

ВЛИЯНИЕ ДИМЕТИЛСУЛЬФОКСИДА И ГЛИЦЕРИНА НА СВОЙСТВА КРИОГЕЛЕЙ**М.С. Фуфаева, В.Н. Манжай**

Мария Сергеевна Фуфаева (ORCID 0000-0003-4252-7786)*, Владимир Николаевич Манжай (ORCID 0000-0002-2678-2237)

Лаборатория коллоидной химии нефти, Институт химии нефти СО РАН, Академический пр., 4, Томск, Российская Федерация, 634050

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

В работе представлены результаты исследования температуры замерзания растворов поливинилового спирта (ПВС) в диметилсульфоксиде (ДМСО) и в воде. Определено влияние природы растворителя и добавок глицерина на температуру замерзания раствора ПВС. Исследованы упругие и теплофизические свойства криогелей на основе растворов ПВС. Установлено, что криогели ПВС, сформированные в среде ДМСО, обладают меньшими значениями модуля упругости и температуры плавления, чем образцы криогелей, сформированные из водных растворов ПВС. Поскольку ДМСО является термодинамически лучшим растворителем для ПВС, чем вода, то есть сродство полимера к ДМСО выше, это снижает эффективность гелеобразования из-за конкуренции взаимодействий полимер-растворитель и полимер-полимер. При охлаждении растворов ПВС в воде и ДМСО до начала потери текучести было зафиксировано переохлаждение. Для водного раствора ПВС 10% температура переохлаждения системы составила минус 5 °С, до начала замерзания, которое протекает при температуре минус 1,5 °С. Температура переохлаждения раствора ПВС в ДМСО составляет минус 20 °С, а температура замерзания минус 0,8 °С. Введение глицерина в водный раствор ПВС приводит к значительному понижению температуры замерзания трехкомпонентного раствора (ПВС, глицерин и вода). Отмечено, что с увеличением концентрации глицерина в водном растворе ПВС модуль упругости увеличивается, а температура плавления понижается по сравнению с криогелями на основе двухкомпонентного криогеля (ПВС и вода). Результаты исследований расширяют область использования криогелей ПВС в качестве композиционных материалов, предназначенных для применения в северных регионах, в том числе в технологиях добычи и транспорта нефти.

Ключевые слова: криогель, поливиниловый спирт, глицерин, диметилсульфоксид, модуль упругости, температура замерзания

EFFECT OF DIMETHYL SULFOXIDE AND GLYCEROL ON THE PROPERTIES OF CRYOGELS**M.S. Fufaeva, V.N. Manzhai**

Mariya S. Fufaeva (ORCID 0000-0003-4252-7786)*, Vladimir N. Manzhai (ORCID 0000-0002-2678-2237)

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

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

The paper presents the results of a study of the freezing point of polyvinyl alcohol (PVA) solutions dissolved in dimethyl sulfoxide (DMSO) and water. The influence of the nature of the solvent and glycerin additives on the freezing temperature of the PVA solution was determined.

Elastic and thermophysical properties of cryogels based on PVA solutions were studied. It was found that PVA cryogels formed in DMSO have a lower elastic modulus and melting point than cryogels formed from aqueous PVA solutions. Since DMSO is a thermodynamically better solvent for PVA than water, i.e. the affinity of the polymer for DMSO is higher, this reduces the efficiency of gelation due to competition between polymer-solvent and polymer-polymer interactions. When cooling PVA solutions, the supercooling temperature of the system in water and DMSO was observed. For a 10% aqueous solution of PVA, the supercooling temperature of the system is minus 5 °C, before freezing begins, which occurs at a temperature of minus 1.5 °C. The supercooling temperature of a PVA solution in DMSO is minus 20 °C, and the freezing temperature is minus 0.8 °C. The introduction of glycerol into an aqueous PVA solution leads to a significant decrease in the freezing temperature of the three-component solution (PVA, glycerol and water). It is noted that with an increase in the concentration of glycerol in an aqueous PVA solution, the elastic modulus increases, and the melting temperature decreases, compared to cryogels based on a two-component cryogel. The results of the studies can expand the scope of use of PVA cryogels as composite materials intended for use in northern regions, including in oil production and transportation technologies.

Keywords: cryogel, polyvinyl alcohol, glycerol, dimethyl sulfoxide, elastic modulus, freezing point

Для цитирования:

Фуфаева М.С., Манжай В.Н. Влияние диметилсульфоксида и глицерина на свойства криогелей. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 8. С. 6–11. DOI: 10.6060/ivkkt.20256808.8t.

For citation:

Fufaeva M.S., Manzhai V.N. Effect of dimethyl sulfoxide and glycerol on the properties of cryogels. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 8. P. 6–11. DOI: 10.6060/ivkkt.20256808.8t.

ВВЕДЕНИЕ

Замораживание водного раствора поливинилового спирта (ПВС), выдерживание его при отрицательной температуре и последующее размораживание твердого образца при положительной температуре приводит к формированию эластичного криогеля. Обязательным условием криоструктурирования является кристаллизация чистого растворителя [1-3].

Материалы на основе криогелей ПВС известны давно, и благодаря простоте их приготовления они представляют значительный научный и практический интерес в разных областях практической деятельности [4]. Криогели могут применяться для рекультивации и повышения несущей способности грунтов, оснований сооружений, а также для создания гидроизоляционных экранов [5-7]. Практическое применение криогелей в технологиях добычи и транспорта нефти на объектах, расположенных на Севере и в Арктической зоне, вызывает сложности, например, при транспортировке и хранении водного раствора ПВС. Для стабилизации грунта раствор ПВС распыляют на его поверхность, а для создания барьерного экрана раствор закачивают в скважину [8, 9]. Работы проводят в весенне-осенний период, когда наблюдаются колебания суточной температуры. Поэтому

актуальной задачей является разработка состава криогеля на основе раствора ПВС с регулируемой температурой замерзания исходного раствора.

Цель работы – исследовать влияние диметилсульфоксида и глицерина на температуру замерзания раствора поливинилового спирта и на свойства криогелей.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе использовали образец ПВС, содержащий в своей структуре не более 1% остаточных ацетатных групп, после проведенного гидролиза поливинилацетата.

Для приготовления раствора ПВС в ДМСО или воде определенную навеску порошка ПВС растворяли при нагревании в воде или в диметилсульфоксиде. Для приготовления трехкомпонентного раствора (ПВС, глицерин, вода) в водный раствор ПВС добавляли глицерин и все тщательно перемешивали.

Для определения температуры кристаллизации раствора ПВС пробирку с исследуемым раствором, в котором находятся термпары, опускали в термостат, заполненный охлаждающей смесью с температурой на 3-5 °C ниже ожидаемой температуры кристаллизации. Исследование проводили в диапазоне температур от +25 до -10 °C.

На основании полученных данных строили графики изменения температуры раствора в течение определенного промежутка времени. При охлаждении растворов ПВС отмечали проявление эффекта переохлаждения за счет выделения скрытой теплоты кристаллизации воды [10, 11]. Вследствие этого наблюдается «плато кристаллизации», которое определяет температуру замерзания раствора ПВС [1, 12, 13].

Для формирования криогеля раствор ПВС заливали в цилиндрические ячейки и замораживали при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 20 ч и размораживали при температуре $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Модуль упругости образцов криогелей определяли с помощью лабораторной установки, принцип действия которой основан на реологической модели Максвелла [14-17]. 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).

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

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Температура процесса заморозания и эффективность теплообмена определяют закономерности переохлаждения и скорость кристаллизации криогеля [18]. При охлаждении растворов ПВС от $+25$ до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдали переохлаждение системы в воде и в ДМСО. Для водного раствора ПВС 10% температура переохлаждения системы составила $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до начала заморозания, которое протекает при температуре $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 1а). Температура заморозания ДМСО $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$ [19], тогда как температура переохлаждения раствора ПВС в ДМСО составляет $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура заморозания $-0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Исследование показало, что на температуру заморозания водного раствора ПВС влияет концентрация полимера (рис. 1б). С экономической и технологической точки зрения для практического применения целесообразно криогели готовить из раствора ПВС с концентрацией 5%. Температура заморозания водного раствора ПВС 5% $-0,12\text{ }^{\circ}\text{C}$, поэтому для понижения температуры кристаллизации раствора добавляли глицерин.

Исследовали влияние концентрации глицерина на температуру заморозания водного раствора ПВС (рис. 2). Наблюдали, что при увеличении концентрации глицерина в водном растворе ПВС температура заморозания раствора понижается.

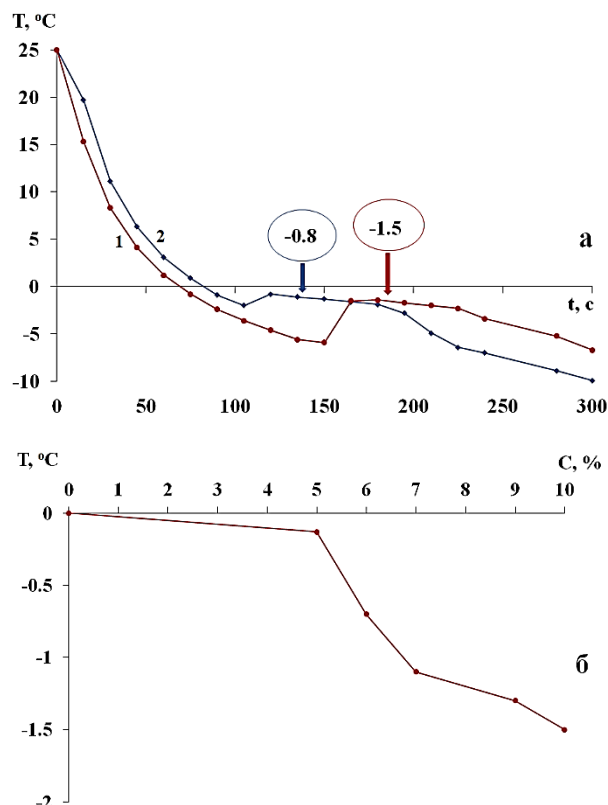


Рис. 1. Изменение температуры растворов ПВС: а – динамика изменения температуры растворов ПВС 10% в растворителях: 1 – вода; 2 – ДМСО; б – Зависимость точки заморозания водного раствора ПВС от концентрации ПВС

Fig. 1. Change in temperature of PVA solutions: а – dynamics of temperature change of 10% PVA solutions in solvents: 1 – water; 2 – DMSO; б – dependence of freezing point of aqueous PVA solution on PVA concentration

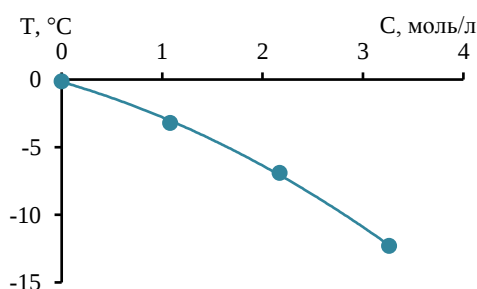


Рис. 2. Зависимость точки заморозания водных растворов ПВС 5% от концентрации глицерина

Fig. 2. Dependence of the freezing point of aqueous solutions of PVA 5% on the concentration of glycerin

Температура плавления глицерина $+17,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Водные растворы глицерина являются низкозастывающими, их температура заморозания снижается до $-46,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ при увеличении концентрации глицерина до 66,7%, соответствующей эвтектике. При концентрации глицерина в воде от 10 до 30% температура заморозания понижается от -1 до $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ [20].

Природа растворителя и введение в водный раствор ПВС глицерина оказывают влияние

не только на процессы замерзания исходных растворов, но и на свойства криогелей (рис. 3).

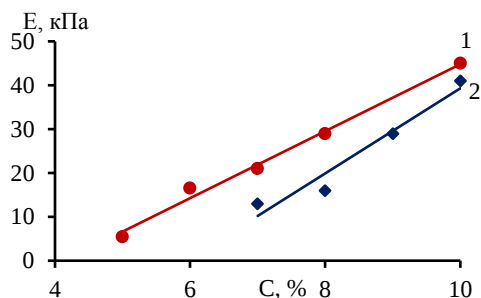


Рис. 3. Влияние концентрации ПВС на модуль упругости криогелей: 1 – ПВС в воде, 2 – ПВС в ДМСО

Fig. 3. Effect of PVA concentration on the elastic modulus of cryogels: 1 – PVA in water, 2 – PVA in DMSO

Криогели ПВС, сформированные в среде ДМСО, обладают меньшим значением модуля упругости по сравнению с криогелями, полученными из водного раствора ПВС. Сродство полимера к ДМСО выше, поэтому эффективность гелеобразования снижается из-за конкуренции взаимодействий полимер-растворитель и полимер-полимер [21, 22]. Из раствора ПВС в ДМСО удалось получить криогели только с концентрацией полимера не ниже 7%.

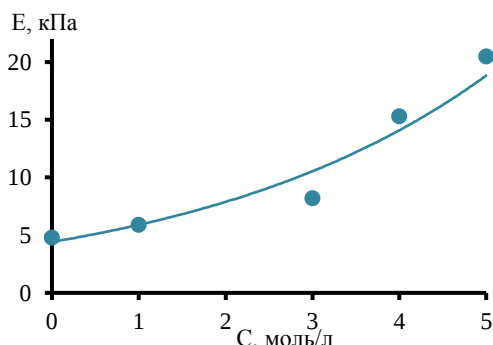


Рис. 4. Зависимость модуля упругости криогелей на основе водного раствора ПВС 5% от концентрации глицерина

Fig. 4. Dependence of the elastic modulus of cryogels based on an aqueous solution of PVA 5% on the glycerol concentration

При введении в раствор ПВС глицерина у криогеля, содержащего глицерин 5 моль/л, модуль упругости увеличивается почти в 4 раза [23].

ЛИТЕРАТУРА

1. Лозинский В.И. Криотропное гелеобразование растворов поливинилового спирта. *Усп. химии*. 1998. Т. 67. № 7. С. 641-655. DOI: 10.1070/RC1998v067n07ABEH000399.
2. Michurov D.A., Makhina T.K., Siracusa V., Bonartsev A.P., Lozinsky V.I., Iordanskii A.L. Poly(vinyl alcohol)-

Температура плавления криогелей, полученных на основе ДМСО и в присутствии глицерина меньше, чем у криогелей, полученных на основе водного раствора ПВС (таблица).

ВЫВОД

Установлено, что ДМСО является хорошим растворителем для ПВС. Криогели, полученные из этого раствора, имеют меньшее значение модуля упругости по сравнению с криогелями, полученными из водного раствора ПВС. Установлено, что введение глицерина в водный раствор ПВС снижает его температуру замерзания. Отмечено, что с увеличением концентрации глицерина упругие свойства криогелей возрастают от 5 кПа до 20 кПа, а температура плавления понижается.

Результаты исследований могут расширить сферу использования криогелей ПВС во многих областях, в том числе в технологиях добычи и транспорта нефти.

Таблица

Температура плавления криогелей ($T_{пл}$)
Table. Melting temperature of cryogels (T_m)

Состав криогеля, % мас.	$T_{пл}$, °C
ПВС 10 Вода	70
ПВС 10 ДМСО	45
ПВС 10 Глицерин 10	55

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН, финансируемого Министерством 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 of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

REFERENCES

1. Lozinsky V.I. Cryotropic gelation of poly(vinyl alcohol). *Chem. Rev.*. 1998. V. 67. N 7. P. 573-586. DOI: 10.1070/RC1998v067n07ABEH000399.
2. 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. V. 14. N 11. P. 2196. DOI: 10.3390/polym14112196
3. **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.
4. **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. V. 153. P. 37-65. DOI: 10.1007/3-540-46414-X_2.
5. **Алтунина Л.К., Кувшинов В.А., Долгих С.Н.** Криогели для тампонажных работ в районах распространения многолетнемерзлых пород. *Гидротехника*. 2010. № 3. С. 56-60.
6. **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.
7. **Алтунина Л.К., Бурков В.П., Бурков П.В., Дудников В.Ю., Осадчая Г.Г., Овсянникова В.С., Фуфаева М.С.** Применение криогелей для решения задач рационального природопользования и эксплуатации объектов магистральных трубопроводов в условиях Арктики. *Наука и технол. трубопровод. трансп. нефти и нефтепродукт.* 2020. Т. 10. № 2. С. 173-185. DOI: 10.28999/2541-9595-2020-10-2-173-185.
8. **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.
9. **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.
10. **Gupta D., Jassal M., Agrawal A.K.** The electrospinning behavior of poly(vinyl alcohol) in DMSO-water binary solvent mixtures. *RSC Adv*. 2016. V. 6. N 105. P.102947-102955. DOI: 10.1039/c6ra15017a.
11. **Young T.H., Chuang W.Y.** Thermodynamic analysis on the cononsolvency of poly (vinyl alcohol) in water-DMSO mixtures through the ternary interaction parameter. *J. Memb. Sci.* 2002. V. 210. N 2. P. 349-359. DOI: 10.1016/S0376-7388(02)00413-1.
12. **Lozinsky V.I.** Cryogels on the basis of natural and synthetic polymers: preparation, properties and applications. *Russ. Chem. Rev.* 2002. V. 71. N 6. P. 489-511. DOI: 10.1070/RC2002v071n06ABEH000720.
13. **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.
14. **Малкин А.Я.** Основы реологии. СПб.: «Профессия». 2018. 336 с.
15. **Malkin A.Ya., Isayev A.I.** Rheology: concepts, methods and applications. Toronto: ChemTec Publ. 2006. 474 p.
16. **Ravve A.** Principles of Polymer Chemistry. New York. Springer. 2016 p.
- based cryogels loaded with the poly(3-hydroxybutyrate) microbeads and the evaluation of such composites as the delivery vehicles for simvastatin. *Polymers*. 2022. V. 14. N 11. P. 2196. DOI: 10.3390/polym14112196
3. **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.
4. **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. V. 153. P. 37-65. DOI: 10.1007/3-540-46414-X_2.
5. **Altunina L.K., Kuvshinov V.A., Dolgikh S.N.** Cryogels for plugging in cold and permafrost regions. *Gidrotekhnika*. 2010. N 3. P. 52-57 (in Russian).
6. **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).
7. **Altunina L.K., Burkov V.P., Burkov P.V., Dudnikov V.Y., Osadchaya G.G., Ovsyannikova V.S., Fufayeva M.S.** Cryogels as a solution to the issues of environmental management and trunk pipeline operation in Arctic. *Nauka Tekhnol. Truboprovod. Transp. Nefti Nefteprod.* 2020. V. 10. N 2. P. 173-185 (in Russian). DOI: 10.28999/2541-9595-2020-10-2-173-185.
8. **Fufayeva 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 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20246708.13t.
9. **Ovsyannikova V.S., Fufayeva 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. 126-134 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.6t.
10. **Gupta D., Jassal M., Agrawal A.K.** The electrospinning behavior of poly(vinyl alcohol) in DMSO-water binary solvent mixtures. *RSC Adv*. 2016. V. 6. N 105. P.102947-102955. DOI: 10.1039/c6ra15017a.
11. **Young T.H., Chuang W.Y.** Thermodynamic analysis on the cononsolvency of poly (vinyl alcohol) in water-DMSO mixtures through the ternary interaction parameter. *J. Memb. Sci.* 2002. V. 210. N 2. P. 349-359. DOI: 10.1016/S0376-7388(02)00413-1.
12. **Lozinsky V.I.** Cryogels on the basis of natural and synthetic polymers: preparation, properties and applications. *Russ. Chem. Rev.* 2002. V. 71. N 6. P. 489-511. DOI: 10.1070/RC2002v071n06ABEH000720.
13. **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.
14. **Malkin A.J.** Fundamentals of rheology. SPb.: «Professiya». 2018. 336 p. (in Russian).
15. **Malkin A.Ya., Isayev A.I.** Rheology: concepts, methods and applications. Toronto: ChemTec Publ. 2006. 474 p.
16. **Ravve A.** Principles of Polymer Chemistry. New York. Springer. 2016 p.
17. **Manzhai V.N., Fufayeva M.S., Kashlach E.S.** Relaxation of Mechanical Stress in Poly(vinyl alcohol) Cryogels of Different Compositions. *Chin. J. Polym. Sci.* 2023. V. 41. P. 442-447. DOI: 10.1007/s10118-022-2889-8.

17. **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. V. 41. P. 442-447. DOI: 10.1007/s10118-022-2889-8.
18. **Касаткин А.Г.** Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия. 1971. 784 с.
19. **Wu S., Alsaid Y., Yao B., Yan Y., Zhao Y., Hua M., Wu D., Zhu X., He X.** Rapid and scalable fabrication of ultra-stretchable, anti-freezing conductive gels by cononsolvency effect. *EcoMat.* 2021. V. 3. P. e12085. DOI: 10.1002/eom2.12085.
20. **Ushakov S.N.** Polyvinyl alcohol and its derivatives. M.: AN SSSR. 1960. V. 2. 868 p. (in Russian).
21. **Jia E., Su L., Liu P., Jiang M., Ye G., Xu J.** Hydrogen bond and crystalline structure of the junction network in polyvinyl alcohol/dimethylsulfoxide gels. *J. Polym. Res.* 2014. V. 21. N 9. P. 548. DOI:10.1007/s10965-014-0548-7.
22. **Kolosova O.Yu., Kurochkin I.N., Kurochkin I.I. Lozinsky V.I.** Cryostructuring of polymeric systems. 48. Influence of organic chaotropes and kosmotropes on the cryotropic gel-formation of aqueous poly (vinyl alcohol) solutions. *Europ. Polym. J.* 2018. V. 102. P. 169. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2018.03.010.
23. **Манжай В.Н., Фуфаева М.С.** Свойства криогелей и их применение в технологиях добычи и транспорта нефти. *Изв. вузов. Нефть и газ.* 2011. N 6. С.104-109.
18. **Kasatkin A.G.** Basic processes and apparatuses of chemical technology. M.: Khimiya. 1971. 784 p. (in Russian).
19. **Wu S., Alsaid Y., Yao B., Yan Y., Zhao Y., Hua M., Wu D., Zhu X., He X.** Rapid and scalable fabrication of ultra-stretchable, anti-freezing conductive gels by cononsolvency effect. *EcoMat.* 2021. V. 3. P. e12085. DOI: 10.1002/eom2.12085.
20. **Ushakov S.N.** Polyvinyl alcohol and its derivatives. M.: AN SSSR. 1960. V. 2. 868 p. (in Russian).
21. **Jia E., Su L., Liu P., Jiang M., Ye G., Xu J.** Hydrogen bond and crystalline structure of the junction network in polyvinyl alcohol/dimethylsulfoxide gels. *J. Polym. Res.* 2014. V. 21. N 9. P. 548. DOI:10.1007/s10965-014-0548-7.
22. **Kolosova O.Yu., Kurochkin I.N., Kurochkin I.I. Lozinsky V.I.** Cryostructuring of polymeric systems. 48. Influence of organic chaotropes and kosmotropes on the cryotropic gel-formation of aqueous poly (vinyl alcohol) solutions. *Europ. Polym. J.* 2018. V. 102. P. 169. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2018.03.010.
23. **Manzhai V.N., Fufaeva M.S.** Properties of cryogels and their application in oil production and transportation technologies. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Neft Gaz.* 2011. N 6. P. 104-109 (in Russian).

Поступила в редакцию 02.12.2024

Принята к опубликованию 24.03.2025

Received 02.12.2024

Accepted 24.03.2025