УДК 541.64:544(72+77):547.1'128

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИОРАЗЛАГАЕМОГО СВЕРХРАЗВЕТВЛЕННОГО ПОЛИЭФИРПОЛИОЛА НА ОСНОВЕ 2,2-БИС(МЕТИЛОЛ)ПРОПИОНОВОЙ КИСЛОТЫ

В.И. Гомзяк[1,2,@], А.А. Пучков[1,2], Н.Е. Артамонова[1], Д.К. Поляков[2], Г.А. Симакова[1], И.А. Грицкова[1], С.Н. Чвалун[1,2]

[1]МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова), Москва 119571, Россия
[2]Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва 123182, Россия
[@]Автор для переписки, e-mail: vgomzyak@gmail.com

Синтетические поверхностно-активные вещества широко используются в самых различных отраслях – от медицины до сельского хозяйства, причем повышенный интерес представляют биодеструктируемые ПАВ. Перспективными соединениями для синтеза таких ПАВ являются полиэтиленоксид и сложные полиэфиры α-гидроксикислот: полилактид, полигликолид, поли(ε-капролактон), полигидроксибутират, а также их сополимеры. Поскольку продуктами деструкции таких полимерных ПАВ являются естественные метаболиты, их применение в медицине и биотехнологии довольно перспективно. В ряде работ показаны преимущества полимерных сверхразветвленных ПАВ по сравнению с линейными ПАВ, однако систематические исследования взаимосвязи структуры амфифильных сверхразветвленных ПАВ с их поверхностной активностью отсутствуют.
Сверхразветвленные биоразлагаемые полиэфирполиолы на основе 2,2-бис(метилол)пропионовой кислоты широко используются в качестве модификаторов полимерных материалов (например, при производстве лакокрасочных материалов), добавок к полимерам для улучшения экструзии, а также в качестве наноконтейнеров для адресной доставки лекарственных соединений. В настоящей работе изучены коллоидно-химические свойства полиэфирполиола 2,2-бис(метилол)пропионовой кислоты четвертой псевдогенерации (торговое имя Boltorn H40) и показано, что данное соединение обладает поверхностно-активными свойствами и снижает межфазное натяжение на границе углеводородный раствор ПАВ/вода до низких значений.

Ключевые слова: *биоразлагаемые полимеры, сверхразветвленные полимеры, поверхностно-активные вещества, наночастицы.*

DOI: 10.32362/2410-6593-2018-13-4-67-73

PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF BIODEGRADABLE HYPERBRANCHED POLYESTER POLYOL BASED ON 2,2-BIS(METHYLOL)PROPIONIC ACID

V.I. Gomzyak[1,2,@], A.A. Puchkov[1,2], N.E. Artamonova[1], D.K. Polyakov[2], G.A. Simakova[1], I.A. Gritskova[1], S.N. Chvalun[1,2]

[1]MIREA – Russian Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow 119571, Russia
[2]National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow 123182, Russia
[@]Corresponding author e-mail: vgomzyak@gmail.com

Synthetic surfactants have a wide application in various areas from medicine to agriculture, with biodegradable surfactants holding the greatest promise. Promising compounds for the synthesis of such surfactants are polyethylene oxide and polymers are the poly(a-hydroxyacid)s: polylactide (i.e. PLA), polyglycolide (i.e. PGA), poly-ε-caprolactone (PCL), polyhydroxybutyrate (PHB) and their copolymers. Because the biodegradation of polymeric surfactants yields natural metabolites, their medical and biotechnological applications are most attractive. A number of studies shows advantages of branched polymer surfactants compared linear surfactants, however, systematic studies of the correlation between the branched structures of amphiphilic copolymers and their surface activities are absent.

Hyperbranched polyester polyol based on 2,2-bis(methylol)propionic acid are widely used as modifiers of polymeric materials (for example, in the manufacture of paintwork materials), additives for polymers to improve extrusion and also as nanocontainers for targeted drug delivery. In the present study the colloidal chemical properties of the polyether polyol 2,2-bis (methylol) propionic acid of the fourth pseudo generation (trade name Boltorn H40) were studied and it was shown that they reduce the interfacial tension at the hydrocarbon solution of surfactant/water to low.

Keywords: *biodegradable polymers, hyperbranched polymers, surfactants, nanoparticles.*

Алифатические сверхразветвленные биоразлагаемые полиэфиры привлекают все большее внимание исследователей благодаря своим необычным свойствам. В частности, полиэфирполиолы на основе 2,2-бис(метилол)пропионовой кислоты широко используются в качестве вспомогательных агентов и модификаторов при производстве эпоксидных и алкидных смол, полиуретанов, органических стекол и др. Наличие большого количества периферийных гидроксильных групп делает их привлекательными для использования в качестве основы при получении биоразлагаемых блок-сополиэфиров для направленной доставки лекарственных веществ.

Из литературы известно [1–3], что полиэфирполиолы семейства *Boltorn*, в частности *Boltorn H40* (рис. 1), хорошо растворяются в некоторых органических полярных растворителях, таких как диметилформамид (ДМФА), диметилсульфоксид (ДМСО), ацетон и др., и не растворяются в метиленхлориде, тетрагидрофуране (ТГФ), этилацетате, ацетонитриле.

Наличие большого количества протонодонорных гидроксильных и протоноакцепторных карбонильных групп в структуре полиэфирполиолов обусловливает наличие ярко выраженных как внутримолекулярных, так и межмолекулярных водородных связей, которые сохраняются даже при повышенных температурах.

Ввиду большого количества гидроксильных групп, полиэфиры семейства *Boltorn* относят к полиспиртам, и для оценки их гидрофильно-липофильно-

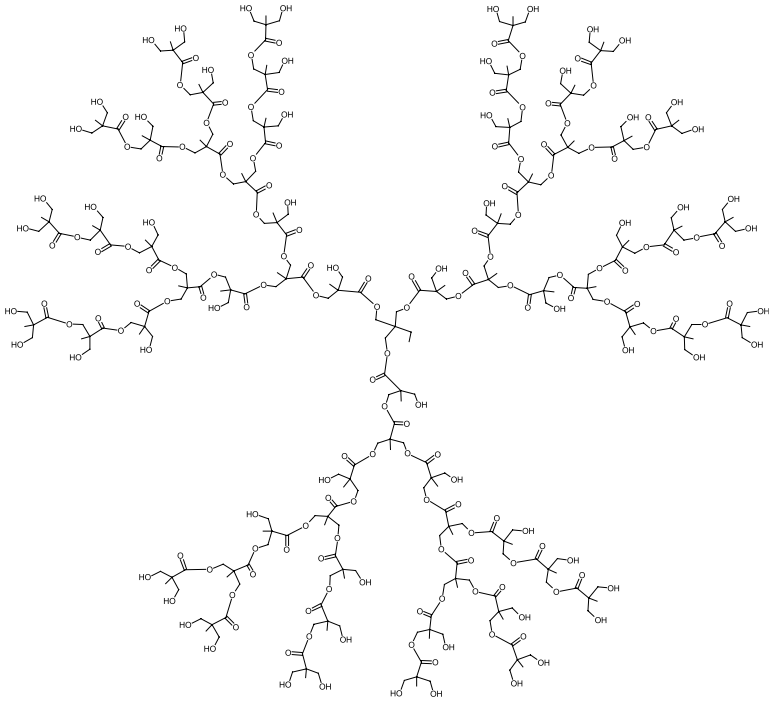

Рис. 1. Структурная формула полиэфирполиола *Boltorn H40.*

го баланса (ГЛБ) мы предложили подходы, опирающиеся на хорошо известные в органической химии факты о том, что низкомолекулярные первичные алифатические спирты, до пропилового включительно, смешиваются с водой во всех отношениях. Однако при достижении числа атомов углеродов в молекуле монофункционального первичного спирта, равного 4, свойства спиртов скачкообразно изменяются: существенно падает растворимость в воде, изменяются вязкость, спектральные характеристики и т. д. С дальнейшим повышением молекулярного веса растворимость спиртов уменьшается и для высших гомологов она практически равна нулю.

Вероятным объяснением указанному факту считают десольватацию, которая и вызывает скачкообразное изменение свойств. Аналогичные явления могут быть продемонстрированы и на примере алифатических (жирных) карбоновых кислот. Низшие члены ряда жирных кислот смешиваются с водой в любых отношениях, а начиная с масляной (также изомасляной) кислоты, это – ограниченно растворимые в воде маслянистые жидкости. Можно отметить, что, в отличие от спиртов, существенное изменение свойств карбоновых кислот отмечается при переходе от масляной к валериановой кислоте (4 и 5 углеродных атомов соответственно). Это свидетельствует в пользу того, что карбоксильные группы более прочно связаны водородными связями с водой, чем гидроксильные, и десольватируются несколько труднее, сохраняя тем не менее эффект скачкообразного изменения свойств при увеличении числа углеродных атомов в молекуле всего на один.

Основным мономером для получения полиэфиров *Boltorn* является 2,2-бис(метилол)пропионовая кислота (МПК), хорошо растворимая в воде, нерастворимая в ацетоне. Исследуемый в работе полиэфир *Boltorn H40*, ввиду неидеальности его структуры, принято называть полиэфирполиолом четвертой «псевдогенерации». При синтезе полиэфиров Boltorn конденсацией триметилолпропана (ТМП, разветвляющий центр) с МПК в условиях, близких к идеальным, неизбежно происходит перераспределение гидрофобных и гидрофильных ее частей по ходу процесса, причем последняя вытесняется ближе к периферии. Возникает дифильность молекулы в целом, причем четкого разграничения гидрофобного ядра и гидрофильной периферии нет. Внешний слой, наиболее богатый гидроксильными группами, можно рассматривать как наиболее гидратированный водой. Внутренние слои, вероятно, характеризуются постепенным переходом к гидрофобности [3–5].

К сожалению, литературные данные, посвященные исследованию растворимости в воде полиэфиров *Boltorn*, практически отсутствуют. Нам удалось установить, что ориентировочная концентрация полученного при комнатной температуре, визуально прозрачного водного раствора полиэфира *Boltorn H40* не превышает 0.001% масс. Однако даже столь невысокая концентрация растворившегося полиола демонстрирует совершенно явные его поверхностно-активные свойства, в результате чего многие вещества в этих условиях эмульгируются в воде (толуол, алифатические углеводороды, жиры). При повышении температуры воды вплоть до 100 ºС растворимость *Boltorn H40* заметно повышается, однако при последующем понижении ее до комнатной часть полимера выпадает в виде тонкой суспензии, при этом наблюдается повышение вязкости. Ориентировочная растворимость *Boltorn H40*, определенная гравиметрически, составляет около 0.08% масс.

Как уже отмечалось выше, большое влияние на физические свойства многофункциональных низкомолекулярных соединений, содержащих как гидроксильные (спирты), так и карбоксильные (карбоновые кислоты) группы, оказывает соотношение длины углеводородной цепи и количества полярных групп. Определенное соотношение, скорее всего, имеет место и практически количественно повторяется для относительно высокомолекулярных многофункциональных соединений, в частности, полиразветвленных полиолов. Такое изменение свойств наступает тогда, когда ван-дер-ваальсово взаимодействие между углеводородными цепочками начинает конкурировать с водородными связями между полярными группами. Указанное взаимодействие не разрушает водородных связей и ассоциации между полярными группами, но, вероятно, затрагивает их внешнюю (сольватную) оболочку, что характерно для рассматриваемых полиолов, где ассоциация обусловлена только одноименными функциональными (гидроксильными) группами.

На сегодняшний день литературных данных, посвященных получению устойчивых наночастиц из полиэфирполиола *Boltorn H40*, не обнаружено. Во всех опубликованных работах полиэфиры типа *Boltorn* предварительно карбоксилируют, модифицируют полиэтиленоксидом (ПЭГилируют), либо используют в качестве макроинициаторов полимеризации лактонов с последующей гидрофилизацией, и лишь после всех вышеперечисленных процедур получают наночастицы различными стандартными методами [5–9].

Экспериментальная часть

В работе использован полиэфирполиол марки *Boltorn H40* (Perstorp Group). Исследование водных суспензий наночастиц проводили на приборе Malvern Zetasizer Nano ZS (рабочий диапазон детектируемых размеров частиц от 4 нм до 6 мкм). Критическую концентрацию агрегации (ассоциации, ККА) определяли методом флуоресцентной спектроскопии на приборе

Cary Eclipse (оптический диапазон 200–900 нм). Исследование межфазного натяжения на границе раздела фаз раствор ПАВ – вода проводили методом дю Нуи (отрыва кольца) на цифровом тензиометре К9 (Германия, KRŰSS). Межфазное натяжение при каждой концентрации измеряли не менее 3 раз. Снимки АСМ получали на установке Veeco Multimode V SPM (Veeco, США) в полуконтактном режиме.

Результаты и их обсуждение

Методом диализа (постепенной замены неселективного растворителя на селективный) раствора полиэфирполиола *Boltorn H40* в ацетоне против воды были получены устойчивые дисперсии, которые исследовали методом динамического светорассеяния. Установлено, что коммерческий полиэфир *Boltorn H40* способен к агрегации в наночастицы с диаметрами в интервале от 68 до 255 нм (рис. 2), со средним распределением по диаметрам 127 нм, ζ-потенциал при этом имеет значение около –20 мВ.

Метод флуоресцентной спектроскопии с использованием пирена в качестве флуоресцентного зонда является детально разработанным и широко применяемым способом определения критической концентрации ассоциации (ККА) амфифильных полимеров в водных средах [10–12]. Значение ККА полиэфира *Boltorn H40* составило 1.3×10^{-5} М (рис. 3).

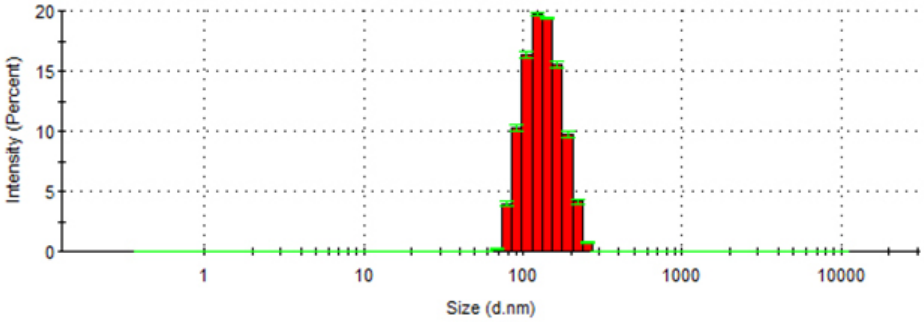

Рис. 2. Интенсивность распределения наночастиц на основе агрегатов полиэфира *Boltorn* по диаметрам.

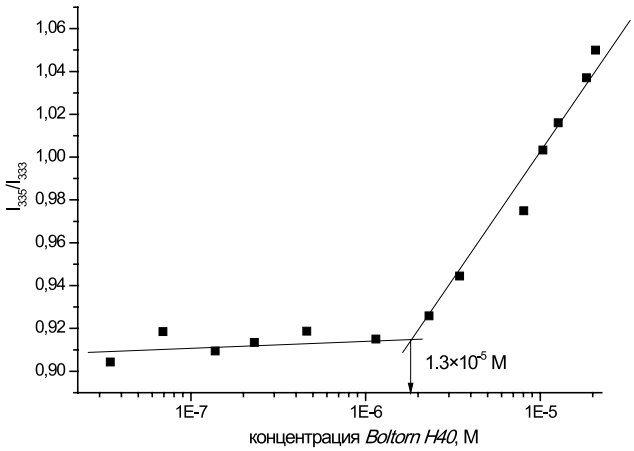

Рис. 3. Зависимость отношения интенсивностей флуоресценции пирена от концентрации *Boltorn H40*. ККА = 1.3×10^{-5} М.

Более того, впервые проведенное исследование методом атомно-силовой микроскопии наночастиц на основе полиэфира *Boltorn H40*, после высушивания на слюдяной подложке, показало, что в системе имеются упорядоченные структуры, близкие к фрактальным (рис. 4).

Таким образом, можно ожидать, что, несмотря на выраженную способность к самоагрегации, исследуемый полиэфирполиол все же должен обладать поверхностно-активными свойствами. Поскольку в литературе отсутствуют подобные сведения, в первую очередь представлялось интересным изучить его коллоидно-химические свойства и способность

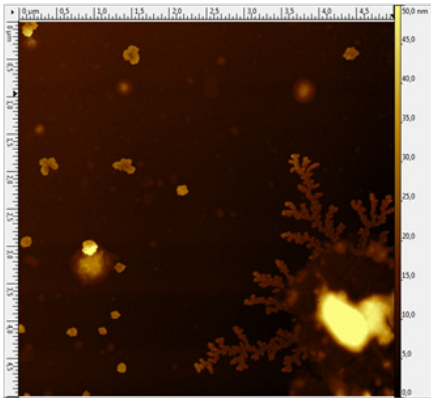

Рис. 4. АСМ-изображения наноструктур, образуемых полиэфиром *Boltorn H40*.

образовывать устойчивые (исходные) водные эмульсии виниловых мономеров с его участием. С этой целью проведено исследование межфазного натяжения систем раствор *Boltorn H40* в углеводороде/вода.

На рис. 5 приведена изотерма межфазного натяжения на границе раствор *Boltorn H40* в хлороформе/вода и, для сравнения, изотерма межфазного натяжения на границе раствор ПАВ в стироле/вода для ди-*n*-толил-*o*-карбалкоксифенилкарбинола (ДТК), также нерастворимого в воде ПАВ. Из представленных данных видно, что и ДТК, и *Boltorn H40* снижают межфазное натяжение до ~18 мДж/м^2, однако *Boltorn H40* проявляет на границе углеводород–вода более высокую поверхностную активность (таблица).

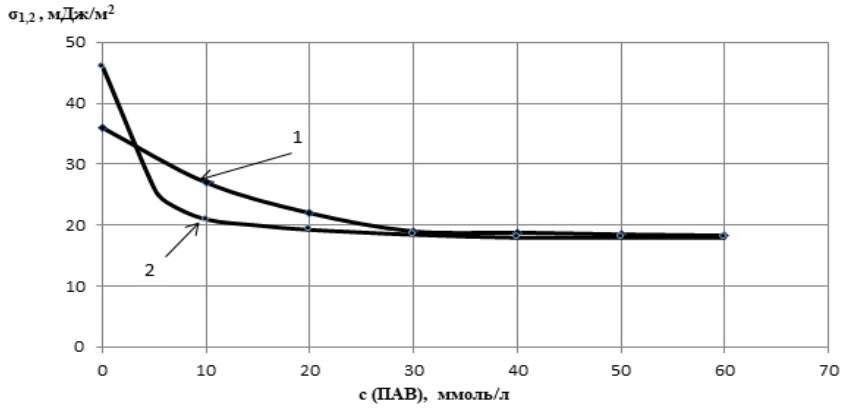

Рис. 5. Изотермы межфазного натяжения на границе: раствор в стироле ДТК/вода (1) и раствор в хлороформе *Boltorn H40*/вода (2). Температура 25 ºС.

Коллоидно-химические свойства полиэфирполиола *Boltorn H40* и ДТК

ПАВ	$\sigma_{1,2\,min}$, мДж/м^2	ККА, моль/дм^3	Поверхностная активность G, мДж×м/моль	$\Gamma_{макс}\times10^6$, моль/м^2	Площадь, занимаемая молекулой, $S_0\times10^{20}$, м^2
Boltorn H40	18.0	1.3×10^{-5}	4.0	10.0	17.0
ДТК	18.0	1.6×10^{-4}	1.0	5.6	30.0

Выводы

Таким образом, в соответствии с полученными данными, можно утверждать, что, несмотря на низкую водорастворимость, полиэфирполиол марки Boltorn H40 представляет собой достаточно активное, ранее не изученное ПАВ, особенностью которого является биоразлагаемость, что создает явные экологические преимущества при его использовании в качестве стабилизатора при эмульсионной полимеризации различных мономеров винильного типа. Определенные преимущества открываются и в других областях, в которых используются ПАВ, в частности, в медицине, для получения биоразлагаемых наноконтейнеров, содержащих лекарственные средства. Биоразлагаемость таких контейнеров отрывает широкие возможности регулирования выдачи лекарственного содержимого в живом организме.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-33-00899).

Список литературы:

1. Žagar E., Žigon M. Aliphatic hyperbranched polyesters based on 2,2-bis(methylol)propionic acid – Determination of structure, solution and bulk properties // Prog. Polym. Sci. 2011. V. 36. P. 53–88.

2. Žagar E., Huskić M., Žigon M. Structure-to-properties relationship of aliphatic hyperbranched polyesters // Macromol. Chem. Phys. 2007. V. 208. P. 1379–1387.

3. Gao C., Yan D. Hyperbranched polymers: From synthesis to applications // Prog. Polym. Sci. 2004. V. 29. P. 183–275.

4. Gillies E.R., Fréchet J.M.J. Dendrimers and dendritic polymers in drug delivery // Drug Discov.

References:

1. Žagar E., Žigon M. Aliphatic hyperbranched polyesters based on 2,2-bis(methylol)propionic acid – Determination of structure, solution and bulk properties. *Prog. Polym. Sci.* 2011; 36: 53-88.

2. Žagar E., Huskić M., Žigon M. Structure-to-properties relationship of aliphatic hyperbranched polyesters. *Macromol. Chem. Phys.* 2007; 208: 1379-1387.

3. Gao C., Yan D. Hyperbranched polymers: From synthesis to applications. *Prog. Polym. Sci.* 2004; 29: 183-275.

4. Gillies E.R., Fréchet J.M.J. Dendrimers and dendritic polymers in drug delivery. *Drug Discov. Today.*

Today. 2005. V. 10 (1). P. 35–43.

5. Chen S., Zhang X.Z., Cheng S.X., Zhuo R.X., Gu Z.W. Functionalized amphiphilic hyperbranched polymers for targeted drug delivery // Biomacromolecules. 2008. V. 9. P. 2578–2585.

6. Žagar E., Žigon M. Characterization of a commercial hyperbranched aliphatic polyester based on 2,2-bis(methylol)propionic acid // Macromolecules. 2002. V. 35. P. 9913–9925.

7. Claesson H., Malmström E., Johansson M., Hult A. Synthesis and characterization of star branched polyesters with dendritic cores and the effect of structural variations on zero shear rate viscosity // Polymer. 2002. V. 43 (12). P. 3511–3518.

8. Liu J.Y., Huang W., Pang Y., Zhu X.Y., Zhou Y.F., Yan D.Y. Self-assembled micelles from an amphiphilic hyperbranched copolymer with polyphosphate arms for drug delivery // Langmuir. 2010. V. 26 (13). P. 10585–10592.

9. Wurm F., Frey H. Linear-dendritic block copolymers: The state of the art and exciting perspectives // Prog. Polym. Sci. 2011. V. 36. P. 1–52.

10. Astafieva I., Zhong X.F., Eisenberg A. Critical micellization phenomena in block polyelectrolyte solutions // Macromolecules. 1993. V. 26 (26). P. 7339–7352.

11. Istratov V.V., Krupina T.V., Vasnev V.A., Gomzyak V.I. Development and characterization of bioresorbable polyglycerol esters and drug-loaded microparticles // High Perform. Polym. 2017. V. 29 (6). P. 708–715.

12. Истратов В.В., Гомзяк В.И., Крупина Т.В., Васнев В.А., Чвалун С.Н. Амфифильные линейно-разветвленные сополилактиды и дисперсные системы на их основе // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. 2017. Т. 59. № 6. С. 474–480.

2005; 10(1): 35-43.

5. Chen S., Zhang X.Z., Cheng S.X., Zhuo R.X., Gu Z.W. Functionalized amphiphilic hyperbranched polymers for targeted drug delivery. *Biomacromolecules.* 2008; 9: 2578-2585.

6. Žagar E., Žigon M. Characterization of a commercial hyperbranched aliphatic polyester based on 2,2-bis(methylol)propionic acid. *Macromolecules.* 2002; 35: 9913-9925.

7. Claesson H., Malmström E., Johansson M., Hult A. Synthesis and characterization of star branched polyesters with dendritic cores and the effect of structural variations on zero shear rate viscosity. *Polymer.* 2002; 43(12): 3511-3518.

8. Liu J.Y., Huang W., Pang Y., Zhu X.Y., Zhou Y.F., Yan D.Y. Self-assembled micelles from an amphiphilic hyperbranched copolymer with polyphosphate arms for drug delivery. *Langmuir.* 2010; 26(13): 10585-10592.

9. Wurm F., Frey H. Linear-dendritic block copolymers: The state of the art and exciting perspectives. *Prog. Polym. Sci.* 2011; 36: 1-52.

10. Astafieva I., Zhong X.F., Eisenberg A. Critical micellization phenomena in block polyelectrolyte solutions. *Macromolecules.* 1993; 26(26): 7339-7352.

11. Istratov V.V., Krupina T.V., Vasnev V.A., Gomzyak V.I. Development and characterization of bioresorbable polyglycerol esters and drug-loaded microparticles. *High Perform. Polym.* 2017; 29(6): 708-715.

12. Istratov V.V., Gomzyak V.I., Krupina T.V., Vasnev V.A., Chvalun S.N. Amphiphilic linear-branched copolylactides and dispersed systems on their basis. *Polym. Sci. Ser. B.* 2017; 59: 730-736.

Об авторах:

Гомзяк Виталий Иванович, кандидат химических наук, ассистент кафедры химии и технологии высокомолекулярных соединений им. С.С. Медведева Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86); инженер-исследователь лаборатории полимерных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1). Researcher ID E-4518-2017.

Пучков Александр Анатольевич, студент кафедры химии и технологии высокомолекулярных соединений им. С.С. Медведева Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86); лаборант-исследователь лаборатории полимерных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1). Researcher ID F-4455-2018.

Артамонова Нина Евгеньевна, студент кафедры химии и технологии высокомолекулярных соединений им. С.С. Медведева Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). Researcher ID F-2672-2018.

Поляков Дмитрий Константинович, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории полимерных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1). Researcher ID H-7361- 2017.

Симакова Галина Александровна, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры коллоидной химии им. С.С. Воюцкого Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

Грицкова Инесса Александровна, доктор химических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, профессор кафедры химии и технологии высокомолекулярных соединений им. С.С. Медведева Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

Чвалун Сергей Николаевич, доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой химии и технологии высокомолекулярных соединений им. С.С. Медведева Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86); заместитель руководителя Курчатовского комплекса НБИКС-технологий по научной работе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1). Researcher ID E-3924-2014

About the authors:

Vitaliy I. Gomzyak, Ph.D. (Chem.), Assistant of the Medvedev Chair of Chemistry and Technology of Macromolecular Compounds, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow, 119571, Russia); Engineer-Researcher of the Laboratory of Polymeric Materials, National Research Centre “Kurchatov Institute” (1, Kurchatova Sq., Moscow, 123182, Russia). Researcher ID E-4518-2017.

Alexander A. Puchkov, Student, Medvedev Chair of Chemistry and Technology of Macromolecular Compounds, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow,119571, Russia); Laboratory Assistant Researcher of the Laboratory of Polymeric Materials, National Research Centre “Kurchatov Institute” (1, Kurchatova Sq., Moscow, 123182, Russia). Researcher ID F-4455-2018.

Nina E. Artamonova, Student, Medvedev Chair of Chemistry and Technology of Macromolecular Compounds, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow,119571, Russia). Researcher ID F-2672-2018.

Dmitry K. Polyakov, Ph.D. (Chem.), Leading Researcher of the Laboratory of Polymeric Materials, National Research Centre “Kurchatov Institute” (1, Kurchatova Sq., Moscow, 123182, Russia). Researcher ID H-7361- 2017.

Galina A. Simakova, D.Sc. (Chem.), Professor of the Voyutskiy Chair of Colloid Chemistry, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow, 119571, Russia).

Inessa A. Gritskova, Professor, D.Sc. (Chem.), Honored Worker of Science of the Russian Federation, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Professor of the Medvedev Chair of Chemistry and Technology of Macromolecular Compounds, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow, 119571, Russia).

Sergey N. Chvalun, Professor, D.Sc. (Chem.), Head of the Medvedev Chair of Chemistry and Technology of Macromolecular Compounds, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow, 119571, Russia); Deputy Director of Kurchatov Complex of NBICS-technologies of the National Research Centre “Kurchatov Institute” (1, Kurchatova Sq., Moscow, 123182, Russia). Researcher ID E-3924-2014.

Для цитирования: Гомзяк В.И., Пучков А.А., Артамонова Н.Е., Поляков Д.К., Симакова Г.А., Грицкова И.А., Чвалун С.Н. Физико-химические свойства биоразлагаемого сверхразветвленного полиэфирполиола на основе 2,2-бис(метилол)пропионовой кислоты // Тонкие химические технологии / Fine Chemical Technologies. 2018. Т. 13. № 4. С. 67–73.

For citation: Gomzyak V.I., Puchkov A.A., Artamonova N.E., Polyakov D.K., Simakova G.A., Gritskova I.A., Chvalun S.N. Physico-chemical properties of biodegradable hyperbranched polyester polyol based on 2,2-bis(methylol) propionic acid. *Tonkie khimicheskie tekhnologii / Fine Chemical Technologies.* 2018; 13(4): 67-73. (in Russ.)