

Научная статья
УДК 664.11:543.21
DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-99-109

Исследование термически индуцированных структурных превращений *D*-маннита методами молекулярной спектроскопии

Игорь Сергеевич Черепанов¹✉, Дарья Владимировна Новоселова²

^{1,2} Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия

¹cherchem@mail.ru✉, <http://orcid.org/0000-0002-0880-5474>

Аннотация. Применение пищевых добавок различной функциональности является в настоящее время одним из основных направлений развития кондитерской промышленности, при этом в ходе термообработки сырьевой массы вещества испытывают структурные превращения различного характера. Изучение подобных трансформаций позволяет направленно регулировать параметры технологических процессов, в связи с чем в настоящей работе представлены результаты исследований полиморфных превращений *D*-маннита (пищевая добавка *E421*) при контролируемом термостатировании при температуре 180 °С во временном интервале до 3 ч методами УФ-электронной и ИК-колебательной спектроскопии. Анализ колебательных спектров показывает присутствие исходного коммерческого препарата *D*-маннита в форме наиболее термодинамически выгодной β-модификации, тогда как все термостатированные твердые фазы представлены α-модификациями. Последнее надежно подтверждается изучением ИК-спектральных профилей как среднечастотной (900–1800 см⁻¹), так и высокочастотной (2800–3000 см⁻¹) областей. При этом следует отметить отсутствие интенсивных полос в области 1650–1800 см⁻¹, что указывает на подавление процессов окислительной деструкции маннита. Исследование динамики изменения температур плавления твердых фаз и профилей электронных спектров ультрафиолетовой области их 1 %-ных растворов показывает экстремум (174 °С) и выраженный максимум при 260 нм для пробы, термостатированной в течение 1,5 ч. Можно предположить, что в данных экспериментальных условиях возможно параллельное с фазовыми переходами протекание химических процессов, вероятно, дегидратации и циклизации. Полученные результаты предполагается положить в основу разрабатываемой технологии термообработки полиолов для получения комбинированных пищевых добавок на их основе в условиях воздействия повышенных температур.

Ключевые слова: *D*-маннит, термические реакции, структура, полиморфные модификации, молекулярная спектроскопия.

Для цитирования: Черепанов И. С., Новоселова Д. В. Исследование термически индуцированных структурных превращений *D*-маннита методами молекулярной спектроскопии // Известия КГТУ. 2025. № 79. С. 99–109. DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-99-109.

Original article

Study of thermal induced structural transformations of *D*-mannitol using molecular spectroscopy methods

Igor' S. Cherepanov¹✉, Dar'ya V. Novoselova²

^{1,2} Udmurt State university, Izhevsk, Russia

¹cherchem@mail.ru✉, <http://orcid.org/0000-0002-0880-5474>

Abstract. The use of food additives of various functionality is currently one of the main strategies of the confectionery industry, while during the heat treatment of the raw mass, substances undergo structural transformations of various nature. The study of such transformations allows for the targeted regulation of the parameters of technological processes, and therefore, this paper presents the results of studies of polymorphic transformations of *D*-mannitol (food additive *E421*) during thermostating at a temperature of 180 °C in a time interval of up to 3 hours using UV-electronic and IR-vibrational spectroscopy. Analysis of the vibrational spectra shows the presence of the initial commercial *D*-mannitol preparation in the form of the most thermodynamically favorable β -modification, whereas all the thermostatted solid phases are represented by α -modifications. The latter is reliably confirmed by the study of the IR spectral profiles of both the mid-frequency (900–1800 cm⁻¹) and high-frequency (2800–3000 cm⁻¹) regions. At the same time, the absence of intensive bands in the region of 1650–1800 cm⁻¹ should be noted, which indicates the suppression of the processes of oxidative destruction of mannitol. The study of the dynamics of changes in solid phases melting points and profiles of their electronic spectra in the ultraviolet region shows an extremum (174 °C) and a pronounced maximum at 260 nm for a sample that was thermostatted for 1.5 hours. It can be assumed that under these experimental conditions, chemical processes may occur in parallel with phase transitions, possibly involving dehydration and cyclization. These results are expected to serve as the basis for the development of a thermo-processing technology for polyols to produce combined food additives based on them under the conditions of elevated temperatures.

Keywords: *D*-mannitol, thermal induced reaction, structure, polymorphic modifications, molecular spectroscopy.

For citation: Cherepanov I. S., Novoselova D. V. Study of thermal induced structural transformations of *D*-mannitol using molecular spectroscopy methods. *Izvestiya KGTU = KGTU News*. 2025;(79):99–109. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-99-109.

ВВЕДЕНИЕ

Многоатомные спирты – производные углеводов – являются важными фармацевтическими препаратами и пищевыми добавками, характеризуются полиморфизмом, их свойства во многом определяются структурными особенностями. Подобные вещества способны к регулированию экзотермии технологических процессов за счет собственных фазовых переходов [1]. Одним из наиболее перспективных соединений с подобными свойствами, активно исследуемых в последние годы, является *D*-маннит (пищевая добавка-сахарозаменитель *E421* с низким гликемиче-

ским индексом), физические константы которого отвечают реализации температурных режимов промышленных процессов (130–180 °С). Кроме того, находясь в различных модификациях, *D*-маннит проявляет разный характер взаимодействия с другими компонентами, что позволяет регулировать свойства сложных пищевых систем, в частности, гидроколлоидов с целью повышения вязкости и термостойкости шоколадных композиций [2]. Важным аспектом является также установление возможности протекания и характера побочных процессов, что имеет важное значение для технологии производства кондитерских изделий [2, 3].

К настоящему времени показано, что структура *D*-маннита может быть представлена тремя модификациями [3] – α , β и δ , взаимопревращения которых традиционно изучается методами рентгеноструктурного анализа [4]. Тем не менее существует необходимость разработки информативных и более экспрессных методов в промышленном анализе пищевого сырья и фармпрепаратов, в связи с чем в научной литературе встречаются указания на принципиальную возможность применения спектральных методов для изучения фазовых превращений полиолов, в том числе процессов кристаллизации из расплавов и различных растворителей [5]. Высокой информативности при изучении описанных систем следует ожидать от метода ИК-спектроскопии, позволяющего надежно фиксировать структурные изменения, происходящие при термообработке функционализированных органических веществ [6]. Совокупный анализ ИК-спектров и спектров УФ-области, дополненных данными по температурам плавления, даст возможность оценить потенциал технологий производства комбинированных пищевых добавок в условиях воздействия повышенных температур.

Целью работы являлось исследование полиморфных превращений *D*-маннита (пищевой добавки *E421*) в области температур его фазовых переходов методами колебательной и электронной спектроскопии. В соответствии с поставленной целью решались задачи контролируемого термостатирования коммерческого препарата *D*-маннита при температуре 180 °С во временном интервале до 3 ч и последующий анализ молекулярных спектров термостатированных твердых фаз посредством отнесения полос поглощения, характеризующих изменение структуры.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Термостатирование проводили в течение 3 ч в соответствии с методикой [7], отбирая пробы твердой фазы через 0,5; 1,0; 1,5 и 3 ч, с использованием в качестве исходного коммерческого препарата *D*-маннита фирмы «Merck». По окончании термостатирования для каждой пробы регистрировали ИК-спектры и определяли температуры их плавления нагреванием твердых фаз в односторонне-запаянных капиллярах диаметром 1 мм в колбах Кьельдаля. Спектры регистрировали в режиме пропускания в таблетках KBr («Fluka», 1:200) на ИК-Фурье спектрометре ФСМ 2201 («Инфраспек», СПб, Россия), в интервале волновых чисел 4000–400 см⁻¹ со спектральным разрешением по волновому числу 4 см⁻¹ при 60 сканах относительно воздуха, интенсивность полос определялась по методу базовой линии. Дополнительно получали электронные спектры 1 %-ных водных растворов каждой пробы в кварцевых кюветах с длиной оптического пути 1 см, с

разрешением по длине волны 2 нм (спектрофотометр СФ-2000 «Спектр», СПб, Россия). Кратность всех измерений составляла не менее трех экспериментов.

Колебательные спектры исходного и закристаллизованных после нагревания выше температуры плавления в течение заданного времени образцов *D*-маннита представлены на рис. 1. Сопоставление колебательных спектров исходного препарата со спектрами продуктов, полученных при кристаллизации нагретых выше температуры плавления систем, показывает отличия в областях 1150–1500 см⁻¹ и 700–1000 см⁻¹.

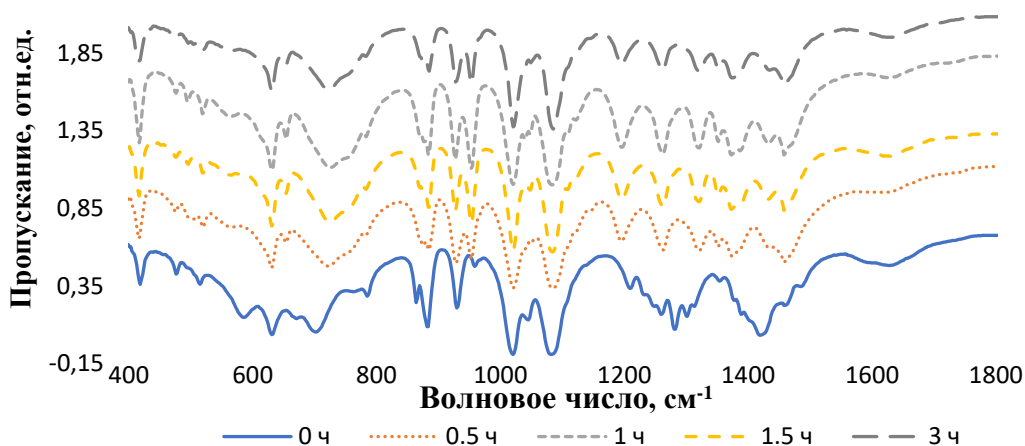


Рис. 1. Колебательные спектры (средне- и низкочастотная области) коммерческого и термообработанных в течение заданного времени образцов *D*-маннита
Fig. 1. Vibrational spectra (mid- and lowfrequency areas) of commercial and thermo-treated in the various duration *D*-mannitol samples

Согласно имеющимся в литературе данным, в первом случае наблюдается усиление полос в области 1260–1280 см⁻¹ (δ_{OH}) и появление интенсивной полосы 1321 см⁻¹ (ν_{CO}), что обсуждалось авторами [5] при исследовании процессов кристаллизации *D*-маннита из расплава, дополнительно отмечается отсутствие в спектре коммерческого препарата полос 1196 (ν_{CCC}) и 1370 см⁻¹ (δ_{CH}), регистрирующихся в спектрах всех термически обработанных образцов [5]. В низкочастотной области изменение спектрального профиля выражается в усилении полосы 960 см⁻¹ (δ^{as}_{CCO}) и нивелировании полосы 864 см⁻¹ (δ^{s}_{CCO}) [8] при переходе от исходного коммерческого образца к термостатированным, а также смещении широкого сигнала скелетных колебаний 702 см⁻¹ (исходный) к значениям 720 см⁻¹ (после термостатирования). При этом в указанных работах не проводится детальный структурный анализ, отвечающий рассмотренным смещениям спектральных полос.

Можно предположить, что описанные изменения связаны с фазовыми переходами между различными модификациями *D*-маннита: α -модификация идентифицируется по сигналам 1194 и 1370 + 1388 см⁻¹, β -модификация – по наличию полосы 1209 см⁻¹ и соотношению интенсивностей полос дублета 930 (с) + 960 (сл) см⁻¹, γ -модификация – по полосе 970 см⁻¹ [9]. Сравнение литературных данных с полученными в ходе эксперимента показывает преобладающую β -модификацию для исходного коммерческого препарата (отсутствие полос 1196 и 1370 см⁻¹, сигнал 1209 см⁻¹ и несимметричный дублет 930 (с)+960 (сл) см⁻¹), тогда как практически независимо от времени термостатирования из расплава кристаллизуется

преимущественно α -модификация (полосы 1196 и 1370 см^{-1}) (рис. 1, таблица). Усиление слабой полосы 960 см^{-1} дублета β -модификации свидетельствует об образовании в системе равновесной смеси модификаций D -маннита, присутствие δ -модификации не фиксируется ни в одном из образцов.

Таблица. Обобщение результатов анализа колебательных спектров
 Table. Summarizing of vibrational spectra analysis data

ν , см^{-1}	Отнесение	0 ч	0.5 ч	1 ч	1,5 ч	3 ч
1370	$\delta_{\text{CH}} (\alpha)$	–	ср.	ср.	ср.	ср.
1209	$\nu_{\text{CO}} (\beta)$	ср.	–	–	–	–
1196	$\nu_{\text{CCC}} (\alpha)$	–	ср.	ср.	ср.	ср.
970	$\delta^{\text{as}}_{\text{CCO}} (\delta)$	–	–	–	–	–
960	$\delta^{\text{as}}_{\text{CCO}} (\beta)$	сл.	ср.	ср.	ср.	ср.
930	$\delta^{\text{s}}_{\text{CCO}} (\beta)$	с.	с.	с.	с.	с.
864	$\delta^{\text{s}}_{\text{CCO}}$	ср.	сл.	сл.	сл.	сл.

с. – сильная ($T = 0.2-0.4$); ср. – средняя ($T = 0.4-0.6$); сл. – слабая ($T = 0.6-0.8$);

Анализ высокочастотной части спектров (рис. 2) также позволяет получить информацию о конформационных превращениях маннита. Область валентных колебаний С-Н-фрагментов согласно [4] характеризуется наличием нескольких полос в интервале 2960–2920 см^{-1} для α -модификаций, что связано с взаимодействием колебаний связей, находящихся в определенных конформационных положениях. Наиболее вероятно в этом случае заслоненное расположение С-О-фрагментов, что повышает энергию такой конформации.

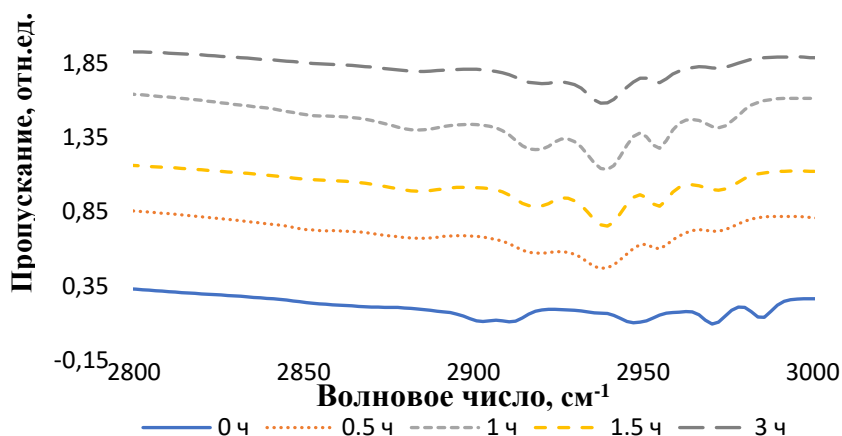


Рис. 2. Колебательные спектры (высокочастотная область) коммерческого и термообработанных в течение заданного времени образцов D -маннита
 Fig. 2. Vibrational spectra (highfrequency area) of commercial and thermostatted in the various duration D -mannitol samples

Таким образом, заслоненная конформация α -модификации характеризуется пространственными затруднениями в расположении заместителей, что приводит к снижению ее стабильности, тогда как β -модификация, в которой соседние

фрагменты находятся в трансoidalном (заторможенном) положении (рис. 3), является наиболее термодинамически выгодной [10]:

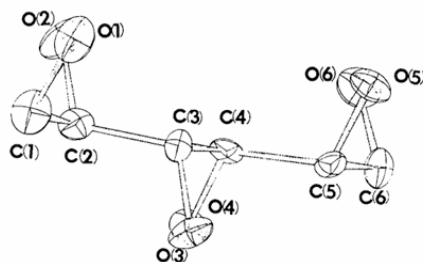


Рис. 3. Пространственное строение молекулы *D*-маннита
Fig. 3. *D*-mannitol molecule geometric structure

Изображение заторможенной конформации β -модификации (рис. 3) дополнительно иллюстрирует взаимное расположение $C_n-O_n(H)$ -фрагментов: пространственное альтернирование их положений $C_1-O_1 + C_2-O_2 - C_3-O_3 + C_4-O_4 - C_5-O_5 + C_6-O_6$ обуславливает наиболее устойчивое состояние молекулярной системы.

Температуры плавления исследуемых твердых фаз изменяются в сторону увеличения от коммерческого образца к термостатированным (рис. 4). Анализ зависимости (рис. 3) показывает увеличение температуры плавления термостатированных образцов в сравнении с коммерческим, что обусловлено особенностями формирования структуры при кристаллизации [11] и также может быть связано с изменением спектральных характеристик.

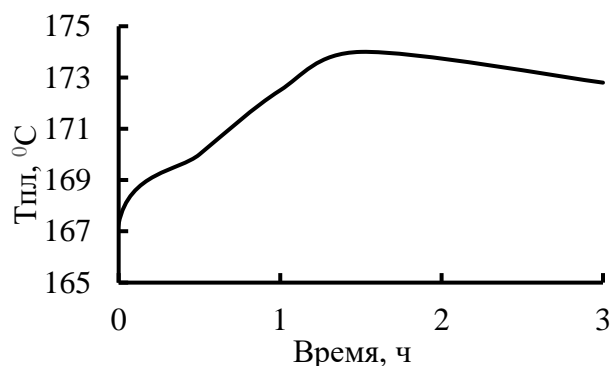


Рис. 4. Динамика изменения температур плавления в зависимости от продолжительности термостатирования
Fig. 4. Melting points changing dynamics depending on thermostating duration

Общие изменения спектральных профилей в области $1400-1500\text{ см}^{-1}$ (рис. 1) сводятся к увеличению числа полос и смещению основного пика 1421 см^{-1} (δ_{CH_2}) к значениям 1462 см^{-1} независимо от продолжительности термостатирования, полоса 1283 см^{-1} (δ_{OH/CH_2OH}) [12] в спектрах термостатированных образцов полностью нивелируется, что связывается с дополнительными взаимодействиями с участием CH_2OH -групп.

Анализ электронных спектров показывает в видимой области отсутствие полос поглощения (рис. 5), при этом в ультрафиолетовой области начиная с $t = 1\text{ ч}$

формируется полоса в интервале 250–260 нм и для $t = 1,5$ ч проявляется четкий пик 260 нм, несколько спадающий по интенсивности к $t = 3$ ч. В то же время детальное изучение интервала 1100–1200 см^{-1} ИК-спектров (рис. 1) позволяет обнаружить плечо при 1100 см^{-1} для образца, термостатированного при $t = 1,5$ ч, и аналогичные менее выраженные сигналы для $t = 1$ и 3 ч. Данный эффект согласно [13] характерен для образования циклических ангидропроизводных полиолов в процессе термостатирования.

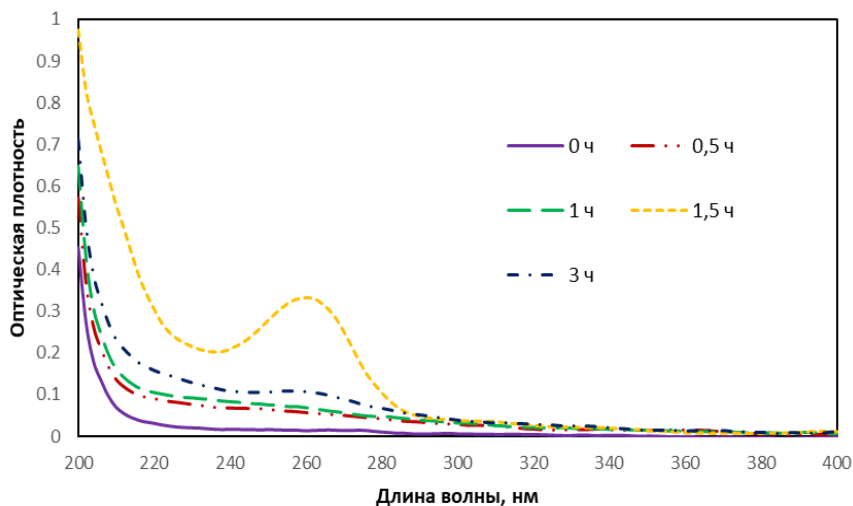


Рис. 5. Электронные спектры 1 %-ных водных растворов коммерческого и термостатированных образцов *D*-маннита
 Fig. 5. UV-Vis spectra of 1% aqueous solutions of commercial and thermostatted in the various duration *D*-mannitol samples

На основании анализа полученных данных можно предположить, что в процессе термостатирования к моменту $t = 1,5$ ч образуются некоторые количества циклических производных маннита [14]:

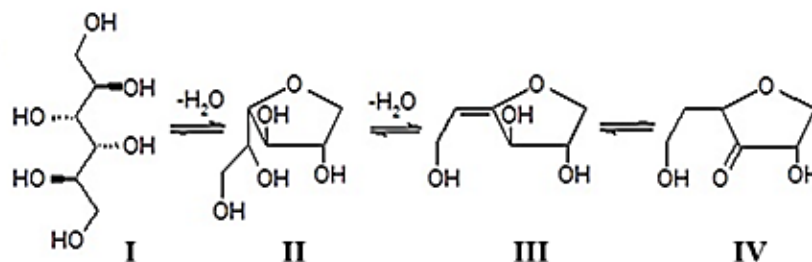


Рис. 6. Схема побочных процессов при термодеструкции *D*-маннита
 Fig. 6. Scheme of *D*-mannitol thermodestruction side reactions

Молекула маннита (I) при нагревании претерпевает дегидратацию (рис. 6), образуя предельный циклический спирт (II), который отщепляет еще одну молекулу воды, что приводит к непредельному спирту (III), находящемуся в таутомерном равновесии с гидроксикетоном (IV), к хромофорной группе последнего можно отнести поглощение при 260 нм.

Полосы в интервале 1650–1800 см^{-1} , относимые к валентным колебаниям $\text{C}=\text{C}+\text{C}=\text{O}$ -фрагментов продуктов окисления [1], в спектрах не регистрируются,

что, вероятно, обусловлено низким содержанием форм с кратными связями, при этом, как показано в [15], сигналы $\nu_{C=O, C=C}$ в принципе характеризуются в подобных системах невысокой интенсивностью.

Можно также предположить, что в твердой фазе присутствует преимущественно $C=C$ -форма, повышающая температуру плавления, при этом полоса валентных колебаний $C=C$ в тризамещенной структуре в ИК-спектрах ослаблена. В растворах вероятно преобладание $C=O$ -формы, что проявляется в интенсивном поглощении 260 нм в УФ-спектрах; дальнейший спад интенсивности данного сигнала обусловлен последующим развитием процессов [16], что, вероятно, еще предстоит изучить. Дальнейшим направлением представленных исследований планируется изучение влияния температурных режимов на структурные превращения полиолов [17], что позволит прогнозировать выбор оптимальных условий термообработки в промышленных технологиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, изучено поведение коммерческого образца *D*-маннита (пищевая добавка *E421*) в условиях воздействия постоянной температуры (180 °C) в течение 3 ч. Показано, что в течение 1 ч термостатирования происходят исключительно фазовые превращения из более устойчивой β -модификации (исходный коммерческий образец) в α -модификацию (термостатированные образцы). Увеличение продолжительности термообработки до 1,5 ч показывает начало протекания побочных процессов, что подтверждается динамикой изменения температур плавления и характера спектральных профилей.

Список источников

1. Bayon, R. Feasibility Study of *D*-mannitol as Phase Change Material for Thermal Storage / R. Bayon, E. Rojas. – DOI: 10.3934/energy.2017.3.404 // AIMS Energy. – 2017. – Vol. 5(3). – P. 404–424.
2. Cassanelli, M. Interaction of Mannitol and Sucrose with Gellan Gum Freezedried Gel Systems / M. Cassanelli, I. Norton, T. Mills. – DOI: 10.1007/s11483-018-9536-5 // Food Biophysics. – 2018. – Vol. 13. – P. 304–315.
3. Characteristics and Analytical Methods of *D*-mannitol: an Update / A. Shiravastava, S. Sharma, M. Kaurav, A. Sharma. – DOI: 10.22159/ijap.2021v13i5.42068 // Int. J. Appl. Pharm. 2021. – Vol. 13 (5). – P. 20–32.
4. Energy/Temperature Diagram and Compression Behavior of the Polymorphs of *D*-mannitol / A. Burger, J.-O. Henck, S. Hetz [et al.]. – DOI: 10.1002/(SICI)1520-6017(200004)89:4<457::AID-JPS3>3.0.CO;2-G // J. Pharm. Sci. – 2000. – Vol. 89 (4). – P. 457–468.
5. Physico-Chemical Characterization of Anhydrous *D*-mannitol / G. Bruni, V. Berbenni, C. Malanese [et al.]. – DOI: 10.1007/s10973-008-9384-5 // J. Therm. Anal. Cal. – 2009. – Vol. 95 (3). – P. 871–876.
6. Cherepanov, I. S. Growth Regulating Activity of *p*-aminobenzoic Acid – *D*-Glucose System Melanoidins / I. S. Cherepanov. – DOI: 10.1063/5.0068900 // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2390. – P. 030009-1–030009-4.

7. Rodrigues-Garcia, M.M. Stability of *D*-mannitol Upon Melting/Freezing Cycles Under Controlled Inert Atmosphere / M. M. Rodrigues-Garcia, R. Bayon, E. Rojas. – DOI: 10.1016/j.egypro.2016.06.207 // Energy Procedia. – 2016. – Vol. 91. – P. 218–225.
8. Simultaneous Quantitative Analysis of Ternary Mixtures of *d*-mannitol Polymorphs by FT-Raman Spectroscopy and Multivariate Calibration Models / D. Braun, S. Maas, N. Zencirci [et al.]. – DOI: 10.1016/j.ijpharm.2009.10.019 // Int. J. Pharm. – 2010. – Vol. 385. – P. 29–36.
9. Kayaly, W. Influence of Mannitol Concentration on the Physicochemical, Mechanical and Pharmaceutical Properties of Lyophilised mannitol / W. Kayaly, U. Khan, S. Maewlud. – DOI: 10.1016/j.ijpharm.2016.05.052 // Int. J. Pharm. – 2016. – Vol. 510. – P. 73–85.
10. Selective Crystallization of *D*-mannitol Polymorphs Using Surfactant Self-assembly / F. Penha, A. Gopalan, J. Meijlink [et al.]. – DOI: 10.1021/acs.cgd.1c00243 // Cryst. Growth Des. – 2021. – Vol. 21. – P. 3928–3935.
11. Influence of Batch Cooling Crystallization on Mannitol Physical Properties and Drug Dispersion from Dry Powder Inhalers / W. Kayaly, H. Larhrib, M. Ticehurst, A. Nokhodchi. – DOI: 10.1021/cg300224w // Cryst. Growth Des. – 2012. – Vol. 12. – P. 3006–3017.
12. Development of a Pure Certified Reference Material of *D*-mannitol / W. Chen, Y. Zhang, H. Chen [et al.]. – DOI: 10.3390/molecules28196794 // Molecules. – 2023. – Vol. 28. – P. 6794.
13. Cycling Stability of *D*-mannitol when Used as Phase Change Material for Thermal Storage Applications / H. Newmann, S. Niedermaier, S. Gschwander, P. Schossig. – DOI: 10.1016/j.tca.2017.12.026 // Thermochim. Acta. – 2018. – Vol. 660. – P. 134–143.
14. The Solvent-free Thermal Dehydration of Hexitols on Zeolites / M. Kurszewska, E. Skorupova, J. Madaj [et al.]. – DOI: 10.1016/s0008-6215(02)00129-5 // Carbohydr. Res. – 2002. – Vol. 337. – P. 1261–1268.
15. Thermal Stability Enhancement of *D*-mannitol for latent Heat Storage Applications / H. Newmann, D. Burger, Y. Taftanazi [et al.]. – DOI: 10.1016/j.solmat.2019.109913 // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2019. – Vol. 200. – P. 109913.
16. Intramolecular Dehydration of Biomass-derived Sugar Alcohols in High-temperature Water / A. Yamaguchi, N. Muramatsu, N. Mimura [et al.]. – DOI: 10.1039/c6cp06831f // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2017. – Vol. 19. – P. 2714–2722.
17. Моргунова, Е. М. Технологические особенности разработки кондитерских изделий с использованием полиолов / Е. М. Моргунова, Т. В. Шугаева, К. Н. Гершончик. – DOI: 10.47612/2073-4794-2021-14-3(53)-19-31 // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2021. – Т. 14, № 3. – С. 19–31.

References

1. Bayon, R. Feasibility Study of *D*-mannitol as Phase Change Material for Thermal Storage / R. Bayon, E. Rojas. – DOI: 10.3934/energy.2017.3.404 // AIMS Energy. – 2017. – Vol. 5(3). – P. 404–424.

2. Cassanelli, M. Interaction of Mannitol and Sucrose with Gellan Gumin Freeze-dried Gel Systems / M. Cassanelli, I. Norton, T. Mills. – DOI: 10.1007/s11483-018-9536-5 // Food Biophysics. – 2018. – Vol. 13. – P. 304–315.
3. Characteristics and Analytical Methods of *D*-mannitol: an Update / A. Shiravastava, S. Sharma, M. Kaurav, A. Sharma. – DOI: 10.22159/ijap.2021v13i5.42068 // Int. J. Appl. Pharm. 2021. – Vol. 13(5). – P. 20–32.
4. Energy/Temperature Diagram and Compression Behavior of the Polymorphs of *D*-mannitol / A. Burger, J.-O. Henck, S. Hetz [et al.]. – DOI:10.1002/(SICI)1520-6017(200004)89:4<457::AID-JPS3>3.0.CO;2-G // J. Pharm. Sci. – 2000. – Vol. 89 (4). – P. 457–468.
5. Physico-Chemical Characterization of Anhydrous *D*-mannitol / G. Bruni, V. Berbenni, C. Malanese [et al.]. – DOI: 10.1007/s10973-008-9384-5 // J. Therm. Anal. Cal. – 2009. – Vol. 95 (3). – P. 871–876.
6. Cherepanov, I. S. Growth Regulating Activity of *p*-aminobenzoic Acid – *D*-Glucose System Melanoidins / I. S. Cherepanov. – DOI: 10.1063/5.0068900 // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2390. – P. 030009-1–030009-4.
7. Rodrigues-Garcia, M.M. Stability of *D*-mannitol Upon Melting/Freezing Cycles Under Controlled Inert Atmosphere / M. M. Rodrigues-Garcia, R. Bayon, E. Rojas. – DOI: 10.1016/j.egypro.2016.06.207 // Energy Procedia. – 2016. – Vol. 91. – P. 218–225.
8. Simultaneous Quantitative Analysis of Ternary Mixtures of *d*-mannitol Polymorphs by FT-Raman Spectroscopy and Multivariate Calibration Models / D. Braun, S. Maas, N. Zencirci [et al.]. – DOI: 10.1016/j.ijpharm.2009.10.019 // Int. J. Pharm. – 2010. – Vol. 385. – P. 29–36.
9. Kayaly, W. Influence of Mannitol Concentration on the Physicochemical, Mechanical and Pharmaceutical Properties of Lyophilised mannitol / W. Kayaly, U. Khan, S. Maewlud. – DOI: 10.1016/j.ijpharm.2016.05.052 // Int. J. Pharm. – 2016. – Vol. 510. – P. 73–85.
10. Selective Crystallization of *D*-mannitol Polymorphs Using Surfactant Self-assembly / F. Penha, A. Gopalan, J. Meijlink [et al.]. – DOI: 10.1021/acs.cgd.1c00243 // Cryst. Growth Des. – 2021. – Vol. 21. – P. 3928–3935.
11. Influence of Batch Cooling Crystallization on Mannitol Physical Properties and Drug Dispersion from Dry Powder Inhalers / W. Kayaly, H. Larhrib, M. Ticehurst, A. Nokhodchi. – DOI: 10.1021/cg300224w // Cryst. Growth Des. – 2012. – Vol. 12. – P. 3006–3017.
12. Development of a Pure Certified Reference Material of *D*-mannitol / W. Chen, Y. Zhang, H. Chen [et al.]. – DOI: 10.3390/molecules28196794 // Molecules. – 2023. – Vol. 28. – P. 6794.
13. Cycling Stability of *D*-mannitol when Used as Phase Change Material for Thermal Storage Applications / H. Newmann, S. Niedermaier, S. Gschwander, P. Schossig. – DOI: 10.1016/j.tca.2017.12.026 // Thermochim. Acta. – 2018. – Vol. 660. – P. 134–143.
14. The Solvent-free Thermal Dehydration of Hexitols on Zeolites / M. Kurszewska, E. Skorupova, J. Madaj [et al.]. – DOI: 10.1016/s0008-6215(02)00129-5 // Carbohydr. Res. – 2002. – Vol. 337. – P. 1261–1268.
15. Thermal Stability Enhancement of *D*-mannitol for latent Heat Storage Applications / H. Newmann, D. Burger, Y. Taftanazi [et al.]. – DOI: 10.1016/

j.solmat.2019.109913 // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2019. –Vol. 200. – 109913.

16. Intramolecular Dehydration of Biomass-derived Sugar Alcohols in High-temperature Water / A. Yamaguchi, N. Muramatsu, N. Mimura [et al.]. – DOI: 10.1039/c6cp06831f // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2017. – Vol. 19. – P. 2714–2722.

17. Morgunova, E. M. Technological Aspects of Development Confectionary Products with Polyols / E. M. Morgunova, T. V. Shugaeva, K. N. Gershonchik. – DOI: 10.47612/2073-4794-2021-14-3(53)-19-31 // Food Industry: Science and Technologies. – 2021. – Vol. 14(3). – P. 19–31.

Информация об авторах

И. С. Черепанов – кандидат химических наук, доцент

Д. В. Новоселова – студент 4 курса направления подготовки «Химия»

Information about the authors

I. S. Cherepanov – Candidate of Sciences (Chemistry), associate professor

D. V. Novoselova – 4th year student in Chemistry

Вклад авторов

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article

The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 05.09.2025; одобрена после рецензирования 15.09.2025; принята к публикации 17.09.2025.

The article was submitted 05.09.2025; approved after reviewing 15.09.2025; accepted for publication 17.09.2025.