

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СИНТЕЗ МИКРОГЕЛЕЙ МЕТОДОМ ОБРАТНОЙ ЭМУЛЬСИИ

Д.А. Бурин
Ю.А. Рожкова
И.В. Виндокуров
В.Г. Рябов

burinwork@gmail.com
ketova.pstu@gmail.com
ivv@pstu.ru
rvg@pstu.ru

ПНИПУ, Пермь, Российская Федерация

Аннотация

Представлены результаты исследований, которые посвящены синтезу микрогелей на основе акриламида, проведенных с использованием метода обратной эмульсии. Особое внимание уделено изучению влияния концентрации эмульгатора, его состава и природы дисперсионной среды на морфологию микрогелей. Эксперименты позволили установить, что увеличение концентрации эмульгатора существенно влияет на форму и размер частиц микрогелей. Определена оптимальная концентрация композиции эмульгаторов, обеспечивающая получение частиц микрогелей округлой формы. Использование керосина в качестве дисперсионной среды и композиции эмульгатора на основе глицерил стеарата и «Твин-80» при концентрации 2 % доказали свою эффективность. Установлено, что природа дисперсионной среды и эмульгатора значительно влияет на морфологические характеристики микрогелей. Полученные результаты имеют большую практическую значимость, поскольку могут быть использованы для оптимизации параметров синтеза микрогелей и их применения в различных областях (медицина, косметология и пищевая промышленность). Это открывает новые перспективы для разработки инновационных материалов и технологий на основе микрогелей, что может способствовать созданию более эффективных продуктов и процедур

Ключевые слова

Микрогели, акриламид, метод обратной эмульсии, дисперсионная среда, размер частиц

Поступила 03.07.2023

Принята 18.10.2023

© Автор(ы), 2024

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук (свидетельство МК-1751.2022.1.3). При выполнении исследования использовано оборудование, приобретенное в рамках Федеральной программы академического лидерства «Приоритет-2030»

Введение. Микрогели — частицы, размер которых находится в диапазоне значений 100 нм...100 мкм [1]. В настоящее время их применяют в различных областях — в медицине [2, 3], косметике [4, 5], пищевой промышленности [6, 7], нефтедобыче [8, 9] и т. д. Микрогели представляют собой микроскопические гидрогели, которые обладают уникальными свойствами, такими как реагирование на изменение температуры [10], рН [11] и ионной силы [12]. Микрогели перспективны для создания новых материалов с разными функциональными характеристиками (оптическими, электрическими, механическими и биологическими), вследствие чего могут быть использованы в качестве носителей лекарственных веществ, катализаторов, сенсоров и других приложений [13].

Один из наиболее распространенных методов синтеза микрогелей — эмульсионная полимеризация [14], которая позволяет получать микрогели с контролируемым размером частиц и структурой. Важным фактором, влияющим на размер и свойства микрогелей, является концентрация эмульгатора и дисперсионной среды. Акриламид — один из наиболее распространенных мономеров для синтеза микрогелей, он может быть модифицирован различными функциональными группами для придания микрогелям дополнительных свойств. Обзор микрогелей, синтезированных на основе акриламида, для применения при нефтедобыче в целях модификации профиля пласта приведен в [15].

Цель работы — изучение влияния концентрации эмульгатора и дисперсионной среды на размер микрогелей, полученных методом эмульсионной полимеризации акриламида. Основные задачи исследования: определить оптимальную концентрацию эмульгатора и дисперсионной среды для получения микрогелей заданного размера; измерить размер частиц микрогелей с использованием лазерной дифракции; исследовать термочувствительные свойства микрогелей с помощью динамического светорассеяния; оценить стабильность микрогелей в присутствии электролитов.

Полученные результаты могут быть полезны для разработки новых материалов на основе микрогелей и оптимизации производственных процессов в различных областях применения микрогелей.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Для получения микрогелей использована эмульсионная полимеризация акриламида. Для проведения синтеза необходимы дисперсная среда — раствор мономера, дисперсионная среда, углеводородный растворитель, эмульгаторы, инициатор.

В качестве дисперсионной фазы выбраны такие углеводородные растворители, как керосин, парафиновое масло и вазелин. Композиция эмуль-

гатора подобрана в соответствии с гидрофильно-липофильным балансом (ГЛБ) дисперсионной среды [16]. В качестве компонентов эмульгирующей смеси использованы неионогенные поверхностно-активные вещества полисорбатного типа марок «Твин-80» (полиоксиэтилен сорбитан моноолеат, ГЛБ 15,0), «Твин-60» (полиоксиэтилен сорбитан моностеарат, ГЛБ 15,6), «Твин-20» (полиоксиэтилен сорбитан монолаурат, ГЛБ 16,7) и глицерил стеарат.

Дисперсная фаза приготовлена из смеси мономеров акриламида, акриловой кислоты, нейтрализованной гидроксидом натрия, с водой. Состав эмульсии для каждого нового эксперимента сформирован следующим образом: 20 % (масс.) дисперсная среда, 1...5 % (масс.) композиция эмульгаторов, 75...79 % (масс.) дисперсионная среда. Инициатор введен дополнительно в виде водного раствора персульфата аммония предельной концентрации.

Для проведения синтеза использована лабораторная установка, схема которой приведена на рис. 1 [17]. Протокол испытаний включал в себя следующие этапы:

- подготовка водной (дисперсной) фазы: изготовление смеси мономеров акриламида с акриловой кислотой;
- подготовка органической (дисперсионной) фазы: выбор углеводородного растворителя, введение композиции эмульгаторов (нагрев фазы до температуры 75 °С);
- изготовление эмульсии путем ввода водной фазы в органическую при постоянном перемешивании (600 мин⁻¹, температура 60...75 °С);
- инициация свободной радикальной реакции раствором персульфата аммония;
- полимеризация: перемешивание при 600...700 мин⁻¹ в течение 2 ч, температура 95...100 °С;
- отделение получившихся микрогелей путем фильтрования под вакуумом, сушка в изопропанолем;
- определение гранулометрического состава микрогелей с использованием оптического микроскопа *Olympus BX43*. Всего проанализированы размеры 20 частиц для каждого образца.

Результаты и обсуждения. В соответствии с протоколом испытаний синтезированы 11 различных образцов микрогелей. Испытания поделены на три блока. Первый блок направлен на выявление влияния концентрации композиции деэмульгаторов на форму и размер микрогелей, второй — на определение влияния природы дисперсионной среды на фор-

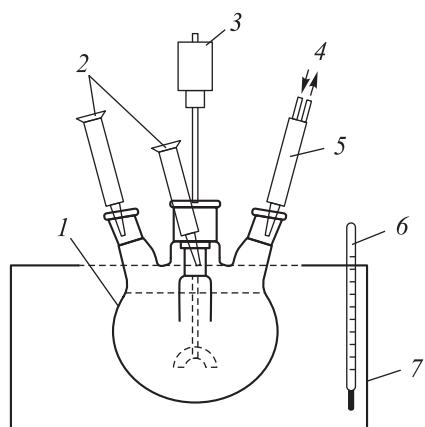


Рис. 1. Схема лабораторной установки для синтеза микрогелей:

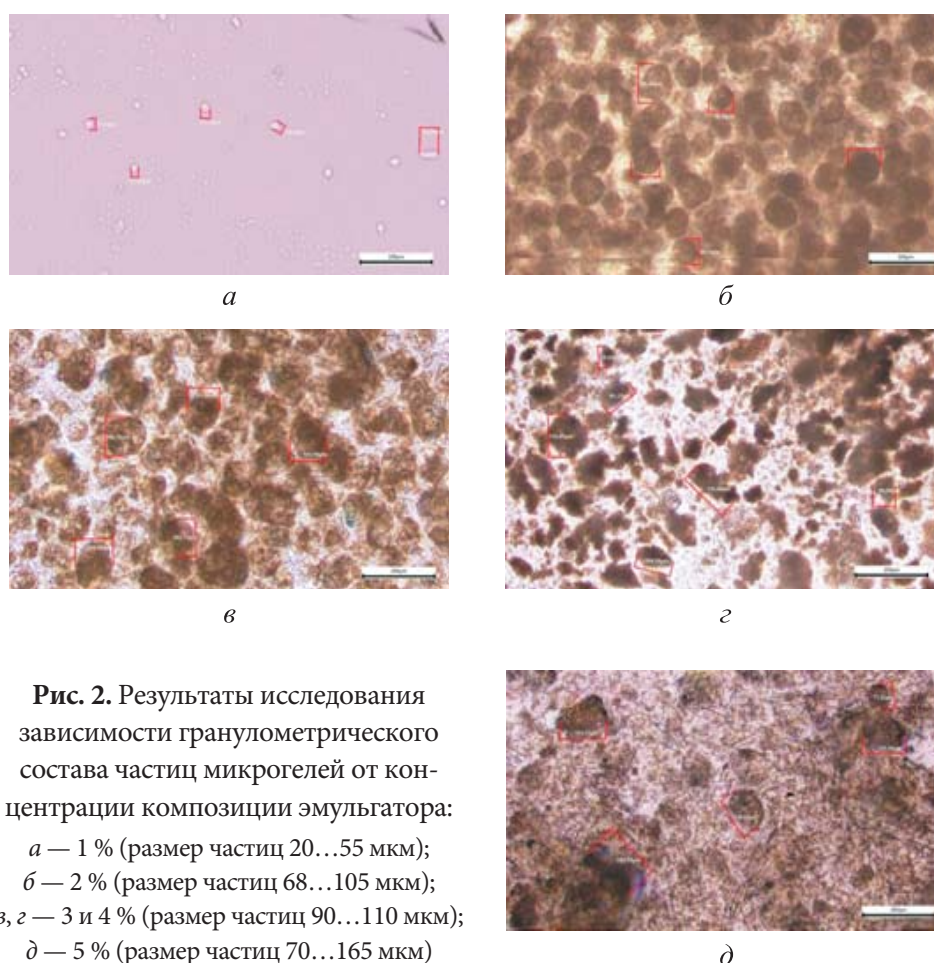
- 1 — колба с четырьмя горлышками;
 2 — опускающиеся воронки; 3 — механическая мешалка; 4 — охлаждающая вода; 5 — обратный конденсатор;
 6 — термометр; 7 — водяная баня

мирование микрогелей, третий — на установление влияния на форму мицелл структуры эмульгатора.

Первый блок. Выявление влияния концентрации композиции деэмульгатора на форму и размер микрогелей. В качестве дисперсионной среды использован керосин. За основу композиции эмульгаторов взяты глицерил стеарат и «Твин-80». Выбор эмульгаторов и их соотношение в смеси обусловлены типом эмульсии (обратная эмульсия) и ГЛБ поверхностно-активных веществ и дисперсионной среды. Эксперименты по синтезу микрогелей проведены при различных значениях концентрации композиции эмульгаторов: от 1 до 5 % относительно массы эмульсии. Фотографии образцов микрогелей, полученных на оптическом микроскопе, с указанием диапазона размеров частиц приведены на рис. 2.

Полимеризация при концентрации композиции эмульгатора 1 % не происходила вследствие распада эмульсии при инициировании реакции полимеризации. Формирующиеся частицы слипались, образуя отдельные крупные гранулы полимера или один фрагмент полимера. При концентрации композиции эмульгатора 2 % форма полученных микрогелей округлая (см. рис. 2), гранулы примерно одного гранулометрического состава. Размеры варьируются в диапазоне значений 50...110 мкм. При концентрации композиции эмульгатора более 2 % их форма меняется: микрогели теряют округлую форму. Это явление — результат высокой энергии поверхности образующихся мицелл ввиду скопившихся в этой области молекул эмульгаторов. При концентрации композиции эмульгатора 3 % размеры частиц варьируются в пределах 70...110 мкм. При концентрации композиции эмульгаторов 4...5 % эмульсия постепенно приобретает ламеллярную структуру, так как микрогели имеют нерегулярную, в том числе пластинчатую, форму.

Для дальнейших исследований оптимальная концентрация композиции эмульгатора принята равной 2 %, поскольку при ней формируются микрогели округлой формы.



Второй блок. Определение влияния природы дисперсионной среды на формирование микрогелей. С учетом визуальной оценки формы полученных образцов микрогелей для дальнейших исследований по определению влияния природы дисперсионной среды на формирование микрогелей выбрана концентрация эмульгирующей композиции 2 %. Синтез проведен в керосине, парафиновом масле и вазелине. Указанные дисперсионные среды выбраны вследствие их доступности и различных показателей ГЛБ. Для керосина ГЛБ составляет 12, для парафинового масла — 11, для вазелина — 6. Для каждой дисперсионной среды проведена корректировка состава композиции эмульгаторов в соответствии с ГЛБ дисперсионной среды, при этом использованы только два эмульгатора (глицерил стеарат, «Твин-80»). Фотографии образцов микрогелей, полученных на оптическом микроскопе, с указанием диапазона размеров частиц приведены на рис. 3.

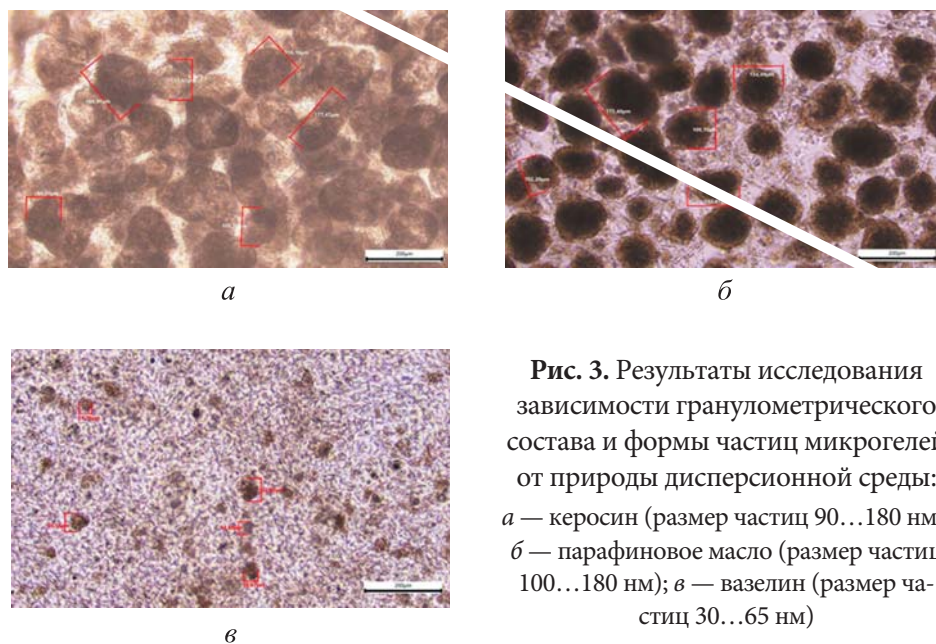


Рис. 3. Результаты исследования зависимости гранулометрического состава и формы частиц микрогелей от природы дисперсионной среды: *а* — керосин (размер частиц 90...180 нм); *б* — парафиновое масло (размер частиц 100...180 нм); *в* — вазелин (размер частиц 30...65 нм)

Синтез в керосине и парафиновом масле дает примерно одинаковую морфологию микрогелей как по размеру, так и по форме, ГЛБ этих сред близки (11–12) и сильно отличаются от ГЛБ вазелина.

Микрогели, полученные в парафиновом масле, выглядят более темными, ввиду чего можно предположить, что они имеют большее число поперечных сшивок в структуре, образующихся в процессе реакции имидизации между аминогруппами мономеров акриламида, которые расположены в параллельных полимерных цепях. Этот процесс происходит при температуре 100...110 °С. Возможно, формированию более плотной структуры микрогелей способствует высокая температура кипения парафинового масла и его большая вязкость по сравнению с вязкостью керосина.

В вазелине, ГЛБ которого значительно отличается от ГЛБ керосина и парафинового масла, микрогели получились значительно меньшего размера (до 60...70 мкм). Вероятно, по закону Стокса, вазелин, будучи наиболее вязкой дисперсионной средой, способствовал лучшему эмульгированию смеси мономеров, что привело к формированию микрогелей с меньшим гранулометрическим составом.

Третий блок. Установление влияния на форму мицелл структуры эмульгатора. Этот блок направлен на выявление зависимости формы и размера микрогелей от природы эмульгатора. Эксперименты также проведены в присутствии 2%-ной эмульгирующей смеси. Синтез осуществлен в керосине, композицию эмульгаторов адаптировали под ГЛБ керо-

сина. Рассмотрены три композиции: 1) «Твин-20» + глицерил стеарат; 2) «Твин-60» + глицерил стеарат; 3) «Твин-80» + глицерил стеарат. Фотографии образцов микрогелей, полученных на оптическом микроскопе, с указанием диапазона размеров частиц приведены на рис. 4.

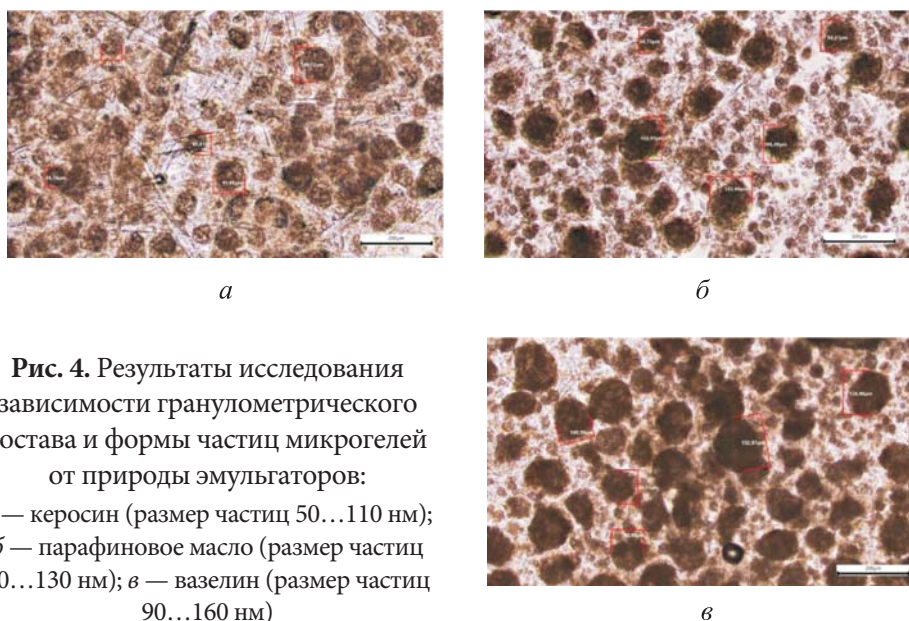


Рис. 4. Результаты исследования зависимости гранулометрического состава и формы частиц микрогелей от природы эмульгаторов:
а — керосин (размер частиц 50...110 нм);
б — парафиновое масло (размер частиц 40...130 нм); *в* — вазелин (размер частиц 90...160 нм)

Классическим подходом к формированию устойчивых мицелл в эмульсиях является использование эмульгирующей смеси, в состав которой входят поверхностно-активные вещества с различными значениями ГЛБ. Как уже было отмечено, в качестве основного эмульгатора использован глицерил стеарат, в качестве дополнительного — поверхностно-активные вещества полисорбатного типа марок «Твин». Несмотря на то, что ГЛБ эмульгаторов марок «Твин» близки, а их концентрация в итоговой форме эмульгирующей системы варьировалась в пределах 32...35 %, фотографии микрогелей позволили установить различия. При использовании в качестве соэмульгатора «Твин-20» гранулометрический состав более однородный: размер основной фракции микрогелей составляет 50...110 мкм. При введении «Твин-60» распределение размеров частиц более сильное (см. рис. 4): около 75 % частиц микрогеля имеют размер до 60 мкм, остальные — 60...120 мкм. Микрогели, полученные с использованием эмульгирующей смеси с «Твин-80», имеют более однородный гранулометрический состав по сравнению с другими образцами. Размер частиц микрогелей 90...160 мкм. Частицы имеют более темную окраску и, следовательно, более плотную структуру.

Результаты экспериментов позволяют сделать вывод о том, что оптимальная концентрация эмульгатора для синтеза микрогелей округлой формы составляет 2 %, что подтверждают результаты других исследований. Так, в [18] показано, что оптимальная концентрация эмульгатора для синтеза микрогелей составляет 2 % и это обусловлено лучшим сцеплением между молекулами эмульгатора и частицами микрогеля.

Согласно результатам эксперимента, размер частиц микрогеля зависит от дисперсионной среды и состава эмульгатора, что подтверждают результаты исследования [19]. Это указывает на необходимость оптимизации параметров синтеза для достижения наименьшего размера частиц микрогеля.

Следует отметить, что при использовании керосина в качестве дисперсионной среды и композиции эмульгаторов на основе глицерил стеарата с «Твин-80» при концентрации 2 % получены наилучшие результаты по сравнению с другими дисперсионными средами и составами эмульгаторов. Это подтверждается результатами исследования [20], которое также показало, что керосин представляет собой эффективную дисперсионную среду для получения микрогелей.

Заключение. Приведены результаты экспериментов, направленных на выявление особенностей синтеза микрогелей методом обратной эмульсии при различной концентрации эмульгатора, использовании разных поверхностно-активных веществ, входящих в состав эмульгатора, и разных дисперсионных сред. Результаты исследований показали, что на морфологические признаки (размер, форму) микрогелей влияет несколько факторов: природа дисперсионной среды, природа эмульгатора и его концентрация. Эти факторы могут быть рассмотрены как инструменты для получения микрогелей с необходимой формой и размером частиц. Согласно результатам проведенных исследований, концентрация эмульгирующей смеси 2 % позволяет получить при синтезе методом обратной эмульсии микрогели округлой формы. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение процесса набухания полученных образцов микрогелей в воде: эти испытания позволят оценить степень сшивки микрогелей при синтезе в процессе реакции имидизации, что косвенно позволит сравнить устойчивость мицелл при использовании в качестве соэмульгаторов «Твин-20», «Твин-60» и «Твин-80».

ЛИТЕРАТУРА

[1] Chu Y., Jo Y., Chen L. Size-controllable core/shell whey protein microgels with narrow particle size distribution fabricated by a facile method. *Food Hydrocoll.*, 2022, vol. 124, part B, art. 107316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107316>

- [2] Feng Q., Li D., Li Q., et al. Microgel assembly: fabrication, characteristics and application in tissue engineering and regenerative medicine. *Bioact. Mater.*, 2022, vol. 9, pp. 105–119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2021.07.020>
- [3] Xu M., Qin M., Cheng Y., et al. Alginate microgels as delivery vehicles for cell-based therapies in tissue engineering and regenerative medicine. *Carbohydr. Polym.*, 2021, vol. 266, art. 118128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118128>
- [4] Yang Y., Sha L., Zhao H., et al. Recent advances in cellulose microgels: preparations and functionalized applications. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 2023, vol. 311, art. 102815. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102815>
- [5] Raza A., Khan S.R., Ali S., et al. Silver/Titanium nanoparticles encapsulated microgel for catalytic reduction. *Inorg. Chem. Commun.*, 2023, vol. 153, art. 110851. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110851>
- [6] Zhang L., Zaky A.A., Zhou C., et al. High internal phase Pickering emulsion stabilized by sea bass protein microgel particles: food 3D printing application. *Food Hydrocoll.*, 2022, vol. 131, art. 107744. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107744>
- [7] Stubble S.J., Cayre O.J., Murray B.S., et al. Enzyme cross-linked pectin microgel particles for use in foods. *Food Hydrocoll.*, 2021, vol. 121, art. 107045. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107045>
- [8] Rozhkova Y.A., Gurbanov V.S., Efendiyev G.M., et al. Assessment of applicability of preformed particle gels for Perm region oil fields. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2022, vol. 1021, art. 012073. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1021/1/012073>
- [9] Манакова Ю.В., Рябов В.Г., Ибраева Е.В. и др. Подбор эффективных реагентов для транспорта и подготовки нефти Южно-Хыльчужского месторождения. *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*, 2017, т. 16, № 2, с. 164–173. DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2017.2.7>
- [10] Gao Y., Zhou H., Zheng B., et al. Microgel-enhanced thermal-sensitive hydrogel electrolyte enables active heat management, controllable energy storage and mechanical flexibility of supercapacitors. *Chem. Eng. J.*, 2023, vol. 465, art. 142923. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142923>
- [11] Koochakzadeh A., Teimouri A., Tohidi E., et al. Review on using pH-sensitive microgels as enhanced oil recovery and water shutoff agents: concepts, recent developments, and future challenges. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, vol. 223, art. 211477. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211477>
- [12] Xu J., Qiao H., Yu K., et al. Cu²⁺ tunable temperature-responsive Pickering foams stabilized by poly (N-isopropylacrylamide-co-vinyl imidazole) microgel: significance for Cu²⁺ recovery via flotation. *Chem. Eng. J.*, 2022, vol. 442, part 2, art. 136274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136274>
- [13] Anakhov M.V., Gumerov R.A., Potemkin I.I. Stimuli-responsive aqueous microgels: properties and applications. *Mendeleev Commun.*, 2020, vol. 30, iss. 5, pp. 555–562. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mencom.2020.09.002>
- [14] Ramli R.A., Hashim S., Laftah W.A. Synthesis, characterization, and morphology study of poly(acrylamide-co-acrylic acid)-grafted-poly(styrene-co-methyl methacrylate)

“raspberry”-shape like structure microgels by pre-emulsified semi-batch emulsion polymerization. *J. Colloid Interface Sci.*, 2013, vol. 391, pp. 86–94.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2012.09.047>

[15] Rozhkova Y.A., Burin D.A., Galkin S.V., et al. Review of microgels for enhanced oil recovery: properties and cases of application. *Gels*, 2022, vol. 8, iss. 2, art. 112.

DOI: <https://doi.org/10.3390/gels8020112>

[16] Бурин Д.А., Рожкова Ю.А., Казанцев А.Л. Основы метода синтеза микрогелей методом обратной эмульсии. *Известия высших учебных заведений. Сер. Химия и химическая технология*, 2023, т. 66, № 3, с. 6–17. EDN: JIXSOQ

[17] Шутьпин Г.Б. Эта увлекательная химия. Москва, УРСС, 2022.

[18] Yuan J., Zhang Y., Li Z., et al. A S-Sn Lewis pair-mediated ring-opening polymerization of α -amino acid *N*-carboxyanhydrides: fast kinetics, high molecular weight, and facile bioconjugation. *ACS Macro Lett.*, 2018, vol. 7, iss. 8, pp. 892–897.

DOI: <https://doi.org/10.1021/acsmacrolett.8b00465>

[19] Duan L., Chen M., Zhou S., et al. Synthesis and characterization of poly(*N*-isopropylacrylamide)/silica composite microspheres *via* inverse Pickering suspension polymerization. *Langmuir*, 2009, vol. 25, iss. 6, pp. 3467–3472.

DOI: <https://doi.org/10.1021/la8041617>

[20] Chen Q., Xu K., Zhang W., et al. Preparation and characterization of poly(*N*-isopropylacrylamide)/polyvinylamine core-shell microgels. *Colloid. Polym. Sci.*, 2009, vol. 287, pp. 1339–1346. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00396-009-2095-z>

Бурин Денис Андреевич — аспирант кафедры «Химические технологии» факультета химических технологий, промышленной экологии и биотехнологий ПНИПУ (Российская Федерация, 614990, Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29).

Рожкова Юлия Анатольевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Химические технологии» факультета химических технологий, промышленной экологии и биотехнологий ПНИПУ (Российская Федерация, 614990, Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29).

Виндокуров Илья Владимирович — младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Механика биосовместимых материалов и устройств» ПНИПУ (Российская Федерация, 614990, Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29).

Рябов Валерий Германович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Химические технологии» факультета химических технологий, промышленной экологии и биотехнологий ПНИПУ (Российская Федерация, 614990, Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Бурин Д.А., Рожкова Ю.А., Виндокуров И.В. и др. Факторы, влияющие на синтез микрогелей методом обратной эмульсии. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2024, № 3 (114), с. 149–162. EDN: VNPPJX

FACTORS AFFECTING THE MICROGELS SYNTHESIS BY THE INVERSE EMULSION METHOD

D.A. Burin

burinwork@gmail.com

Yu.A. Rozhkova

ketova.pstu@gmail.com

I.V. Vindokurov

ivv@pstu.ru

V.G. Ryabov

rvg@pstu.ru

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

Abstract

The paper presents results of studies aimed at synthesizing the acrylamide based microgels that were carried out using the inverse emulsion method. During the research, special attention was paid to studying the influence of emulsifier concentration, emulsifier composition and of the dispersion medium nature on the microgel morphology. The experiments carried out made it possible to establish that an increase in the emulsifier concentration significantly affected the microgel particles shape and size. The study resulted in finding the emulsifier composition optimal concentration ensuring production of the microgel particles in a round shape. Thus, introduction of kerosene as dispersion medium and emulsifier composition on glyceryl stearate and *Tween-80* at the concentration of 2 % proved effective. The study results established that the dispersion medium and emulsifier nature significantly influenced the microgel morphological characteristics. Study results are of great practical significance, since they could be used to optimize the microgel synthesis parameters and their use in such areas as medicine, cosmetology and food industry. This opens up new prospects in development of the innovative materials and technologies based on microgels, which in turn could lead to creation of more effective products and procedures

Keywords

Microgels, acrylamide, inverse emulsion method, dispersion medium, particle size

Received 03.07.2023

Accepted 18.10.2023

© Author(s), 2024

The work was carried out within the framework of a grant from the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists — candidates of sciences (certificate MK-1751.2022.1.3). The research was carried out using equipment purchased under the Federal Academic Leadership Program “Priority-2030”

REFERENCES

- [1] Chu Y., Jo Y., Chen L. Size-controllable core/shell whey protein microgels with narrow particle size distribution fabricated by a facile method. *Food Hydrocoll.*, 2022, vol. 124, part B, art. 107316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107316>
- [2] Feng Q., Li D., Li Q., et al. Microgel assembly: fabrication, characteristics and application in tissue engineering and regenerative medicine. *Bioact. Mater.*, 2022, vol. 9, pp. 105–119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2021.07.020>
- [3] Xu M., Qin M., Cheng Y., et al. Alginate microgels as delivery vehicles for cell-based therapies in tissue engineering and regenerative medicine. *Carbohydr. Polym.*, 2021, vol. 266, art. 118128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118128>
- [4] Yang Y., Sha L., Zhao H., et al. Recent advances in cellulose microgels: preparations and functionalized applications. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 2023, vol. 311, art. 102815. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102815>
- [5] Raza A., Khan S.R., Ali S., et al. Silver/Titanium nanoparticles encapsulated microgel for catalytic reduction. *Inorg. Chem. Commun.*, 2023, vol. 153, art. 110851. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110851>
- [6] Zhang L., Zaky A.A., Zhou C., et al. High internal phase Pickering emulsion stabilized by sea bass protein microgel particles: food 3D printing application. *Food Hydrocoll.*, 2022, vol. 131, art. 107744. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107744>
- [7] Stublely S.J., Cayre O.J., Murray B.S., et al. Enzyme cross-linked pectin microgel particles for use in foods. *Food Hydrocoll.*, 2021, vol. 121, art. 107045. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107045>
- [8] Rozhkova Y.A., Gurbanov V.S., Efendiyev G.M., et al. Assessment of applicability of preformed particle gels for Perm region oil fields. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2022, vol. 1021, art. 012073. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1021/1/012073>
- [9] Manakova Yu.V., Ryabov V.G., Ibraeva E.V., et al. Screening for efficient agents for transportation and treatment of oil of South-Khylchuiu field. *Vestnik PNIPU. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo* [Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering], 2017, vol. 16, no. 2, pp. 164–173 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2017.2.7>
- [10] Gao Y., Zhou H., Zheng B., et al. Microgel-enhanced thermal-sensitive hydrogel electrolyte enables active heat management, controllable energy storage and mechanical flexibility of supercapacitors. *Chem. Eng. J.*, 2023, vol. 465, art. 142923. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142923>
- [11] Koochakzadeh A., Teimouri A., Tohidi E., et al. Review on using pH-sensitive microgels as enhanced oil recovery and water shutoff agents: concepts, recent developments, and future challenges. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, vol. 223, art. 211477. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211477>
- [12] Xu J., Qiao H., Yu K., et al. Cu²⁺ tunable temperature-responsive Pickering foams stabilized by poly (N-isopropylacrylamide-co-vinyl imidazole) microgel: significance for Cu²⁺ recovery via flotation. *Chem. Eng. J.*, 2022, vol. 442, part 2, art. 136274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136274>

- [13] Anakhov M.V., Gumerov R.A., Potemkin I.I. Stimuli-responsive aqueous microgels: properties and applications. *Mendeleev Commun.*, 2020, vol. 30, iss. 5, pp. 555–562. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mencom.2020.09.002>
- [14] Ramli R.A., Hashim S., Laftah W.A. Synthesis, characterization, and morphology study of poly(acrylamide-*co*-acrylic acid)-*grafted*-poly(styrene-*co*-methyl methacrylate) “raspberry”-shape like structure microgels by pre-emulsified semi-batch emulsion polymerization. *J. Colloid Interface Sci.*, 2013, vol. 391, pp. 86–94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2012.09.047>
- [15] Rozhkova Y.A., Burin D.A., Galkin S.V., et al. Review of microgels for enhanced oil recovery: properties and cases of application. *Gels*, 2022, vol. 8, iss. 2, art. 112. DOI: <https://doi.org/10.3390/gels8020112>
- [16] Burin D.A., Rozhkova Yu.A., Kazantsev A.L. Fundamental principles of microgel synthesis by inverse emulsion method. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Ser. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [CHEMTECH], 2023, vol. 66, no. 3, pp. 6–17 (in Russ.). EDN: JIXSOQ
- [17] Shulpin G.B. *Eta uvlekatelnaya khimiya* [This fascinating chemistry]. Moscow, URSS Publ., 2022.
- [18] Yuan J., Zhang Y., Li Z., et al. A S-Sn Lewis pair-mediated ring-opening polymerization of α -amino acid *N*-carboxyanhydrides: fast kinetics, high molecular weight, and facile bioconjugation. *ACS Macro Lett.*, 2018, vol. 7, iss. 8, pp. 892–897. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsmacrolett.8b00465>
- [19] Duan L., Chen M., Zhou S., et al. Synthesis and characterization of poly(*N*-isopropylacrylamide)/silica composite microspheres *via* inverse Pickering suspension polymerization. *Langmuir*, 2009, vol. 25, iss. 6, pp. 3467–3472. DOI: <https://doi.org/10.1021/la8041617>
- [20] Chen Q., Xu K., Zhang W., et al. Preparation and characterization of poly(*N*-isopropylacrylamide)/polyvinylamine core-shell microgels. *Colloid. Polym. Sci.*, 2009, vol. 287, pp. 1339–1346. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00396-009-2095-z>

Burin D.A. — Post-Graduate Student, Department of Chemical Technology, Faculty of Chemical Technology, Industrial Ecology and Biotechnology, Perm National Research Polytechnic University (Komsomolskiy prospekt 29, Perm, 614990 Russian Federation).

Rozhkova Yu.A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Chemical Technology, Faculty of Chemical Technology, Industrial Ecology and Biotechnology, Perm National Research Polytechnic University (Komsomolskiy prospekt 29, Perm, 614990 Russian Federation).

Vindokurov I.V. — Junior Researcher, Research Laboratory of Mechanics of Biocompatible Materials and Devices, Perm National Research Polytechnic University (Komsomolskiy prospekt 29, Perm, 614990 Russian Federation).

Ryabov V.G. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Chemical Technologies, Faculty of Chemical Technologies, Industrial Ecology and Biotechnology, Perm National Research Polytechnic University (Komsomolskiy prospekt 29, Perm, 614990 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Burin D.A., Rozhkova Yu.A., Vindokurov I.V., et al. Factors affecting the microgels synthesis by the inverse emulsion method. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2024, no. 3 (114), pp. 149–162 (in Russ.).

EDN: VNPPJX