



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 544.777

doi: 10.17308/sorpchrom.2025.25/12798

Особенности синтеза полиакрилатных наносфер «ядро-оболочка» в присутствии полимерного ПАВ Pluronic P123

Дмитрий Михайлович Точиллов¹, Ольга Валентиновна Слепцова¹✉,
Людмила Андреевна Корыстина²

¹Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, slepts@gmail.com✉

²ПолиЛаб Воронеж, АО «Воронежсинтезкаучук», Воронеж, Россия

Аннотация. Эмульсионной полимеризацией в присутствии полимерного ПАВ Pluronic P123 в качестве эмульгатора осуществлен синтез полиакрилатных наносфер «ядро-оболочка» в виде водной дисперсии. Полимером ядра является полибутилметакрилат или полибутилакрилат, полимером оболочки – сетчатый поли-N,N-диметиламиноэтилметакрилат. Наноразмер, сферическая форма и структура полимерных частиц подтверждены методами динамического рассеяния света и просвечивающей электронной микроскопии.

Полиакрилатные наносферы «ядро-оболочка» являются агрегативно устойчивыми благодаря незлектростатическому структурно-механическому фактору, обеспечиваемому неионогенным полимерным ПАВ Pluronic P123, адсорбированным на поверхности частиц. Небольшое значение электрокинетического потенциала частиц определяется полярностью мономера ядра.

Доказанное методом динамического рассеяния света монодисперсное состояние частиц «ядро-оболочка» в синтезированных дисперсиях предполагает протекание процесса полимеризации в мицеллах Pluronic P123. Установленная адсорбционная способность мономера оболочки N,N-диметиламиноэтилметакрилата при отсутствии у него мицеллообразующей способности подтверждает формирование в процессе полимеризации частиц типа «ядро-оболочка».

Ключевые слова: «ядро-оболочка», наносферы, Pluronic P123, бутилакрилат, бутилметакрилат, N,N-диметиламиноэтилметакрилат, эмульсионная полимеризация.

Для цитирования: Точиллов Д.М., Слепцова О.В., Корыстина Л.А. Особенности синтеза полиакрилатных наносфер «ядро-оболочка» в присутствии полимерного ПАВ Pluronic P123 // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2025. Т. 25, № 1. С. 101-110. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/12798>

Original article

Features of synthesis of polyacrylate nanospheres "core-shell" in the presence of polymer surfactant Pluronic P123

Dmitry M. Tochilov¹, Olga V. Sleptsova¹✉, Lyudmila A. Korystina²

¹Voronezh state University, Voronezh, Russian Federation, slepts@gmail.com✉

²PoliLab Voronezh, JSC Voronezhskintezkauchuk, Voronezh, Russian Federation

Annotation. Emulsion polymerization in the presence of the polymer surfactant Pluronic P123 as an emulsifier synthesized polyacrylate nanospheres "core-shell" in the form of an aqueous dispersion. The polymer of the core is polybutylmethacrylate or polybutylacrylate, the polymer of the shell is a mesh poly-N,N-dimethylaminoethylmethacrylate. The nanoscale, spherical shape, and structure of polymer particles are confirmed by dynamic light scattering and transmission electron microscopy.

Core-shell polyacrylate nanospheres are aggregatively stable due to the non-electrostatic structural and mechanical factor provided by the nonionic polymer surfactant Pluronic P123 adsorbed on the particle surface. A small value of the electrokinetic potential of the particles is caused by the polarity of the core monomer.

The monodisperse state of the "core-shell" particles in the synthesized dispersions, proved by dynamic light scattering, suggests that the polymerization process occurs in Pluronic P123 micelles. The established adsorption capacity of the shell monomer N,N-dimethylaminoethylmethacrylate, in the absence of its micelle-forming ability, confirms the formation of core-shell particles during polymerization.

Keywords: "core-shell", nanospheres, Pluronic P123, butylacrylate, butylmethacrylate, N,N-dimethylaminoethylmethacrylate, emulsion polymerization.

For citation: Kargov S.I., Ivanov V.A., Karpyuk E.A., Gavlina O.T. Features of synthesis of polyacrylate nanospheres "core-shell" in the presence of polymer surfactant Pluronic P123. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2025. 25(1): 101-110. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/12798>

Введение

В последнее время все больше внимания уделяется материалам на основе полимерных наночастиц различной архитектуры. Физико-химические свойства данных систем во многом обязаны образованию межфазных слоев со свойствами, зависящими как от их морфологии, так и от фазового состава [1-3]. Особое место среди полимерных материалов занимают сферические наночастицы с разнообразной морфологией не только поверхности, но и внутреннего пространства [4-9]. Синтезируя частицы полимера со структурой «ядро-оболочка», можно получать материалы с превосходными пленкообразующими, механическими, защитными, оптическими, медико-биологическими и другими свойствами, что объясняет их широкое применение во многих областях науки и промышленности [10-19]. Для стабилизации подобных коллоидных систем обычно используются различные ПАВ, зачастую биологически «жесткие». Разработка и оптимизация методик синтеза полимерных сфер с использованием биологически «мягких» ПАВ является актуальной задачей. Отдельный интерес представляет использование при синтезе в качестве стабилизатора коллоидной системы полимерных ПАВ [20]. Среди множества синтетических блок-сополимеров, обладающих поверхностной активностью, наиболее распространены сополимеры полиалкиленгликолей [20-23]. Например, ПЭГ-ППГ-ПЭГ блок-сополимеры (ПЭГ –

полиэтиленгликолевые, ППГ – полипропиленгликолевые блоки) – широко представленные и изученные, коммерчески доступные неионогенные ПАВ, известные под названиями плюроники (Pluronic) или поллоксамеры (Poloxamers) [21-27]. Крупные амфифильные молекулы блок-сополимеров – таких, как плюроники, – формируют большое разнообразие микро- и наноструктур как в отсутствие, так и в присутствии растворителей и/или других добавок [20, 21, 23-27]. Более того, их макромолекулярная природа обеспечивает широкие рамки размерных и временных масштабов при формировании структур или переходах между ними. Поэтому триблок-сополимеры – очень перспективный материал для различных областей применения [20-23].

Цель настоящей работы – синтез полиакрилатных наносфер «ядро-оболочка» с участием полимерного ПАВ Pluronic P123.

Экспериментальная часть

Полимерные наносферы с морфологией типа «ядро-оболочка» получают последовательным синтезом сферических частиц (ядер) из полимера или сополимера одного состава и последующим формированием полимерной оболочки иного, чем ядро, химического состава. Синтез сферических полимерных частиц типа «ядро-оболочка» проводили методом эмульсионной полимеризации в водной среде в присутствии ПАВ, мицеллы которого играют роль нанореакторов

[28]. В качестве мономера ядра были выбраны бутилметакрилат (БМА, АО «Вектон», Россия) или более полярный бутилакрилат (БА, АО «Вектон», Россия), в качестве сомономеров оболочки N,N-диметиламиноэтилметакрилат (ДМАЭМА, Sigma-Aldrich Inc., USA) и дивинилбензол (ДВБ, АО «Вектон», Россия), как сшивающий агент, инициатор персульфат калия $K_2S_2O_8$ (ПСК, АО «Вектон», Россия). Предполагалось, что оболочка ядра будет сетчатой.

БМА и БА, мономеры ядра, являются полярными мономерами. Известна низкая агрегативная устойчивость водных полимерных дисперсий, синтезированных на основе полярных мономеров. В таких системах разность полярностей контактирующих фаз не является столь высокой, поэтому снижена способность ПАВ-эмульгатора к ориентированной адсорбции на межфазной поверхности и, соответственно, снижены защитные функции адсорбционного слоя. В настоящей работе в роли эмульгатора было применено неионогенное полимерное ПАВ Pluronic P123. Использование полимерного неионогенного поверхностно-активного вещества является особенностью синтезированной дисперсии.

Полимерное ПАВ Pluronic P123 ($M_r = 5750$, Sigma-Aldrich Inc., USA) представляет собой амфифильный триблоксополимер этиленоксида и пропиленоксида ПЭГ₂₀-ППГ₇₀-ПЭГ₂₀ и является водорастворимым мицеллообразующим ПАВ [21-23]. Наличие в полимере гидрофильных и гидрофобных блоков и их взаимная ориентация определяют поверхностно-активные свойства Pluronic P123 и его способность участвовать в мицеллообразовании. Поэтому перед осуществлением синтеза было проведено исследование поверхностной активности плуроника и его мицеллообразующей способности. Исследование мицеллообразующей способности являлось особенно важным в свете представлений о мицеллярном ме-

ханизме протекания процесса эмульсионной полимеризации [17] и влиянии на скорость этого процесса концентрации эмульгатора. Согласно мицеллярному механизму эмульсионной полимеризации процесс протекает не в каплях нерастворимого в воде мономера, а в мицеллах, содержащих в своем гидрофобном ядре солюбилизированный мономер.

Обсуждение результатов

Поверхностная активность и мицеллообразующая способность ПАВ-эмульгатора Pluronic P123. Сталагмометрическим методом была получена изотерма поверхностного натяжения растворов Pluronic P123 (рис. 1). Значение критической концентрации мицеллообразования (ККМ) было определено по изотерме поверхностного натяжения в полулогарифмических координатах при 20°C и составляет 6.7 ммоль/дм³ или 0.04% (масс.) (рис. 2). Для расчета молярной концентрации использовали среднюю массу 1 моль мономерных звеньев. Поверхностная активность Pluronic P123 согласно сталагмометрическим исследованиям составляет $19 \cdot 10^{-3}$ Дж·м/моль.

Учитывая способность макромолекул Pluronic P123 образовывать, переплетаясь друг с другом, ассоциаты различной формы и размера, необходим был метод, способный зафиксировать в том числе и распределение по размерам ассоциатов полимерного ПАВ. Поэтому был привлечен метод динамического рассеяния света (ДРС, *Photocor-Complex*), позволяющий определить гидродинамический радиус R_h частиц.

Видно (рис. 3), что при увеличении концентрации Pluronic P123 гидродинамический радиус ассоциатов ПАВ уменьшается до постоянного значения $R_h \approx 9$ нм. При концентрациях Pluronic P123 $\geq 1.5\%$ (масс.) система становится практически монодисперсной (рис. 4). Формирование монодисперсной системы и отвечает, вероятнее всего, образованию мицеллярного раствора полимерного

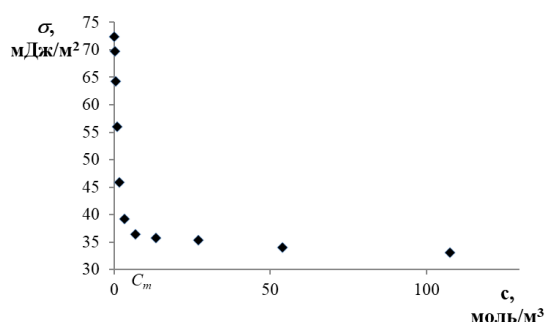


Рис. 1. Изотерма поверхностного натяжения водного раствора Pluronic P123

Fig. 1. Isotherm of surface tension of Pluronic P123 aqueous solution

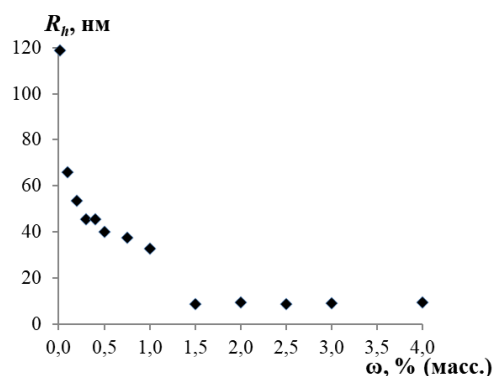


Рис. 3. Изменение гидродинамического радиуса ассоциатов R_h Pluronic P123 в водном растворе в зависимости от его концентрации

Fig. 3. Change in the hydrodynamic radius of R_h Pluronic P123 associates in an aqueous solution depending on its concentration

ПАВ. При более низких концентрациях формируются более «рыхлые» ассоциаты макромолекул, соответственно с большим гидродинамическим радиусом, не способные сольбилизовать мономер и участвовать в эмульсионной полимеризации. Концентрация Pluronic P123=1.5% (масс.) была принята за ККМ.

Таким образом, осложненность мицеллообразования Pluronic P123 в водных растворах, связанная с полимерной природой его макромолекул, приводит к существенным различиям в значениях ККМ для представленных методов (табл. 1). ККМ, определенная методом динамического рассеяния света, оказывается при-

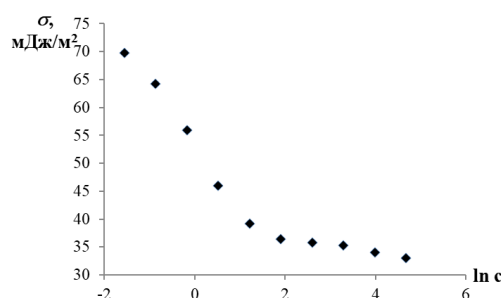


Рис. 2. Изотерма поверхностного натяжения водного раствора Pluronic P123 в полулогарифмических координатах

Fig. 2. Isotherm of surface tension of Pluronic P123 aqueous solution in semi-logarithmic coordinates

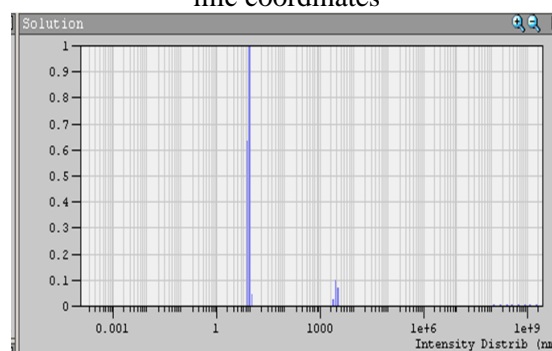


Рис. 4. Гистограмма распределения ассоциатов Pluronic P123 в водном растворе при концентрации ККМ = 1.5% (масс.)

Fig. 4. Histogram of the distribution of Pluronic P123 associates in an aqueous solution at a concentration of CCM = 1.5% (wt.)

мерно на 2 порядка больше ККМ, определенной сталагмометрическим методом. Причина заниженных значений, полученных сталагмометрическим методом – замедленность адсорбции полимерного ПАВ на границе раствор – воздух в процессе измерения поверхностного натяжения.

Так как синтез полимерных наносфер проводится при температуре порядка 70°C, необходимой для распада инициатора на радикалы и инициирования процесса полимеризации, было изучено влияние температуры на мицеллярное поведение полимерного ПАВ (рис. 5). Резкое снижение ККМ отвечает температуре помутнения полимерного ПАВ. Обычно

Таблица 1. Критические концентрации мицеллообразования Pluronic P123 в водном растворе, определенные различными методами

Table 1. Critical concentrations of Pluronic P123 micelle formation in an aqueous solution, determined by various methods

Метод	Измеряемая величина	Температура T , °C	ККМ, моль/дм ³	ККМ, % (масс.)
Сталагмометрический	σ , мДж/м ²	22	0.007	0.04
ДРС	R_h , нм	20	0.3	1.5

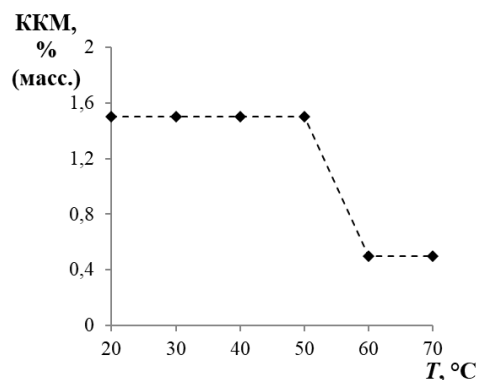


Рис. 5. Изменение ККМ Pluronic P123 в водном растворе в зависимости от температуры T , определенное методом ДРС

Fig. 5. The change in the CCM of Pluronic P123 in an aqueous solution as a function of temperature T , determined by the DRS method

уменьшение ККМ поверхностно-активного вещества при нагревании связывают с уменьшением его растворимости. В данном случае уменьшение ККМ полимерного ПАВ при увеличении температуры является необратимым. После охлаждения системы ККМ остается примерно в два раза ниже, чем до нагревания (табл. 2).

Очевидно, что повышение температуры влияет на конформационное состояние макромолекул полимерного ПАВ и, соответственно, на мицеллярную структуру его раствора.

Таким образом, на мицеллообразование поверхностно-активного полимерного Pluronic P123 оказывают влияние условия проведения синтеза – его концентрация, температура. Влияние этих факторов достаточно корректно может быть охарактеризовано методом ДРС. Согласно данным, полученным этим методом, процесс мицеллообразования Pluronic P123 облегчается при повышении температуры.

Поверхностная активность мономера оболочки N,N-диметиламиноэтилметакрилата. Поверхностную активность, то есть способность снижать поверхностное натяжение раствора, проявляет также сомономер оболочки ДМАЭМА (рис. 6). Поверхностная активность ДМАЭМА составляет $5.14 \cdot 10^{-3}$ Дж·м/моль.

Однако на изотерме поверхностного натяжения в полулогарифмических координатах не проявляется излом, отвечающий критической концентрации мицеллообразования. Следовательно, ДМАЭМА не является мицеллообразующим (рис. 7). Тем не менее, благодаря своей поверхностной активности этот мономер может адсорбироваться на поверхности ядер и там же полимеризоваться.

Таким образом, принимая во внимание мицеллярный механизм эмульсионной полимеризации, согласно которому зарождение и рост полимерно-мономерных частиц происходит в мицеллах ПАВ [17], можно предположить, что полимериза

Таблица 2. Характеристики мицеллярного раствора Pluronic P123 при его нагревании, определенные методом ДРС

Table 2. Characteristics of Pluronic P123 micellar solution when heated, determined by the DRS method

Температура T , °C	Гидродинамический радиус R_h , нм	ККМ, моль/дм ³	ККМ, % (масс.)
20	9	0.3	1.5
30	7-8	0.3	1.5
40	6-7	0.3	1.5
50	6	0.3	1.5
60	6-7	0.09	0.5
70	6-7	0.09	0.5
20 (после нагревания)	9-15	0.14	0.7

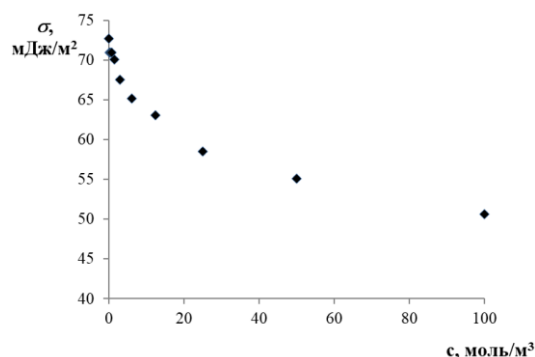


Рис. 6. Изотерма поверхностного натяжения водного раствора ДМАЭМА

Fig. 6. Isotherm of surface tension of an aqueous solution of DMAEM

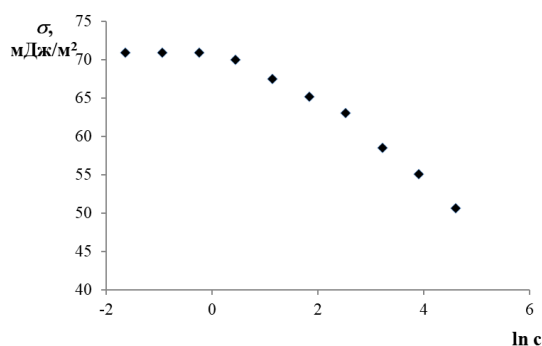


Рис. 7. Изотерма поверхностного натяжения водного раствора ДМАЭМА в полулогарифмических координатах

Fig. 7. Isotherm of surface tension of an aqueous solution of DMAEM in semi-logarithmic coordinates

ция мономера ядра будет протекать в мицеллах полимерного ПАВ Pluronic P123. Введение поверхностно-активного мономера оболочки ДМАЭМА после образования ядер ПБМА или ПБА не приведет к образованию новой мицеллярной псевдофазы, так как этот мономер не обладает мицеллообразующей способностью. Но благодаря своей поверхностной активности, ДМАЭМА будет адсорбироваться на затравочных частицах ПБМА и полимеризоваться там, образуя оболочку ядер.

Синтез акрилатных наносфер «ядро-оболочка» в присутствии полимерного ПАВ Pluronic P123. Процесс синтеза проводили в два этапа методом эмульсионной полимеризации в водной среде. Сначала синтезировали частицы из БМА или

БА (ядра), а затем на их поверхности осуществляли затравочную полимеризацию ДМАЭМА в присутствии сшивающего агента ДВБ (оболочка). Концентрация Pluronic P123 была выбрана равной и выше ККМ, определенной методом динамического рассеяния света, то есть 1.5% (масс). При более низких концентрациях ПАВ процесс полимеризации акрилатных мономеров не протекал. Для осуществления процесса полимеризации акрилатных мономеров необходимо также было введение активатора метабисульфита натрия, снижающего энергию активации процесса. Полученную дисперсию частиц подвергали диализу в дистиллированной воде в статическом режиме.

На гистограмме распределения полимерных частиц с морфологией «ядро-

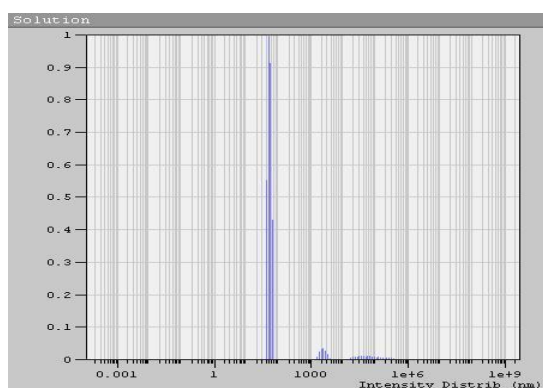


Рис. 8. Гистограмма распределения полимерных частиц «ядро-оболочка» на основе ПБМА в водном растворе по размерам

Fig. 8. Histogram of the size distribution of polymer particles "core-shell" based on PBMA in an aqueous solution.

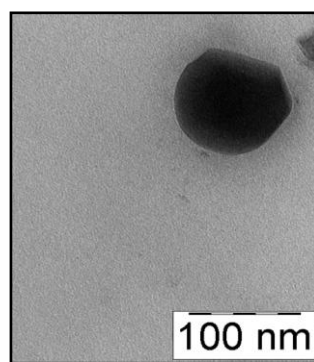


Рис. 9. ПЭМ-изображение синтезированных частиц «ядро-оболочка» на основе ПБМА

Fig. 9. TEM image of synthesized core-shell particles based on PBMA

Таблица 3. Характеристики дисперсий с частицами типа «ядро-оболочка»

Table 3. Characteristics of core-shell particle dispersions

Мономер ядра	ПАВ	Гидродинамический радиус R_h , нм		Дзета-потенциал ζ , мВ
		ядро	ядро-оболочка	
БА	1.5% P123	57	66	- 9.27
БМА	1.5% P123	40	50	+ 3.80

оболочка» по размерам (рис. 8) видно, что синтезированная диализованная система является монодисперсной, что косвенно свидетельствует о получении в процессе синтеза частиц одного типа, а именно «ядро-оболочка». При синтезе отдельно ядра и оболочки, частицы должны получиться разных размеров, то есть должно наблюдаться полимодальное распределение частиц по размерам.

Гидродинамический радиус частиц R_h , определенный методом ДРС, составляет порядка 50 нм. Это значение коррелирует с размером частиц, полученным методом просвечивающей электронной микроскопии (рис. 9). На ПЭМ-снимке (*LIBRA 120 PLUS*) видно, что синтезированные частицы имеют сферическую форму и наноразмер, то есть синтезированы наносферы.

Физико-химические характеристики синтезированной дисперсии представлены в табл. 3.

Небольшое значение величины электрокинетического потенциала (*Zetasizer Nano ZSP*) свидетельствует об отсутствии электростатического фактора устойчивости. Основным фактором, определяющим знак ζ -потенциала частиц «ядро-оболочка», является природа мономера ядра. Более полярный мономер БА дает отрицательное значение ζ -потенциала, менее полярный БМА – положительное значение. Отрицательный ζ -потенциал возникает в результате адсорбции анионов, образовавшихся при распаде инициатора и активатора полимеризационного процесса.

Также природа полимерного ядра влияет на размер частиц. Частицы «ядро-оболочка», синтезированные на основе полибутилакрилатных ядер имеют больший гидродинамический радиус.

Введение в водную полимерную дисперсию электролита NaCl в концентрациях до 3 моль/дм³ не приводит к явной

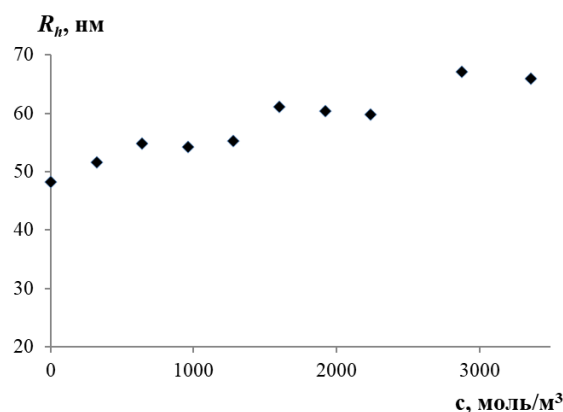


Рис. 10. Зависимость гидродинамического радиуса полимерных частиц «ядро-оболочка» на основе ПБМА от концентрации NaCl

Fig. 10. Dependence of the hydrodynamic radius of polymer core-shell particles based on PBMA on the concentration of NaCl

коагуляции системы (рис. 10). В водно-солевой среде происходит незначительное увеличение гидродинамического радиуса полимерных наносфер, но полимерная дисперсия остается агрегативно устойчивой благодаря неэлектростатическому (структурно-механическому) фактору, который обеспечивается полимерным ПАВ.

Таким образом, синтезированные методом эмульсионной полимеризации с участием полимерного ПАВ Pluronic P123 частицы имеют наноразмер, сферическую форму, структуру «ядро-оболочка» и агрегативно устойчивы по отношению к электролитам.

Заключение

Эмульсионной полимеризацией в присутствии полимерного ПАВ Pluronic P123 в качестве эмульгатора осуществлен синтез полиакрилатных наносфер «ядро-оболочка» в виде водной дисперсии. Полимером ядра является полибутилметакрилат или полибутилакрилат, полимером оболочки – сетчатый полидиметиламиноэтилметакрилат. Наноразмер, сферическая форма и структура полимерных ча-

стиц подтверждены методами динамического рассеяния света и просвечивающей электронной микроскопии.

Полиакрилатные наносферы «ядро-оболочка» являются агрегативно устойчивыми благодаря неэлектростатическому структурно-механическому фактору, обеспечиваемому неионогенным полимерным ПАВ Pluronic P123, адсорбированным на поверхности частиц.

Доказанное методом динамического рассеяния света монодисперсное состояние частиц «ядро-оболочка» в синтезированных дисперсиях предполагает протекание процесса затравочной полимеризации в мицеллах Pluronic P123. Установленная адсорбционная способность мономера оболочки N,N-диметиламинэтилметакрилата при отсутствии у него мицеллообразующей способности подтверждает формирование в процессе полимеризации частиц типа «ядро-оболочка».

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.

view on Preparation, Properties and Applications of Polymeric Nanoparticle-Based Materials, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2015; 54(4): 325-341. <https://>

Список литературы/References

1. Nasir A., Kausar A., Younus A. A Re-



doi.org/10.1080/03602559.2014.958780

2. Kocak G., Tuncer C., Butun V. pH-Responsive polymers, *The Royal Society of Chemistry: Polymer Chemistry*. 2017; 8: 144-176. <https://doi.org/10.1039/C6PY01872F>

3. Crucho C.I.C., Barros M.T. Polymeric nanoparticles: A study on the preparation variables and characterization methods, *Materials Science and Engineering C*. 2017; 80: 771-784. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.06.004>

4. Wei B., Wang S., Song H., Liu H., Li J., Liu N. A review of recent progress in preparation of hollow polymer microspheres, *Petroleum Science*. 2009; 6: 306-312. <https://doi.org/10.1007/s12182-009-0049-1>

5. Forster N., Schmidt S., Vana P. Tailoring Confinement: Nano-Carrier Synthesis via Z-RAFT Star Polymerization, *Polymers*. 2015; 7: 695-716. <https://doi.org/10.3390/polym7040695>

6. Okubo M., Konishi Y., Inohara T., Minami H. Size effect of monomer droplets on the production of hollow polymer particles by suspension polymerization, *Colloid Polymer Science*. 2003; 281: 302-307. <https://doi.org/10.1007/s00396-002-0774-0>

7. Chang M.-W., Stride E., Edirisinghe M. A New Method for the Preparation of Monoporous Hollow Microspheres, *American Chemical Society*. 2010; 26(7): 5115-5121. <https://doi.org/10.1021/la903592s>

8. McKenzie B.E., Friedrich H., Wirix M.J.M., Visser J.F., Monaghan O.R., Bomans P.H.H., Nudelman F., Holder S.J., Sommerdijk N.A.J. Controlling Internal Pore Sizes in Bicontinuous Polymeric Nanospheres, *Angewandte Chemie (International Edition in English)*. 2015; 127(8): 2457-2461. <https://doi.org/10.1002/ange.201408811>

9. Shen J., Xu J., Hu Y., Li J., Kan C. Fabrication of amino-containing hollow polymer latex and its compositewith inorganic nanoparticles, *Colloid and Polymer Science*. 2017; 295(4): 679-688. <https://doi.org/10.1007/s00396-017-4059-z>

10. Crucho C.I.C. Stimuli-Responsive Polymeric Nanoparticles for Nanomedicine, *ChemMedChem*. 2014; 10(1): 24-38. <https://doi.org/10.1002/cmdc.201402290>

11. Zhu Y., Liao L. Applications of Nanoparticles for Anticancer Drug delivery: A

Review, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2015; 14(7): 4753-4773. <https://doi.org/10.1166/jnn.2015.10298>

12. Moneris M.J., Broglia M.F., Yslas E.I., Barbero C.A., Rivarola C.R. Antibacterial polymeric nanocomposites synthesized by in-situ photoreduction of silver ions without additives inside biocompatible hydrogel matrices based on N-isopropylacrylamide and derivatives, *eXPRESS Polymer Letters*. 2017; 11(12): 946-962. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2017.91>

13. Pagels R.F., Prud'homme R.K. Polymeric nanoparticles and microparticles for the delivery of peptides, biologics, and soluble therapeutics, *Journal Of Controlled Release*. 2015; 219: 519-535. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2015.09.001>

14. Chen G., Wang Y., Xie R., Gong S. A review on core-shell structured unimolecular nanoparticles for biomedical applications, *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2018; 130: 58-72. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2018.07.008>

15. Colson Y.L., Grinstaff M.W. Biologically Responsive Polymeric Nanoparticles for Drug Delivery, *Advanced Materials*. 2012; 24(28): 3878-3886. <https://doi.org/10.1002/adma.201200420>

16. Lam S.J., Wang E.H.H., Boyer C., Qiao G.G. Antimicrobial polymeric nanoparticles, *Progress in Polymer Science*. 2017; 76: 40-64. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2017.07.007>

17. Guterres S.S., Alves M.P., Pohlmann A.R. Polymeric Nanoparticles, Nanospheres and Nanocapsules, for Cutaneous Applications, *SAGE Journals: Drug Target Insights*. 2007; 2: 147-157. <https://doi.org/10.1177/1177392807002000002>

18. Zhan C., Yu G., Lu Y., Wang L., Wujcik E., Wei S. Conductive polymer nanocomposites: a critical review of modern advanced devices, *Journal of Materials Chemistry*. 2017; 5(7): 1569-1585. <https://doi.org/10.1039/C6TC04269D>

19. Lia H., Xu F., Wang L. A review of the preparation and application of magnetic nanoparticles for surface-enhanced Raman scattering, *Journal of Materials Science*. 2018; 53(2): 8677-8698. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2095-9>

20. Riess G. Micellization of block copolymers, *Progress in Polymer Science*. 2003; 28(7): 1107-1170. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(03\)00015-7](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(03)00015-7)
21. Singh V., Khullar P., Dave P.N., Kaur N. Micelles, mixed micelles, and applications of polyoxypropylene (PPO)- polyoxyethylene (PEO)-polyoxypropylene (PPO) triblock polymers, *International Journal of Industrial Chemistry*. 2013; 4(12): 1-18. <https://doi.org/10.1186/2228-5547-4-12>
22. Alexandridis P. Poly(ethylene oxide)/poly(propylene oxide) block copolymer surfactants, *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 1997; 2: 478-489. [https://doi.org/10.1016/S1359-0294\(97\)80095-7](https://doi.org/10.1016/S1359-0294(97)80095-7)
23. Alexandridis P., Holzwarth J.F., Hatton T.A. Micellization of Poly(ethylene oxide)-Poly(propylene oxide)-Poly(ethylene oxide) Triblock Copolymers in Aqueous Solutions: Thermodynamics of Copolymer Association, *Macromolecules*. 1994; 27: 2414-2425. <https://doi.org/10.1021/ma00087a009>
24. Lau B.K., Wang Q., Sun W., Li L. Micellization to gelation of a triblock copolymer in water: Thermoreversibility and scaling, *Polymer Science Part B: Polymer Physics*. 2004; 42(10): 2014-2025. <https://doi.org/10.1002/polb.20105>
25. Chaibundit C., Ricardo N.M.P.C., Costa F.M.L.L., Yeates S.G., Booth C. Micellization and Gelation of Mixed Copolymers P123 and F127 in Aqueous Solution, *Langmuir*. 2007; 23(18): 9229-9236. <https://doi.org/10.1021/la701157j>
26. Sakai T., Kurosawa H., Okada T., Mishima S. Vesicle formation in mixture of a PEO-PPO-PEO block copolymer (Pluronic P123) and a nonionic surfactant (Span 65) in water, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2011; 389(1-3): 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.08.046>
27. He Z., Alexandridis P. Micellization Thermodynamics of Pluronic P123 (EO20PO70EO20) Amphiphilic Block Copolymer in Aqueous Ethylammonium Nitrate (EAN) Solution, *Polymers*. 2017; 10(1): 1-18. <https://doi.org/10.3390/polym10010032>
28. Shtykov S.N. Chemical analysis in nanoreactors: main concepts and applications, *Journal of Analytical Chemistry*. 2002; 57(10): 859-868.

Информация об авторах / Information about the authors

Д.М. Точиллов – аспирант кафедры высокомолекулярных соединений и коллоидной химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

О.В. Слепцова – к.х.н., доцент кафедры высокомолекулярных соединений и коллоидной химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

Л.А. Корыстина – к.т.н., главный эксперт, Прикладные разработки эластомеров, ПолиЛаб Воронеж, АО «Воронежсинтезкаучук», Воронеж, Россия

D.M. Tochilov – postgraduate student, department of polymer science and colloid chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russia, e-mail: jef-fray@mail.ru

O.V. Sleptsova – Ph.D. (chemistry), associate prof., department of polymer science and colloid chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russia, <https://orcid.org/0009-0006-7467-275X>, e-mail: slepts@gmail.com

L.A. Korystina – Ph.D., Chief Expert, Applied Elastomer Development, PolyLab Voronezh, JSC Voronezhskhsintezkauchuk, Voronezh, Russia, e-mail: KorystinaLA@vsk.sibur.ru

Статья поступила в редакцию 05.03.2025; одобрена после рецензирования 18.03.2025; принята к публикации 19.03.2025.

The article was submitted 05.03.2025; approved after reviewing 18.03.2025; accepted for publication 19.03.2025.