

КРИОГЕЛИ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗИМНИКА**М.С. Фуфаева, Л.К. Алтунина**

Мария Сергеевна Фуфаева (ORCID 0000-0003-4252-7786) *, Любовь Константиновна Алтунина (ORCID 0000-0001-9502-1864)

Лаборатория коллоидной химии нефти, Институт химии нефти СО РАН, Академический пр-т, 4, Томск, Российская Федерация, 634055

E-mail: maria81@ipc.tsc.ru*

В работе предложен способ формирования композиционного криотронного материала на основе водного раствора поливинилового спирта для нанесения на поверхность снежоледового полотна. Замораживание водного раствора поливинилового спирта при отрицательной температуре и последующее оттаивание при температуре выше нуля, приводит к формированию упругих криогелей. Введение борной кислоты в полимерный раствор приводит к химической сшивке кинетически индивидуальных макромолекул поливинилового спирта в пространственные сетки, которые обладают упругими свойствами. Практический интерес применения материалов на основе криогелей обусловлен экологической безопасностью, высокими показателями физико-химических и теплофизических свойств, простым способом их получения и низкой стоимостью. При исследовании кинетики гелеобразования многокомпонентных систем наблюдали, что формирование геля при температуре 5 °С происходит примерно через 13 ч. Установлено, что с увеличением времени термостатирования геля при температуре 5 °С модуль упругости образцов, полученных в результате химической реакции, возрастает примерно за 120 ч в 2 раза. Показано, что после криоструктурирования многокомпонентных растворов модуль упругости возрастает в 9 раз. Присутствие песка в структурированной системе значительно увеличивает упругие свойства геля и криогеля. Следует отметить, что коэффициент теплопроводности криогелей почти в 2 раза меньше, чем воды, а температура плавления более 60 °С. Результаты практических экспериментов показали, что покрытие снежоледовой поверхности криогелем уменьшает скорость ее таяния и, следовательно, композиции на основе криогелей могут применяться для продления срока безопасной эксплуатации зимников.

Ключевые слова: криогель, поливиниловый спирт, борная кислота, модуль упругости, теплопроводность, зимник

CRYOGELS TO INCREASE THE SERVICE LIFE OF WINTER ROADS**M.S. Fufaeva, L.K. Altunina**

Mariya S. Fufaeva (ORCID 0000-0003-4252-7786)*, Lyubov K. Altunina (ORCID 0000-0001-9502-1864)

Laboratory of Petroleum Colloidal Chemistry, Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the RAS, Akademicheskii ave., 4, Tomsk, 634050, Russia

E-mail: maria81@ipc.tsc.ru*

The work proposes a method for forming a composite cryotron material based on an aqueous solution of polyvinyl alcohol for application to the surface of a snow-ice sheet. Freezing an aqueous solution of polyvinyl alcohol at a negative temperature and subsequent thawing at a temperature above zero leads to the formation of elastic cryogels. The introduction of boric acid into a polymer solution leads to chemical cross-linking of kinetically individual macromolecules of polyvinyl alcohol into spatial networks that have elastic properties. The practical interest in using materials based on cryogels is due to environmental safety, high physicochemical and thermophysical

properties, a simple method for their preparation and low cost. When studying the kinetics of gelation of multicomponent systems, it was observed that the formation of a gel at a temperature of 5 °C occurs after approximately 13 hours. It has been established that with increasing temperature control time of the gel at a temperature of 5 °C, the elastic modulus of samples obtained as a result of a chemical reaction increases by 2 times in approximately 120 h. It has been shown that after cryostructuring of multicomponent solutions, the elastic modulus increases 9 times. The presence of sand in a structured system significantly increases the elastic properties of the gel and cryogel. It should be noted that the thermal conductivity coefficient of cryogels is almost 2 times less than that of water, and the melting point is more than 60 °C. The results of practical experiments show that coating a snow-ice surface with cryogel reduces the rate of its melting and, therefore, compositions based on cryogels can be used to extend the life of safe operation of winter roads.

Keywords: cryogel, polyvinyl alcohol, boric acid, elastic modulus, thermal conductivity, winter road

Для цитирования:

Фуфаева М.С., Алтунина Л.К. Криогели для увеличения срока эксплуатации зимника. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 8. С. 29–35. DOI: 10.6060/ivkkt.20246708.13t.

For citation:

Fufaeva M.S., Altunina L.K. Cryogels to increase the service life of winter roads. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 8. P. 29–35. DOI: 10.6060/ivkkt.20246708.13t.

ВВЕДЕНИЕ

Освоение месторождений Арктики является одной из приоритетных задач для российской нефтегазовой отрасли. Важной задачей является обеспечение круглогодичной транспортной доступности на технологические объекты. Однако малая продолжительность летнего периода и заболоченность значительно затрудняют безопасную эксплуатацию дорог. В этих условиях наибольшее распространение получили снеголедовые дороги (зимники), эксплуатация которых должна быть безопасной в период колебаний суточных температур, но при дневных положительных температурах срок их действия ограничен. Для увеличения срока эксплуатации зимника в основном применяют технологию намораживания льда, слои снега и льда укрывают мхом или опилками. Разработка прочных теплоизолирующих ледяных покрытий, которые могут надежно укреплять, продлять срок службы безопасного передвижения транспорта, является актуальной задачей.

В работах [1-5] для создания льдогрунтовых материалов, предназначенных для строительства спортивных площадок, в качестве упрочняющих добавок лед армируют водорастворимыми полимерами.

Прочность ледяных покрытий при сохранении их теплоизоляционных свойств может быть увеличена методом криотропного гелеобразования [6, 7].

Замораживание водного раствора поливинилового спирта (ПВС) при отрицательной температуре и последующее размораживание образовавшегося ледяного образца при положительной температуре приводит к формированию криогеля [8, 9]. Структурирование происходит не за счет химической реакции между макромолекулами и дополнительно введенными реагентами, а после циклического изменения термодинамического параметра (температуры), за счет образования водородных связей в структуре полимерных цепей ПВС [10].

Для структурирования водных растворов ПВС, кроме криогенного воздействия, может быть использован также и другой подход, заключающийся в химический «сшивке» кинетически индивидуальных макромолекул ПВС в пространственные сетки, которые обладают упругими свойствами. В качестве сшивающего химического низкомолекулярного реагента в работе использовали борную кислоту [11].

Материалы на основе криогелей, применяются в технологических процессах добычи нефти и газа, в строительстве, в почвоведении, медицине, биотехнологии и других отраслях [12-15].

Цель работы – исследование физико-химических свойств композитного криогеля на основе водного раствора поливинилового спирта.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для приготовления исходного водного раствора полимера использовали образец ПВС с молекулярной массой $M \approx 70 \cdot 10^3$, который содержит в

своей структуре не более 1% остаточных ацетатных групп после проведенного гидролиза поливинилацетата.

Для приготовления трехкомпонентного раствора (ПВС – борная кислота – вода) в горячей воде растворяли борную кислоту и добавляли небольшими порциями порошок ПВС, затем нагревали до температуры 90 °С и перемешивали в течение 1-2 ч.

Изучение кинетики гелеобразования систем проводили на вибрационном вискозиметре «Реокинетика». Суть вибрационного метода вискозиметрии заключается в определении величины тормозящей силы, действующей со стороны жидкости на погруженный в нее колеблющийся зонд. Величина тормозящей силы зависит от вязкости исследуемой жидкости [16].

Для формирования криогеля раствор ПВС заливали в цилиндрические ячейки и замораживали при температуре минус 20 °С, а размораживали при температуре плюс 20 °С.

Модуль упругости образцов криогелей определяли с помощью лабораторной установки, теоретической основой которой является реологическая модель Максвелла [17-19]. Задавали деформацию сжатия (γ) и измеряли упругое напряжение (σ), возникающее в материале. Далее по формуле Гука $E = \sigma/\gamma$ рассчитывали мгновенный модуль упругости (E , кПа) [20].

Для исследования упругих свойств геля, полученного на основе трехкомпонентного раствора (ПВС, борная кислота, вода) и суспензии (ПВС, борная кислота, вода, песок) во времени, вязкий раствор композиции помещали в ячейку, термостатировали при температуре 5 °С и через каждые 24 ч измеряли модуль упругости.

Теплоизоляционные свойства геля и криогелей оценивали по величине коэффициента теплопроводности (λ , Вт/К·м), которую определяли на установке; основным рабочим узлом установки являются два стальных коаксиальных цилиндра, в зазоре между которыми помещена исследуемая среда [21]. Значение коэффициента теплопроводности рассчитывали по формуле:

$$\lambda = Q \cdot \ln(R_1/R_2) / 2\pi \cdot L \cdot t \cdot (T_0 - T),$$

где R_1 – внутренний радиус большого цилиндра; R_2 – наружный радиус малого цилиндра; Q – количество тепла, передаваемое от нагретой воды термостата к воде внутреннего цилиндра; L – высота малого цилиндра; T – текущая температура воды во внутреннем цилиндре в некоторый момент времени (t); T_0 – температура теплоносителя в термостате.

Температуру плавления ($T_{пл.}$, °С) геля и криогелей измеряли на приборе STUART Mettling Point Apparatus SMP 30 (Cole-Parmer Ltd, Великобритания).

Для испытания криогеля в качестве теплоизолирующего покрытия уплотненного снега в натуральных условиях были выбраны 2 способа. Первый способ: на поверхность уплотненного снега методом дождевания наносили водный раствор двухкомпонентного или трехкомпонентного полимера. Второй способ: на поверхность уплотненного снега наносили криогель в виде ледяной крошки, пересыпанной мульчирующими материалами (песок, опилки или торф).

Полевые эксперименты проводили в январе 2023 года на территории Института химии нефти СО РАН (г. Томск), где были заложены 8 экспериментальных участков.

Участок № 1. Контроль. Уплотнили снег и полили водой. Через 1 сут. присыпали снегом, уплотнили и еще раз полили водой.

Участок № 2. Уплотненный снег полили водой. Через 1 сут. присыпали снегом, уплотнили и полили водным раствором ПВС.

Участок № 3. Уплотненный снег полили водой. Через 1 сут. присыпали снегом, уплотнили и полили раствором ПВС 5%, H_3BO_3 1%.

Участок № 4. Уплотненный снег полили водой, через 1 сут. присыпали снегом, уплотнили и посыпали крошкой замороженного криогеля. Через 1 сут. полили раствором ПВС 5%, H_3BO_3 1%.

Участок № 5. Уплотненный снег полили водой. Через 1 сут. присыпали и уплотнили снег, нанесли песок, уплотнили и полили раствором ПВС 5%, H_3BO_3 1%.

Участок № 6. Уплотненный снег полили водой. Через 1 сут. участок посыпали замороженной крошкой криогеля, пересыпанной песком, и уплотнили.

Участок № 7. Уплотненный снег полили водой. Через 1 сут. участок посыпали крошкой криогеля, пересыпанной опилками, и уплотнили.

Участок № 8. Уплотненный снег полили водой. Через 1 сут. уплотненный снег посыпали крошкой криогеля, пересыпанной торфом, и уплотнили.

В течение 5 мес. вели мониторинг экспериментальных площадок, регулярно уплотняли выпавших снег на поверхности каждого участка, фиксировали температуру воздуха и измеряли высоту каждого участка.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для практического применения композиций необходимо исследовать их реологические свойства (рис. 1).

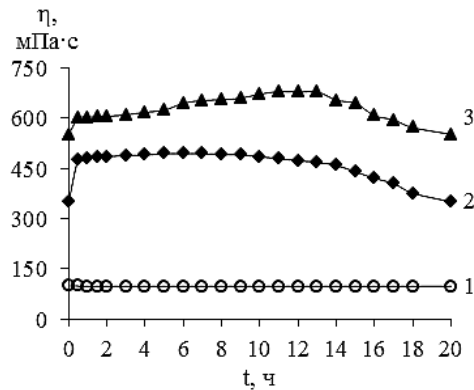


Рис. 1. Кинетика изменения вязкости композиции при температуре 5 °С: 1 – раствор ПВС 5 %; 2 – композиция ПВС 5%, борная кислота 1%; 3 – композиция ПВС 5%, борная кислота 1%, песок 10%

Fig. 1. Kinetics of changes in viscosity of the composition at temperature 5 °C: 1 – PVA solut; 2 – composition PVA 5%, boric acid 1%; 3 – composition PVA 5%, boric acid 1%, sand 10%

При взаимодействии водного раствора ПВС с борной кислотой, вследствие беспорядочного соединения линейных цепей полимера поперечными связями, образуется нерастворимый борнокислый комплекс [22].

На рис. 1 видно, что вязкость двухкомпонентного раствора (кривая 1) практически не изменяется со временем и значительно ниже вязкости композиций (кривые 2 и 3). На начальном участке вязкость (кривые 2 и 3) стремительно возрастает, что связано с началом формирования геля. Затем наблюдали рост вязкости до максимального значения при данной температуре, далее она уменьшается. Уменьшение вязкости возникает, когда упругие свойства гелей преобладают над вязкими свойствами. В области последующего наблюдаемого уменьшения диссипативных характеристик геля начинается возрастание упругой компоненты модуля, где точки перегиба – время образования геля (рис. 1 примерно 13 ч, кривая 2 и 3) с преобладанием упругих характеристик.

На рис. 2 видно, что с увеличением времени термостатирования геля при температуре 5 °С модуль упругости обоих образцов возрастает и примерно через 120 ч выходит на плато. Следовательно, со временем композиция при положительной температуре упрочняется более чем в 2 раза, что является преимуществом для практического применения в строительстве зимников.

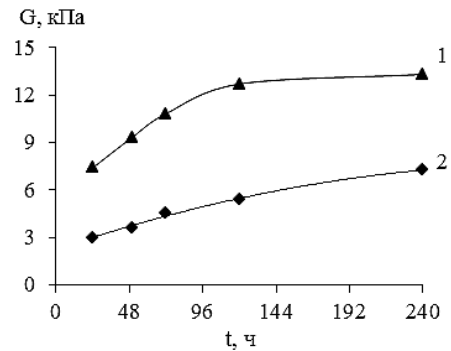


Рис. 2. Зависимость модуля упругости геля от времени термостатирования при температуре 5 °С: 1 – ПВС 5%, борная кислота 1%; 2 – ПВС 5%, борная кислота 1%, песок 10%

Fig. 2. Dependence of the elastic modulus of the gel on the thermostating time at temperature 5 °C: 1 – composition PVA 5%, boric acid 1%; sand 10 %

Результаты исследования механических и теплофизических свойств гетерофазных криогелей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Модуль упругости (E), коэффициент теплопроводности (λ) и температура плавления (T_{пл}) криогелей на основе ПВС

Table 1. Elastic modulus (E), thermal conductivity coefficient (λ) and melting point (T_m) of PVA-based cryogels

Состав, % мас.	E, кПа	λ, Вт/(К·м)	T _{пл} , °С
Вода	-	0,62	0
ПВС 5 криогель	17	0,34	70
ПВС 5 Н ₃ ВО ₃ 1 Гель 24 ч	3	0,36	60
ПВС 5 Н ₃ ВО ₃ 1 криогель	28	0,33	70
ПВС 5 Н ₃ ВО ₃ 1 Песок 10 криогель	115	1,70	70

Из табл. 1 следует, что после криоструктурирования трехкомпонентного раствора (ПВС, борная кислота, вода) модуль упругости возрастает в 9 раз и почти в 2 раза по сравнению с двухкомпонентным криогелем (ПВС, вода). Присутствие песка в составе криогеля значительно увеличивает модуль упругости криогелей. Следует отметить, что коэффициент теплопроводности криогеля почти в 2 раза меньше коэффициента теплопроводности воды.

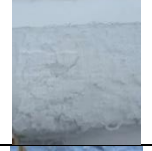
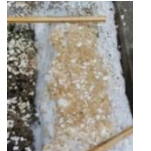
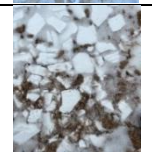
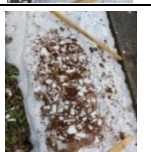
В течение 4 мес. вели наблюдение за участками (табл. 2).

Логично, что первым растаял контрольный участок. Снег на участках № 2 и 3, покрытых растворами, таял медленнее. Участки № 4 и 5 почти на 1 мес. дольше таяли относительно контроля. Хотя

под тяжестью песка высота участка № 5 была меньше. С участков № 6-9, покрытых крошкой криогеля с опилками или торфом, мелкодисперсные частицы сдуло ветром. На примере участка № 4 показана динамика изменения высоты участка при увеличении температуры (рис. 3).

Таблица 2
Визуальные наблюдения за экспериментальными участками

Table 2. Visual observations of experimental areas

№ участка	Дата сделанного снимка	
	1 февраля	30 марта
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		

В конце марта дневная температура поднималась до 10 °С и контрольный участок полностью

растаял. До середины апреля средняя дневная температура составляла примерно 0 °С, следовательно, экспериментальный участок таял медленно, но как только суточная температура стала повышаться (дневная выше 10 °С), участок полностью растаял.

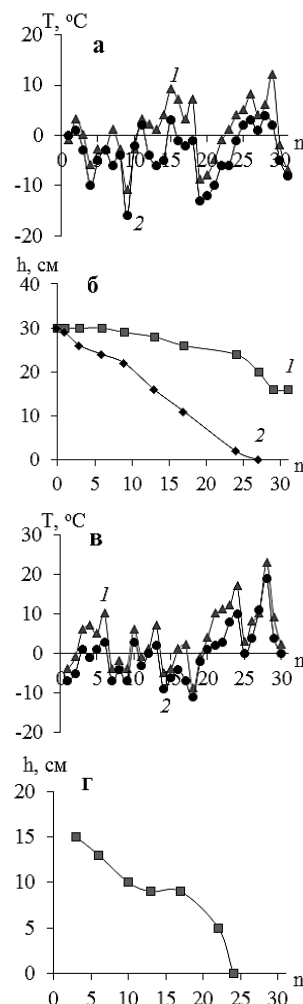


Рис. 3. Ежедневное (n) наблюдение за участком № 4: а – изменение температуры (Т) воздуха в марте, днем (1) и ночью (2); б – высота (h) снега под композицией в марте, опыт (1) и контроль (2); в – изменение температуры (Т) воздуха в апреле, днем (1) и ночью (2); г – высота (h) снега под композицией в апреле, опыт

Fig. 3. Daily (n) monitoring of site No. 4: а – change in air temperature (Т) in March, during the day (1) and at night (2); б – height (h) of snow under the composition in March, experiment (1) and control (2); в – change in air temperature (Т) in April, during the day (1) and at night (2); г – height (h) of snow under the composition in April, experiment

ВЫВОД

Криогель обладает низкими показателями коэффициента теплопроводности по сравнению с водой или песком и высокими значениями модуля упругости. Покрытие снеголедового основания

композицией криогеля изолирует его от воздействия тепла. Кроме того, разработанный состав трехкомпонентного криогеля можно применять для ремонтных работ зимников в весенний период, когда днем температура положительная. После полного таяния снега криогель высыхает и его прочная пленка будет укреплять проблемные дороги на Севере.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН, финансируемого Ми-

нистерством науки и высшего образования Российской Федерации (НИОКТР № 121031500048-1).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The work was carried out within the State Assignment for IPC SB RAS, financed by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (NIOKTR 121031500048-1).

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vasiliev N.K., Pronk A.D.C., Shatalina I.N., Janssen F.H.M.E., Houben R.W.G. A review on the development of reinforced ice for use as a building material in cold regions. *Cold Regions Sci. Technol.* 2015. V. 115. P. 56-63. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.03.006.
2. Moiseev V.I., Komarova T.A., Komarova O.A., Vasiliev N.K. Creation of the massif of permafrost in construction zones of engineering structures on soft soils. In: *Transportation Soil Engineering in Cold Regions. V. 1. Lecture Notes in Civil Engineering* this link is disabled. 2020. 49. P. 97-104. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_10.
3. Бурин Д.А., Рожкова Ю.А., Казанцев А.Л. Основы метода синтеза микрогелей методом обратной эмульсии. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 3. С. 6-17. DOI: 10.6060/ivkkt.20236603.6732.
4. Moiseev V.I., Vasiliev N.K., Komarova T.A., Komarova, O.A. Apparatus for Strengthening Soft Water-Saturated Soils by Freezing under Engineering Objects and Structures in Cold Regions. *Procedia Eng.* 2017. 189. P. 40-44. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.007.
5. Wan W., Bannerman A.D., Yang, L., Mak H. Poly(vinyl alcohol) cryogels for biomedical applications. *Adv. Polym. Sci.* 2014. 263. P. 283-321. DOI: 10.1007/978-3-319-05846-7_8.
6. Lozinsky V.I. Cryostructuring of polymeric systems. 55. Retrospective view on the more than 40 years of studies performed in the A.N.Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds with respect of the cryostructuring processes in polymeric systems *Gels.* 2020. V. 6. N 3. P. 29. DOI: 10.3390/gels6030029.
7. Demir D., Özdemir S., Gonca S., Bölgen N. Novel styrax liquidus loaded chitosan/polyvinyl alcohol cryogels with antioxidant and antimicrobial properties. *J. Appl. Polym. Sci.* 2022. 139. 52033.
8. Michurov D.A., Makhina T.K., Siracusa V., Bonartsev A.P., Lozinsky V.I., Iordanskii A.L. Poly(vinyl alcohol)-based cryogels loaded with the poly(3-hydroxybutyrate) microbeads and the evaluation of such composites as the delivery vehicles for simvastatin. *Polymers.* 2022. 14(11). 2196. DOI: 10.3390/polym14112196.
9. Peppas N.A., Stauffer S.R. Reinforced uncrosslinked poly (vinyl alcohol) gels produced by cyclic freezing-thawing processes A short review. *J. Control. Release.* 1991. V. 16. P. 305-310. DOI: 10.1016/0168-3659(91)90007-Z.
10. Hassan C.M., Peppas N.A. Structure and applications of poly(vinyl alcohol) hydrogels produced by conventional crosslinking or by freezing/thawing methods. *Adv. Polym. Sci.* 2000. 153. P. 37-65. DOI: 10.1007/3-540-46414-X_2.

REFERENCES

1. Vasiliev N.K., Pronk A.D.C., Shatalina I.N., Janssen F.H.M.E., Houben R.W.G. A review on the development of reinforced ice for use as a building material in cold regions. *Cold Regions Sci. Technol.* 2015. V. 115. P. 56-63. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.03.006.
2. Moiseev V.I., Komarova T.A., Komarova O.A., Vasiliev N.K. Creation of the massif of permafrost in construction zones of engineering structures on soft soils. In: *Transportation Soil Engineering in Cold Regions. V. 1. Lecture Notes in Civil Engineering* this link is disabled. 2020. 49. P. 97-104. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_10.
3. Burin D.A., Rozhkova Y.A., Kazantsev A.L. Fundamental principles of microgel synthesis by inverse emulsion method. *ChemChemTech. [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 3. P. 6-17 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236603.6732.
4. Moiseev V.I., Vasiliev N.K., Komarova T.A., Komarova, O.A. Apparatus for Strengthening Soft Water-Saturated Soils by Freezing under Engineering Objects and Structures in Cold Regions. *Procedia Eng.* 2017. 189. P. 40-44. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.007.
5. Wan W., Bannerman A.D., Yang, L., Mak H. Poly(vinyl alcohol) cryogels for biomedical applications. *Adv. Polym. Sci.* 2014. 263. P. 283-321. DOI: 10.1007/978-3-319-05846-7_8.
6. Lozinsky V.I. Cryostructuring of polymeric systems. 55. Retrospective view on the more than 40 years of studies performed in the A.N.Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds with respect of the cryostructuring processes in polymeric systems *Gels.* 2020. V. 6. N 3. P. 29. DOI: 10.3390/gels6030029.
7. Demir D., Özdemir S., Gonca S., Bölgen N. Novel styrax liquidus loaded chitosan/polyvinyl alcohol cryogels with antioxidant and antimicrobial properties. *J. Appl. Polym. Sci.* 2022. 139. 52033.
8. Michurov D.A., Makhina T.K., Siracusa V., Bonartsev A.P., Lozinsky V.I., Iordanskii A.L. Poly(vinyl alcohol)-based cryogels loaded with the poly(3-hydroxybutyrate) microbeads and the evaluation of such composites as the delivery vehicles for simvastatin. *Polymers.* 2022. 14(11). 2196. DOI: 10.3390/polym14112196.
9. Peppas N.A., Stauffer S.R. Reinforced uncrosslinked poly (vinyl alcohol) gels produced by cyclic freezing-thawing processes A short review. *J. Control. Release.* 1991. V. 16. P. 305-310. DOI: 10.1016/0168-3659(91)90007-Z.
10. Hassan C.M., Peppas N.A. Structure and applications of poly(vinyl alcohol) hydrogels produced by conventional crosslinking or by freezing/thawing methods. *Adv. Polym. Sci.* 2000. 153. P. 37-65. DOI: 10.1007/3-540-46414-X_2.

11. **Prosanov I.Yu., Abdulrahman S.T., Thomas S., Bulina N.V., Gerasimov K.B.** Complex of polyvinyl alcohol with boric acid: structure and use. *Mater. Today Commun.* 2018. V. 14. P. 77-81. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2017.12.012.
12. **Алтунина Л.К., Манжай В.Н., Фуфаева М.С.** Криогели для решения экологических проблем на нарушенных территориях горнодобывающих карьеров. *Химия в интересах устойчивого развития*. 2022. Т. 30. № 5. С. 460-464. DOI: 10.15372/CSD2022402.
13. **Алтунина Л.К., Сваровская Л.И., Филатов Д.А., Фуфаева М.С., Жук Е.А., Бендер О.Г., Сигачев Н.П., Коновалова Н.А.** Полевые эксперименты по применению криогелей с целью защиты почв от водной и ветровой эрозии. *Пробл. агрохимии и экологии*. 2013. № 2. С. 47-52.
14. **Овсянникова В.С., Фуфаева М.С., Ким Е., Алтунина Л.К.** Биоразложение в почве материалов на основе криогелей поливинилового спирта и крахмала. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 11. С. 126-134. DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.6t.
15. **Алтунина Л.К., Кувшинов В.А., Долгих С.Н.** Криогели для тампонажных работ в районах распространения многолетнемерзлых пород. *Гидротехника*. 2010. № 3. С. 56-60.
16. **Богословский А.В., Кожевников И.С., Алтунина Л.К.** Вискозиметр тиксотропных жидкостей. *Журн. СВУ. Техника и технологии*. 2023. Т. 16. № 3. С. 287-295.
17. **Малкин А.Я.** Основы реологии. СПб.: «Профессия». 2018. 474 с.
18. **Malkin A.Ya., Isayev A.I.** Rheology: concepts, methods and applications. Toronto: ChemTec Publ. 2006. 474 p.
19. **Ravve A.** Principles of Polymer Chemistry. New York: Springer. 2016 p.
20. **Manzhai V.N., Fufaeva M.S., Kashlach E.S.** Relaxation of Mechanical Stress in Poly(vinyl alcohol) Cryogels of Different Compositions. *Chin. J. Polym. Sci.* 2023. 41. P. 442-447. DOI: 10.1007/s10118-022-2889-8.
21. **Касаткин А.Г.** Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия. 1971. 784 с.
22. **Angelova L.V., Terech P., Natali I., Dei L., Carretti E., Weiss R.G.** Cosolvent gel-like materials from partially hydrolyzed poly(vinyl acetate)s and borax. *Langmuir*. 2011. V. 27. N 18. P. 11671-11682. DOI: 10.1021/la202179e.
11. **Prosanov I.Yu., Abdulrahman S.T., Thomas S., Bulina N.V., Gerasimov K.B.** Complex of polyvinyl alcohol with boric acid: structure and use. *Mater. Today Commun.* 2018. V. 14. P. 77-81. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2017.12.012.
12. **Altunina L.K., Manzhai V.N., Fufayeva M.S.** Cryogels for solving environmental problems at the disturbed areas of mining quarries. *Chemistry for Sustainable Development [Khimiya v Interesah Ustoichivogo Razvitiya]*. 2022. V. 30. N 5. P. 441-445. DOI: 10.15372/CSD2022402.
13. **Altunina L.K., Svarovskaya L.I., Filatov D.A., Fufayeva M.S., Zhuk E.A., Bender O.G., Sigachev N.P., Konovalova N.A.** Field experiments on the use of cryogels to protect soils from water and wind erosion. *Probl. Agrokhim. Ekol.* 2013. N 2. P. 47-52 (in Russian).
14. **Ovsyannikova V.S., Fufaeva M.S., Kim Y., Altunina L.K.** Biodegradation in soil of polymeric materials based on polyvinyl alcohol and starch cryogels. *ChemChemTech. [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 11. P. 126-137 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.6t.
15. **Altunina L.K., Kuvshinov V.A., Dolgikh S.N.** Cryogels for plugging in cold and permafrost regions. *Gidrotehnika*. 2010. N 3. P. 52-57.
16. **Bogoslovskii A.V., Kozhevnikov I.S., Altunina L.K.** Viscometer of thixotropic liquids. *Zhurn. Sibir. Fed. Univ. Tekhn. Tekhnolog.* 2023. V. 16. N 3. P. 287-295 (in Russian).
17. **Malkin A.J.** Fundamentals of rheology. SPb.: «Professiya». 2018. 336 p. (in Russian).
18. **Malkin A.Ya., Isayev A.I.** Rheology: concepts, methods and applications. Toronto: ChemTec Publ. 2006. 474 p.
19. **Ravve A.** Principles of Polymer Chemistry. New York: Springer. 2016 p.
20. **Manzhai V.N., Fufaeva M.S., Kashlach E.S.** Relaxation of Mechanical Stress in Poly(vinyl alcohol) Cryogels of Different Compositions. *Chin. J. Polym. Sci.* 2023. 41. P. 442-447. DOI: 10.1007/s10118-022-2889-8.
21. **Kasatkin A.G.** Basic processes and apparatuses of chemical technology. M.: Khimiya. 1971. 784 p. (in Russian).
22. **Angelova L.V., Terech P., Natali I., Dei L., Carretti E., Weiss R.G.** Cosolvent gel-like materials from partially hydrolyzed poly(vinyl acetate)s and borax. *Langmuir*. 2011. V. 27. N 18. P. 11671-11682. DOI: 10.1021/la202179e.

Поступила в редакцию 01.03.2024

Принята к опубликованию 09.04.2024

Received 01.03.2024

Accepted 09.04.2024