующего взаимодействия с боргидридом натрия (рис. 6*б*). Восстановленный образец обладал ферромагнитными свойствами, что позволяет использовать полученные композиты в экологических целях для эффективной сорбции и последующей магнитоуправляемой транспортировки загрязнителей водной среды [30–33].

а *б*

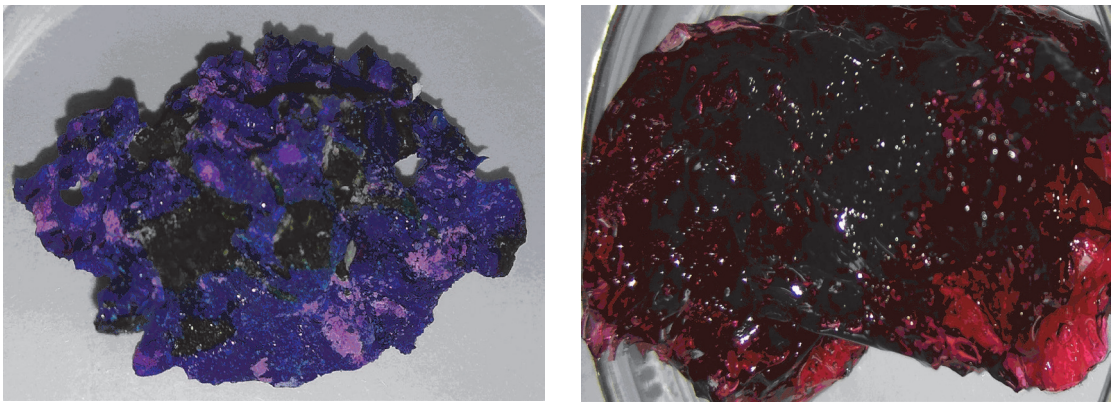

Рис. 6. Образцы композита ПААГ с фторопластом: *а* – гель после набухания в растворе хлорида кобальта, *б* – образец после помещения в раствор $NaBH_4$.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено несколько способов смешения полимерных суспензий с термодинамически несмешивающимися дисперсионными средами в условиях ультразвукового диспергирования и СВЧ-нагрева. Смешанные полимерные суспензии использованы для получения композиций с новыми функциональными свойствами, в частности гибридных органоминеральных материалов на основе биоразлагаемых полимеров для регенерации костной ткани, магнитоуправляемых композитов на основе сегнетоэлектрических сополимеров, а также смешанных полимерных композиций с биологически активными соединениями, обеспечивающих постепенное высвобождение лекарственных препаратов, иммобилизованных в полимерной матрице.

Авторы выражают признательность с.н.с. О.В. Градову за возможность исследования образцов в ЦКП мультипараметрической микроскопии и с.н.с. М.А. Градовой за предоставление реактивов и помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FFZE-2022-0009).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Galema S.A.* // Chem. Soc. Rev. 1997. V. 26. № 3. P. 233. https://doi.org/10.1039/CS9972600233
2. *Gawande M.B., Shelke S.N., Zboril R., Varma R.S.* // Acc. Chem. Res. 2014. V. 47. № 4. P. 1338. https://doi.org/10.1021/ar400309b
3. *Кубракова И.В.* // Успехи химии. 2002. Т. 71. № 4. С. 327. https://doi.org/10.1070/RC2002v071n04ABEH000699
4. *Abramovich R.A.* // Org. Prep. Proced. Int. 1991. V. 23. P. 685.
5. *Gradov O.V., Gradova M.A.* // *Chemosensors*. 2019. V. 7. № 4. P. 48. https://doi.org/10.3390/chemosensors7040048
6. *Bogdal D., Prociak A., Michalowski S.* // Curr. Org. Chem. 2011. V. 15. № 2. P. 178. https://doi.org/10.2174/138527211793979835
7. *Bogdal D., Bednarz S., Matras-Postolek K.* // Adv. Polym. Sci. 2015. V. 274. P. 241. https://doi.org/10.1007/12_2014_296
8. *Горшенев В.Н.* // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 2. С. 71. https://doi.org/10.1134/S0207401X19020055
9. *Горшенев В.Н., Телешев А.Т., Ершов Ю.А. и др.* Способ получения пористого костного биокомпозита: Патент РФ № 2482880 // Б.И. 2013. № 15.
10. *Горшенев В.Н., Ершов Ю.А., Телешев А.Т. и др.* // Мед. техника. 2014. Т. 1. № 283. С. 30.
11. *Maklakova I.A., Gradov O.V., Gradova M.A., Aleksandrov P.L.* // *Key Engineering Materials*. 2021. V. 899. P. 660. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.899.660
12. *Градов О.В., Александров П.Л., Градова М.А.* // *Прогр. системы и вычислит. методы*. 2019. № 4. С. 125. https://doi.org/10.7256/2454-0714.0.0.31379
13. *Яковлева М.А., Горшенев В.Н., Донцов А.Е., Ольхов А.А.* // Технологии живых систем. 2022. Т. 19. № 4. С. 5. https://doi.org/10.18127/j20700997-202204-05
14. *Porębska-Budny M., Sakina N.L., Stępień K.B., Dontsov A.E., Wilczok T.* // Biochim. Biophys. Acta (BBA) – General Subjects. 1992. V. 1116. № 1. P. 11. https://doi.org/10.1016/0304-4165(92)90121-a
15. *Теселкин Ю.О., Бабенкова И.В., Любицкий О.Б., Клебанов Г.И., Владимиров Ю.А.* // Вопр. мед. химии. 1998. Т. 44. № 1. С. 70.
16. *Горшенёв В.Н., Градов О.В., Градова М.А.* // Гены и клетки. 2019. Т. 14. № S1. С. 68. http://doi.org/10.23868/gc122415

17. *Горшенёв В.Н., Ольхов А.А., Градов О.В., Градова М.А., Александров П.Л.* // Гены и клетки. 2019. Т. 14. № S1. С. 69. https://doi.org/10.23868/gc122418.
18. *Клименко И.В., Лобанов А.В.* // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 1. С. 13. https://doi.org/10.7868/S0207401X18010077
19. *Клименко И.В., Градова М.А., Градов О.В., Бибиков С.Б., Лобанов А.В.* // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 5. С. 43. https://doi.org/10.31857/S0207401X20050076
20. *Kochervinskii V.V., Gradova M.A., Gradov O.V. et al.* // Nanomaterials. 2023. V. 13. № 3. P. 564. https://doi.org/10.3390/nano13030564
21. *Коварский А.Л., Сорокина О.Н., Горшенев В.Н., Тихонов А.П.* // ЖФХ. 2007. Т. 81. № 2. С. 364.
22. *Кочервинский В.В., Градов О.В., Градова М.А.* // *Успехи химии*. 2022. Т. 91. № 11. С. RCR5037.
23. *Spaldin N.A., Ramesh R.* // Nat. Mat. 2019. V. 18. № 3. P. 203. http://doi.org/10.1038/s41563-018-0275-2
24. *Lottermoser T., Meier D.* // Phys. Sci. Rev. 2020. V. 6. № 20200032. https://doi.org/10.1515/psr-2020-0032
25. *Prasad P.D., Hemalatha J.* // Mat. Res. Exp. 2019. V. 6. № 094007.
26. *Newacheck S., Singh A., Youssef G.* // Smart Mat. Struct. 2021. V. 31. № 015022.
27. *Palneedi H., Annapureddy V., Priya S., Ryu J.* // Actuators. 2016. V. 5. № 1. P. 9. https://doi.org/10.3390/act5010009
28. *Andrew J.S., Starr J.D., Budi M.A.* // Scripta Mat. 2014. V. 74. P. 38. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2013.09.023
29. *Lu X., Liu J., Zhao J., Wang M., Pan Z.* // J. Alloys Compd. 2022. V. 918. № 165772. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165772
30. *Жуков А.М., Солодилов В.И., Третьяков И.В., Буракова Е.А., Юрков Г.Ю.* // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 9. С. 64. https://doi.org/10.31857/S0207401X22090138
31. *Алымов М.И., Сеплярский Б.С., Вадченко С.Г. и др.* // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 4. С. 85. https://doi.org/10.31857/S0207401X21040026
32. *Калинина И.Г., Иванов В.Б., Семенов С.А., Казарин В.В., Жданова О.А.* // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 6. С. 18. https://doi.org/10.31857/S0207401X21060157
33. *Кривнов В.Я., Дмитриев Д.В.* // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 2. С. 29. https://doi.org/10.31857/S0207401X21020102

POROUS POLYMER COMPOSITIONS BASED ON MIXED COLLOIDAL SUSPENSIONS UNDER ULTRASONIC DISPERSION AND MICROWAVE HEATING

V. N. Gorshenev[1], I. A. Maklakova[2], M. A. Yakovleva[1, *]

[1]Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[2]Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
**E-mail: lina.invers@gmail.com*

A new method for mixing solutions and suspensions containing thermodynamically immiscible dispersion media based on the use of ultrasonic dispersion and thermally stimulated microwave heating has been proposed. The results of a study of a number of functional composites obtained by mixing solutions of biodegradable polymers in chloroform with aqueous suspensions of natural polymers are presented. The possibility of obtaining polymer composites doped with magnetic nanoparticles and drugs by this method is considered. It has been established that the proposed method of mixing makes it possible to combine suspensions of polymers of different nature in the composition of composites suitable for creating porous, hygroscopic and magnetically controlled materials for biomedical and environmental applications.

Keywords: functional composites, biocompatible polymers, tissue engineering, ultrasonic dispersion, microwave heating.

REFERENCES

1. S.A. Galema, Chemical Society Reviews. **26**(3), 233 (1997). https://doi.org/10.1039/CS9972600233
2. M.B. Gawande, S.N. Shelke, R. Zboril, R.S. Varma, Accounts of Chemical Research. **47**(4), 1338 (2014). https://doi.org/10.1021/ar400309b
3. I.V. Kubrakova, Successes of Chemistry. **71**(4), 327 (2002). https://doi.org/10.1070/RC2002v071n04ABEH000699
4. R.A. Abramovich, Org. Prep. Proced. Int. **23**, 685 (1991).
5. O.V. Gradov, M.A. Gradova, Chemosensors. **7**(4), 48 (2019). https://doi.org/10.3390/chemosensors7040048
6. D. Bogdal, A. Prociak, S. Michalowski, Current Organic Chemistry. **15**(2), 178 (2011). https://doi.org/10.2174/138527211793979835
7. D. Bogdal, S. Bednarz, K. Matras-Postolek, Advances in Polymer Science. **274**, 241–294 (2015). https://doi.org/10.1007/12_2014_296
8. V.N. Gorshenev, Russian Journal of Physical Chemistry B. **13** (1), 165–169 (2019). https://doi.org/10.1134/S1990793119010214/
9. V.N. Gorshenev, A.T. Teleshev, Yu.A. Ershov, et al., Method of obtaining a porous bone biocomposite // Patent RF: 2482880. 2013.
10. V.N. Gorshenev, Yu.A. Ershov, A.T. Teleshev, et al., Medical Technique. **1**(283), 30 (2014).
11. I.A. Maklakova, O.V. Gradov, M.A. Gradova, P.L. Aleksandrov, *Key Engineering Materials*. **899**, 660 (2021). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.899.660
12. O.V. Gradov, P.L. Alexandrov, M.A. Gradova, Program systems and computational methods. **4**, 125 (2019). http://doi.org/10.7256/2454-0714.0.0.31379
13. M.A. Yakovleva, V.N. Gorshenev, A.E. Dontsov, A.A. Olkhov, Technologies of living systems. **19**(4), 5 (2022). https://doi.org/10.18127/j20700997-202204-05
14. M. Porębska-Budny, N.L. Sakina, K.B. Stępień, A.E. Dontsov, T. Wilczok, Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects. **1116**(1), 11 (1992). https://doi.org/10.1016/0304-4165(92)90121-a
15. Yu.O. Teselkin, I.V. Babenkova, O.B. Lyubitsky, G.I. Klebanov, Yu.A. Vladimirov, Questions of Medical Chemistry. **44**(1), 70 (1998).
16. V.N. Gorshenev, O.V. Gradov, M.A. Gradova, Genes and cells. **14**(S1), 68 (2019). https://doi.org/10.23868/gc122415
17. V.N. Gorshenev, A.A. Olkhov, O.V. Gradov, M.A. Gradova, P.L. Alexandrov, Genes and cells. **14**(S1), 69 (2019). https://doi.org/10.23868/gc122418
18. I.V. Klimenko, A.V. Lobanov, Russian Journal of Physical Chemistry B **12**(1), 10 (2018). http://doi.org/10.1134/S1990793118010074
19. I.V. Klimenko, M.A. Gradova, O.V. Gradov, S.B. Bibikov, A.V. Lobanov, Russian Journal of Physical Chemistry B **14**(3), 436 (2020). http://doi.org/10.1134/s1990793120030070
20. V.V. Kochervinskii, M.A. Gradova, O.V. Gradov, et al., *Nanomaterials*. **13**(3), 564 (2023). https://doi.org/10.3390/nano13030564
21. A.L. Kovarsky, O.N. Sorokina, V.N. Gorshenev, A.P. Tikhonov, Journal of Physical Chemistry. **81** (2), 364 (2007).
22. V.V. Kochervinskii, O.V. Gradov, M.A. Gradova, Russian Chemical Reviews. **91**(11), RCR5037 (2022).
23. N.A. Spaldin, R. Ramesh, Nature Materials. **18**(3), 203 (2019). https://doi.org/10.1038/s41563-018-0275-2

24. T. Lottermoser, D. Meier, Physical Sciences Reviews. **6** (2), 20200032 (2020). https://doi.org/10.1515/psr-2020-0032
25. P.D. Prasad, J. Hemalatha, Materials Research Express. **6** (9), 094007 (2019).
26. S. Newacheck, A. Singh, G. Youssef, Smart Materials and Structures. V. **31**(1), 015022 (2021).
27. H. Palneedi, V. Annapureddy, S. Priya, J. Ryu, Actuators. **5** (1), 9 (2016). https://doi.org/10.3390/act5010009
28. J.S. Andrew, J.D. Starr, M.A. Budi, Scripta Materialia. **74**, 38 (2014). https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2013.09.023
29. X. Lv, J. Liu, J. Zhao, M. Wang, Z. Pan, Journal of Alloys and Compounds. **918**, 165772 (2022). https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165772
30. A.M. Zhukov, V.I. Solodilov, I.V. Tretyakov, E.A. Burakova, G.Yu. Yurkov, Russian Journal of Physical Chemistry B. **16** (5), 926 (2022). https://doi.org/10.1134/S199079312205013X
31. M.I. Alymov, B.S. Seplyarskii, S.G. Vadchenko, V.A. Zelensky, N.M. Rubtsov, R.A. Kochetkov, A.S. Shchukin, I.D. Kovalev, Russian Journal of Physical Chemistry B. **15**(2), 352 (2021). https://doi.org/10.1134/S1990793121020135
32. I.G. Kalinina, V.B. Ivanov, S.A. Semenov, V.V. Kazarin, O.A. Zhdanova, Russian Journal of Physical Chemistry B. **15** (3), 506 (2021). http://doi.org/10.1134/S1990793121030210
33. V.Ya. Krivnov, D.V. Dmitriev, Russian Journal of Physical Chemistry B. **15**(1), 89 (2021). https://doi.org/10.1134/S199079312101022X