

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY

УДК 004.356.2
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-1-7-13>

Поступила в редакцию 19.06.2018
Received 19.06.2018

Е. М. Довыденко^{1,2}, В. Е. Агабеков², С. А. Чижик^{1,3}

¹*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

²*Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

³*Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ 3D-ПЕЧАТИ ГИДРОГЕЛЕМ АЛЬГИНАТА НАТРИЯ

Аннотация. С целью получения биологически совместимых объектов с механическими свойствами, близкими к живым тканям, проведена 3D-печать биосовместимым гидрогелем альгината натрия при комнатной температуре на модифицированном настольном 3D-принтере Up! Mini (производство PP3DP, Китай). Произведена замена стандартной печатающей головки на специальный экструдер-шприц для возможности экструзии гидрогеля, детали которого были изготовлены методом 3D-печати из ABS пластика. Из параметров были изменены стандартные скорости подачи материала и передвижения печатающей головки. Для точного воспроизведения размеров объектов методом 3D-печати из данного гидрогеля установлены следующие параметры: оптимальная концентрация альгината натрия (2,5 мас.%) в экструдруемом гидрогеле; состав «поддерживающей» желатиновой суспензии, которая фиксируется на печатном столике 3D-принтера и служит объемной поддержкой гидрогеля альгината натрия в процессе 3D-печати (10 г хлорида кальция CaCl₂ и 13,5 г желатина типа А на 500 мл дистиллированной воды к обоим составам). Способ подготовки «поддерживающей» желатиновой суспензии включает перемешивание компонентов смеси, ее диспергирование при 9000 об/мин в течение 1 мин на диспергаторе IKA ULTRA-TURRAX T 25 digital, отстаивание при 4 °С в течение 4 ч, центрифугирование при 5500 об/мин в течение 3 мин, удаление супернатанта. Определены оптимальные скорость перемещения печатающей головки в процессе 3D-печати и скорость экструзии гидрогеля при формировании внешнего периметра печатающегося объекта (9–11 и 5 мм/с соответственно), а также скорость экструзии материала при формировании внутреннего заполнения модели (0,83 мм/с).

Ключевые слова: гидрогель, альгинат натрия, 3D-печать, «поддерживающая» суспензия, экструдер-шприц, параметры 3D-печати

Для цитирования: Довыденко, Е. М. Оптимизация параметров 3D-печати гидрогелем альгината натрия / Е. М. Довыденко, В. Е. Агабеков, С. А. Чижик // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2019. – Т. 64, № 1. – С. 7–13. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-1-7-13>

Ye. M. Dovydenko^{1,2}, V. Ye. Agabekov², S. A. Chizhik^{1,3}

¹*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

²*Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

³*Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

OPTIMIZATION OF 3D PRINTING PARAMETERS WITH SODIUM ALGINATE HYDROGEL

Abstract. In order to obtain biologically compatible objects with mechanical properties close to living tissues, 3D printing with biocompatible sodium alginate hydrogel at room temperature on the modified desktop 3D printer Up! Mini (manufactured by PP3DP, China) was carried out. The standard print head was replaced with a special syringe-extruder to allow the extrusion of a hydrogel, the details of which were made by 3D printing from ABS plastic. Of the parameters, the standard material feed and print head movement rates were changed. For accurate reproduction of object sizes using 3D printing from this hydrogel the next parameters were established: the optimal concentration of sodium alginate in extruded hydrogel (2.5 wt.%);

the composition of the “support” gelatin suspension, which was fixed on the printing table of a 3D printer and served as volumetric support for hydrogel (10 g of calcium chloride CaCl_2 and 13.5 g of gelatin per 500 ml of distilled water). The method of its preparation includes 1 minute mixing of components blend, dispersion at 9000 rpm on IKA ULTRA-TURRAX T 25 digital disperser, 4 hours settling at 4 °C, 3 minutes centrifuging at 5500 rpm, removal of the supernatant. The optimal movement speed of the print head during 3D printing and the speed of extrusion of the hydrogel during the formation of the external perimeter of the printing object are 9–11 and 5 mm/s, respectively, as well as the speed of material extrusion during the formation of the internal filling of the model is 0.83 mm/s.

Keywords: hydrogel, sodium alginate, 3D printing, “support” suspension, syringe-extruder, 3D printing options

For citation: Dovydenko Ye. M., Agabekov V. Ye., Chizhik S. A. Optimization of 3D printing parameters with sodium alginate hydrogel. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 1, pp. 7–13 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-1-7-13>

Введение. В настоящее время 3D-печать биологически совместимыми гидрогелями весьма перспективна для изготовления различных моделей, прототипов и форм в стоматологии, трансплантологии, пластической хирургии, травматологии и протезировании [1–4]. Гидрогели альгинатов, фибрина, коллагена, хитозана и гиалуроновой кислоты являются биосовместимыми материалами, обладают высокой эластичностью и прочностью [4], позволяют сохранять требуемую точность модели при печати и выращивать живые клетки на поверхности и в объеме напечатанного образца. Так, известны работы по 3D-печати альгинатом кальция с добавлением поливинилового спирта и гидроксиапатита, силиконом в объеме микрогеля [5, 6], композиционным материалом из полиэтиленгликоля, альгината кальция и наноглины [7], альгинатом натрия, фибрином и коллагеном [8].

Альгинат натрия – ионогенный полисахарид, широко используемый в пищевой, косметической, медицинской и других отраслях [9]. Практическое применение нашли соли кальция, ионы которого выступают в качестве сшивающих агентов, взаимодействуя с карбоксильными группами гулуонатных блоков молекул альгината [10, 11]. Высокая водоудерживающая способность, отсутствие токсичности и биodeградируемость альгинатных гидрогелей, трехмерно сшитых ионами кальция [12], делает эти материалы пригодными для 3D-печати объектов, способных на своей поверхности и в объеме выращивать живые клетки.

Экструзия гидрогеля альгината натрия на подложку без «поддерживающей» суспензии проблематична из-за высокого показателя текучести материала – напечатанный объект не сохраняет форму. *Целью настоящей работы* явилось получение методом 3D-печати объектов из гидрогеля альгината натрия с сохранением высокой точности, определение оптимальных параметров печати и составов «поддерживающей» суспензии и гидрогеля.

Оборудование и методика эксперимента. В качестве технологии 3D-печати гидрогелем нами принят метод экструзии гидрогеля альгината натрия через специальный экструдер-шприц (рис. 1) в объем «поддерживающей» суспензии. Применяемый экструдер-шприц разработан с адаптацией для работы на 3D-принтере Up! Mini производства PP3DP (Китай) без изменений способа подачи материала согласно [8]. Гидрогель в процессе 3D-печати находится в шприце, поршень которого толкается шпилькой. Поворот шпильки осуществляется при помощи зубчатой передачи колеса шагового двигателя (3) и главного колеса экструдера-шприца (1).

В [8] в качестве экструдированного материала применяли раствор 2 мас.% альгината натрия в дистиллированной воде. Процесс печати производился при комнатной температуре на 3D-принтере MakerBot Replicator (MakerBot Industries, Китай) в объем «поддерживающей» суспензии из желатина, хлорида кальция CaCl_2 и дистиллированной воды (рис. 2).

При 3D-печати с применением составов компонентов и режимов, представленных в [8], на 3D-принтере Up! Mini отмечалась плохая фиксация объекта печати внутри «поддерживающей» суспензии и отсутствие сшиваемости гидрогеля альгината натрия ионами кальция. Было установлено, что качество 3D-печати гидрогелем зависит:

от способа подготовки и состава «поддерживающей» суспензии, которые влияют на фиксацию гидрогеля альгината натрия и сохранение формы печатающейся структуры;

от скоростей экструзии материала и перемещения экструдера-шприца при печати, определяющих точность воспроизведения модели и однородность структуры объекта печати.

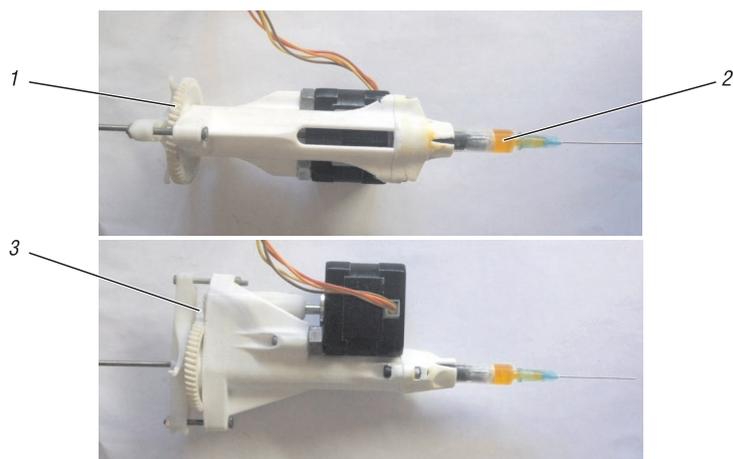


Рис. 1. Экструдер-шприц для 3D-печати гидрогелем: 1 – главное зубчатое колесо экструдера-шприца, 2 – шприц с гидрогелем, 3 – зубчатая передача

Fig. 1. Syringe-extruder for hydrogel 3D printing: 1 – main cogwheel of syringe-extruder, 2 – syringe with hydrogel, 3 – gear transmission

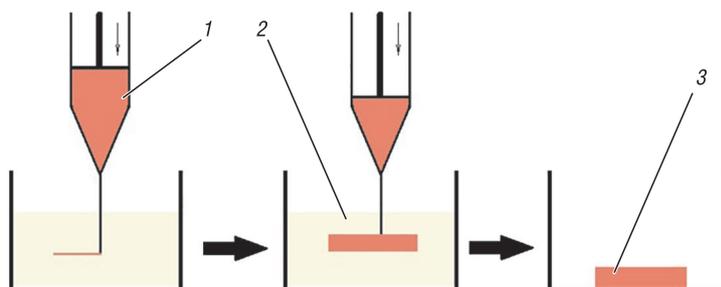


Рис. 2. Схема процесса получения объектов из гидрогеля методом 3D-печати: 1 – гидрогель альгината натрия в специальном экструдере-шприце, 2 – «поддерживающая» желатиновая суспензия, 3 – напечатанный из гидрогеля объект

Fig. 2. The scheme of obtaining objects process from the hydrogel using 3D printing: 1 – sodium alginate hydrogel in special syringe-extruder, 2 – “support” gelatin suspension, 3 – printed object from hydrogel

Для возможности 3D-печати гидрогелем на 3D-принтере Up! Mini в результате экспериментов нами определена оптимальная концентрация альгината натрия в гидрогеле. Критериями пригодности материала для экструзии являлись его беспрепятственное прохождение через канал иглы экструдера-шприца и точность фиксации внутри поддерживающей суспензии. Диаметр канала иглы составлял 0,3 мм. Испытанию подвергались гидрогели с содержанием альгината натрия (мас.%) 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 и 3,0. Гидрогели с содержанием альгината натрия 1,0 и 1,5 мас.% обладали повышенной текучестью, вследствие чего не фиксировались в объеме «поддерживающей» суспензии. Гидрогель с 3,0 мас.% альгината натрия не проходил через канал иглы экструдера. Нами установлено оптимальное содержание гидрогеля альгината натрия 2,5 мас.%, поскольку в этом случае наблюдались надежная фиксация и максимальная точность печати.

С применением двух составов «поддерживающей» суспензии (5 г CaCl_2 + 6,75 г желатина и 10 г CaCl_2 + 13,5 г желатина на 500 мл дистиллированной воды к обоим составам) был определен способ ее подготовки. Общими этапами получения для всех вариантов состава являлись: перемешивание компонентов в дистиллированной воде при температуре 70 °С до полного растворения; отстаивание при 4 °С в течение 5 ч.

Результатом печати с добавлением этапа дальнейшей разморозки при 25 °С в течение 1 ч стало отсутствие фиксации гидрогеля. Добавление этапа диспергирования суспензии после

ее частичной разморозки показало хороший результат печати первого внешнего слоя периметра модели. Однако второй и последующие слои не сшивались с предыдущими.

Дальнейшее центрифугирование смеси при 5500 об/мин в течение 3 мин и последующее удаление супернатанта показало, что при печати в «поддерживающую» суспензию, имеющую состав 5 г CaCl_2 + 6,75 г желатина на 500 мл H_2O , материал растекался и не сшивался. При 3D-печати в «поддерживающую» суспензию состава 10 г CaCl_2 + 13,5 г желатина на 500 мл H_2O наблюдались надежная фиксация гидрогеля и сшивание его ионами кальция. Таким образом, наиболее приемлема следующая последовательность подготовки суспензии:

- 1) перемешивание компонентов в дистиллированной воде при температуре 70 °С до полного растворения;
- 2) отстаивание при 4 °С (5 ч);
- 3) частичная разморозка при 25 °С (1 ч);
- 4) диспергирование суспензии при 9000 об/мин (1 мин);
- 5) центрифугирование смеси при 5500 об/мин (3 мин);
- 6) удаление супернатанта.

Этапы со 2-го по 6-й производились при комнатной температуре. Полученная суспензия имела реологию Бингама – состояние вещества, при котором оно обладает механическими свойствами жидкого тела при высоких сдвиговых напряжениях и механическими свойствами твердого тела при низких сдвиговых напряжениях [13]. Благодаря такому эффекту экструдированный гидрогель надежно фиксируется в объеме суспензии.

Критерии влияния скорости экструзии на процесс формирования модели являлись непрерывность экструдированной нити гидрогеля из экструдера-шприца, отсутствие скоплений материала на конце иглы и процент заполнения печатающегося объекта. Поскольку первоначальная конструкция экструзионной головки принтера была изменена и подача материала осуществлялась с применением зубчатого колеса на конце вала шагового двигателя, подающего материал в сопло, первичные показатели скорости экструзии не подходили для печати гидрогелем.

В программном обеспечении 3D-принтера UP! Mini существует возможность регулирования двух вариантов скоростей экструзии: при печати внешнего периметра модели и при печати ее внутреннего заполнения. Подбор подходящей скорости экструзии гидрогеля при печати внешнего периметра модели (таблица) осуществлялся путем нанесения с разной скоростью одного слоя гидрогеля на твердую подложку без желатиновой «поддерживающей» суспензии (рис. 3). При скоростях экструзии от 1 до 9 мм/с образовывались разрывы периметра объекта печати и наблюдалось плохое внутреннее заполнение модели. При скорости больше 11 мм/с происходило скопление материала по периметру объекта печати. При скорости экструзии гидрогеля 9–11 мм/с наблюдалось качественное формирование внешнего периметра модели.

Скорость подачи материала при формировании внутреннего заполнения модели, как и при печати внешнего периметра, задавалась путем нанесения гидрогеля на твердую подложку без желатиновой суспензии (рис. 4).

**Влияние скорости экструзии гидрогеля альгината натрия (2,5 мас.%)
при 3D-печати внутреннего заполнения модели**

**The effect of extrusion speed of sodium alginate hydrogel (2.5 wt.%) with 3D printing
of internal filling of the model**

Скорость, мм/с	Результат
0,50	Материал не экструдирован
0,55	Материал экструдирован малыми каплями
0,62	Экструзия сплошной струей, фиксация слабая
0,70	Надежная фиксация первого слоя, плохое внутреннее заполнение
0,83	Фиксация всех слоев надежная, хорошее заполнение
1,05	Смещение последних слоев печатающегося объекта
1,12	Смещение всех слоев
1,20	Избыток подачи материала. Скопление излишков по периметру

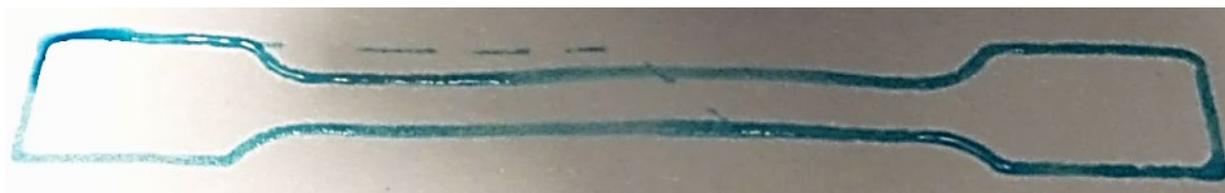


Рис. 3. Слой внешнего периметра, напечатанный на подложке 2,5 мас.% гидрогелем альгината натрия, скорость экструзии 10 мм/с

Fig. 3. The outer perimeter layer printed from 2.5 wt.% of sodium alginate hydrogel on the substrate, extrusion speed is 10 mm/s

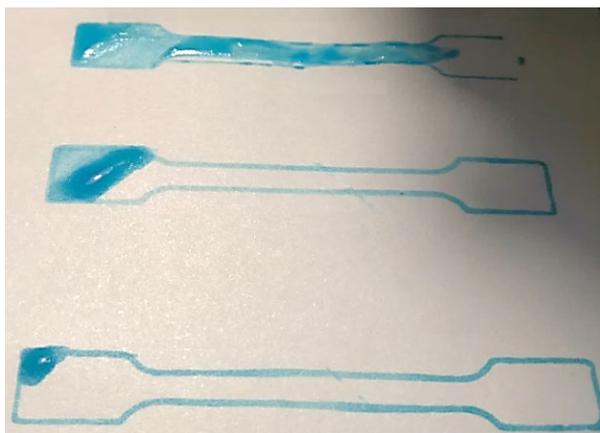


Рис. 4. Внутреннее заполнение модели при различных скоростях экструзии гидрогеля

Fig. 4. Internal filling of model with different hydrogel extrusion speeds

При печати внешнего периметра модели скорость перемещения печатающей головки оказывала влияние на надежность фиксации материала внутри объема «поддерживающей» суспензии. При значении скорости от 1,0 до 4,0 мм/с наблюдалось образование сгустков материала в различных точках модели, а при значениях от 5,0 до 8,0 мм/с – хорошее качество печати (рис. 5). Со скоростью перемещения больше 9,0 мм/с точность воспроизведения и надежность фиксации объекта печати резко ухудшались.

Известно, что качество печати напрямую зависит от параметра ретракции (обратное втягивание) материала. При отсутствии ретракции в ходе эксперимента нами наблюдалось скопление излишек гидрогеля в местах начала новых слоев модели (рис. 6). Поскольку программное обеспечение 3D-принтера Up! Mini не позволяет устанавливать ретракцию материала, дальнейшие исследования в этом направлении следует производить на другом 3D-принтере.

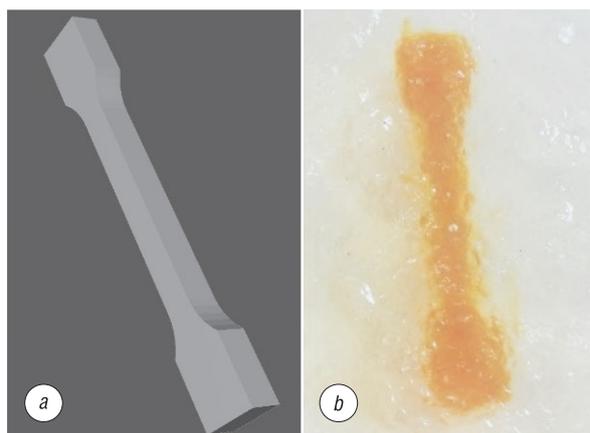


Рис. 5. 3D-модель (a) и напечатанный объект из гидрогеля альгината натрия 2,5 мас.% внутри поддерживающей суспензии после окончания процесса 3D-печати (b), скорость экструзии внутреннего заполнения 0,83 мм/с

Fig. 5. The 3D model (a) and the printed object from sodium alginate hydrogel 2.5 wt.% in support suspension after 3D printing process (b), extrusion speed of inner filling 0.83 mm/s

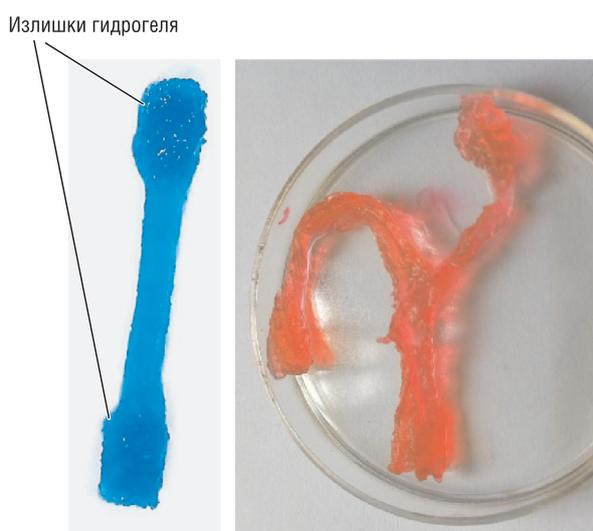


Рис. 6. Напечатанные объекты из гидрогеля альгината натрия (2,5 мас.%) без ретракции материала

Fig. 6. Printed objects from sodium alginate hydrogel (2.5 wt.%) without material retraction

Заключение. Показана возможность применения гидрогеля альгината натрия на водной основе для 3D-печати. При концентрации альгината натрия в гидрогеле 2,5 мас.% канал иглы экструдера-шприца не забивается, материал не растекается в объеме суспензии и обладает повышенной прочностью.

Установлены оптимальный состав (500 мл H₂O + 10 г CaCl₂ + 13,5 г желатина типа А) и способ подготовки «поддерживающей» суспензии, обладающей достаточной жесткостью для фиксации гидрогеля в процессе 3D-печати (перемешивание компонентов, диспергирование смеси при 9000 об/мин (1 мин), отстаивание при 4 °С (4 ч), центрифугирование при 5500 об/мин (3 мин), удаление супернатанта).

Определено, что удовлетворительное качество 3D-печати гидрогелем альгината натрия наблюдается при скорости экструзии в процессе образования внешнего периметра модели 9–11 мм/с, формирования внутреннего заполнения 0,83 мм/с и перемещения печатающей головки 3D-принтера Up! Mini при печати внешнего периметра 5–8 мм/с.

Описанная технология получения объемных объектов из гидрогелей может быть применена в сфере медицинской 3D-печати.

Список использованных источников

1. Зотова, А. А. Актуальность применения 3D-принтеров в современной стоматологии / А. А. Зотова, К. Д. Вдовенко // Бюлл. мед. Интернет-конференций. – 2015. – Т. 5, вып. 11. – С. 1284.
2. Шустова, В. А. Применение 3D-технологий в ортопедической стоматологии / В. А. Шустова, М. А. Шустов. – СПб.: СпецЛит, 2016. – 159 с.
3. Выставка передовых технологий 3D-печати и сканирования [Электронный ресурс] // Медицина. – 2013–2017. – Режим доступа: <https://3dexpro.ru/ru/recent-industry-news/meditsina/> – Дата доступа: 18.12.2017.
4. Тонкопленочные материалы на основе полисахаридов для клеточной инженерии / В. И. Куликовская [и др.] // Третий междисциплинарный молодежный научный форум «Новые материалы»: сб. материалов. – М., 2017. – С. 786–789.
5. Bendtsen, S. T. Development of a novel alginate-polyvinyl alcohol-hydroxyapatite hydrogel for 3D bioprinting bone tissue engineered scaffolds / S. T. Bendtsen, S. P. Quinnell, M. Wei // J. Biomed. Mater. Res. A. – 2017. – Vol. 105, iss. 5. – P. 1457–1468. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.36036>
6. Self-assembled micro-organogels for 3D printing silicone structures / C. S. O'Bryan [et al.] // Science Advances. – 2017. – Vol. 3, N 5. – e1602800. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1602800>
7. 3D Printing of Highly Stretchable and Tough Hydrogels into Complex, Cellularized Structures / S. Hong [et al.] // Advanced Materials. – 2015. – Vol. 27, iss. 27. – P. 4035–4040. <https://doi.org/10.1002/adma.201501099>
8. Three-dimensional printing of complex biological structures by freeform reversible embedding of suspended hydrogels / T. J. Hinton [et al.] // Sci. Adv. – 2015. – Vol. 1, iss. 9. – P. 1–10. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500758>
9. Хотимченко, Ю. С. Углеводные биополимеры для адресной доставки белковых препаратов, нуклеиновых кислот и полисахаридов / Ю. С. Хотимченко // Тихоокеан. мед. журн. – 2014. – № 2. – С. 5–13.
10. Усов, А. И. Альгиновые кислоты и альгинаты: методы анализа, определения состава и установления строения / А. И. Усов // Успехи химии. – 1999. – Т. 68, № 11. – С. 1051–1061.
11. Щипунов, Ю. А. Гомогенные альгинатные гели: фазовое поведение и реологические свойства / Ю. А. Щипунов, Е. Л. Конева, И. В. Постнова // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. – 2002. – Т. 44, № 7. – С. 1201–1211.
12. Skjåk-Bræk, G. Application of alginate gels in biotechnology and biomedicine / G. Skjåk-Bræk, T. Espevik // Carbohydr. Eur. – 1996. – Vol. 14, № 19. – P. 237–242.
13. Немцева, М. П. Реологические свойства коллоидных систем: учеб. пособие / М. П. Немцева, Д. В. Филиппов, А. А. Федорова. – Иваново: ИГХТУ, 2016. – 61 с.

References

1. Zotova A. A., Vdovenko K. D. The urgency of using 3D printers in modern dentistry. *Byulleten' meditsinskikh Internet-konferentsii = Bulletin of Medical Internet Conferences*, 2015, vol. 5, no. 11 (in Russian).
2. Shustova V. A., Shustov M. A. *Application of 3D Technologies in Orthopedic Dentistry*. Saint Petersburg, SpetsLit Publ., 2016. 159 p. (in Russian).
3. Exhibition of advanced technologies for 3D printing and scanning. *Meditsina, 2013–2017*. Available: <https://3dexpro.ru/ru/recent-industry-news/meditsina/> (accessed 18 December 2017) (in Russian).
4. Kulikovskaya V. I., Gilevskaya K. S., Pinchuk S. V., Kraskovskii A. N., Matievskii K. A. Thin-film materials based on polysaccharides for cellular engineering. *Tretii mezhdistsiplinarnyi molodezhnyi nauchnyi forum «Novye materialy»: sbornik materialov* [The 3rd Interdisciplinary Youth Scientific Forum “New Materials”: Collection of materials]. Moscow, 2017, pp. 786–789 (in Russian).
5. Bendtsen S. T., Quinnell S. P., Wei M. Development of a novel alginate-polyvinyl alcohol-hydroxyapatite hydrogel for 3D bioprinting bone tissue engineered scaffolds. *Journal of Biomedical Materials Research*, 2017, vol. 105, iss. 5, pp. 1457–1468. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.36036>

6. O'Bryan C. S., Bhattacharjee T., Hart S., Kabb C. P., Schulze K. D., Chilakala I., Sumerlin B. S., Sawyer W. G., Angelini T. E. Self-assembled micro-organogels for 3D printing silicone structures. *Science Advances*, 2017, vol. 3, no. 5, e1602800. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1602800>
7. Hong S., Sycks D., Hon Fai Chan, Shaoting Lin, Lopez G. P., Leong F. G. K. W., Xuanhe Zhao. 3D Printing of Highly Stretchable and Tough Hydrogels into Complex, Cellularized Structures. *Advanced Materials*, 2015, vol. 27, iss. 27, pp. 4035–4040. <https://doi.org/10.1002/adma.201501099>
8. Hinton T. J., Jallerat Q., Palchesko R. N., Park J. H., Grodzicki M. S., Hao-Jan Shue, Mohamed H. Ramadan, Hudson A. R., Feinberg A. W. Three-dimensional printing of complex biological structures by freeform reversible embedding of suspended hydrogels. *Science Advances*, 2015, vol. 1, iss. 9, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500758>
9. Khotimchenko Yu. S. Carbohydrate biopolymers for targeted delivery of protein preparations, nucleic acids and polysaccharides. *Tikhookeanskii meditsinskii zhurnal = Pacific Medical Journal*, 2014, no. 2, pp. 5–13 (in Russian).
10. Usov A. I. Alginic acids and alginates: analytical methods used for their estimation and characterisation of composition and primary structure. *Russian Chemical Reviews*, 1999, vol. 68, no. 11, pp. 957–966. <https://doi.org/10.1070/rc1999v-068n11abeh000532>
11. Shchipunov Yu. A., Koneva E. L., Postnova I. V. Homogeneous alginate gels: phase behavior and rheological properties. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Ser. A = High-Molecular Compounds. Series A*, 2002, vol. 44, no. 7, pp. 1201–1211 (in Russian).
12. Skjåk-Bræk G., Espevik T. Application of alginate gels in biotechnology and biomedicine. *Carbohydrates in Europe*, 1996, vol. 14, no. 19, pp. 237–242.
13. Nemtseva M. P., Filippov D. V., Fedorova A. A. *Rheological properties of colloidal systems*. Ivanovo, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, 2016. 61 p. (in Russian).

Информация об авторах

Довыденко Егор Михайлович – аспирант, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь); младший научный сотрудник, Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dovydenko.e93@mail.ru

Агабеков Владимир Енокович – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор химических наук, профессор, директор Института химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ichnm@ichnm.basnet.by

Чижик Сергей Антонович – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, первый заместитель Председателя Президиума Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь); главный научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: chizhik_sa@tut.by

Information about the authors

Yegor M. Dovydenko – Postgraduate Student, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus); Junior Researcher, Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skaryna Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dovydenko.e93@mail.ru

Vladimir Y. Agabekov – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Chemistry), Professor, Director of the Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skaryna Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ichnm@ichnm.basnet.by

Sergey A. Chizhik – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, First Deputy Chairman of the Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus); Chief Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: chizhik_sa@tut.by