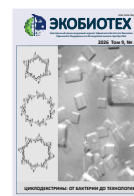




ЭКОБИОТЕХ

ISSN 2618-964X

<http://ecobiotech-journal.ru>

УДК 547.9; 573.6; 678.01



Обзорная статья | REVIEW ARTICLE

ПОЛУЧЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ НАНОКОМПЛЕКСОВ ЦИКЛОДЕКСТРИНОВ

Мелентьев А.И.^{1*}, Курченко В.П.²¹ Уфимский институт биологии Уфимского федерального
исследовательского центра РАН, Уфа, Россия² Белорусский государственный университет,
Минск, Беларусь*E-mail: mlnt@anrb.ru

PREPARATION AND APPLICATION OF CYCLODEXTRIN COMPLEXES WITH BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES

Melentyev A.I.^{1*}, Kurchenko V.P.²¹ Ufa Institute of Biology, Ufa Federal Research Center
of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia² Belarusian State University,
Minsk, Belarus*E-mail: mlnt@anrb.ru

Аннотация

В обзоре приведена информация по истории открытия циклодекстринов, технологии их ферментативного получения из крахмала. Описаны физико-химические свойства циклодекстринов. Рассмотрены механизмы образования наноконплексов α -, β - и γ -циклодекстринов с веществами, содержащими гидрофобные участки в молекулярной структуре и влияние на этот процесс ключевых физико-химических факторов. Дана информация об использовании циклодекстринов в различных областях, приведены примеры применения циклодекстринов в пищевой промышленности и других сферах деятельности, в том числе фармацевтической. Обзор посвящен памяти Н.Г. Усанова, внесшего значительный вклад в развитие исследований циклодекстринов и их применения.

Ключевые слова:

циклодекстрины, биологически активные вещества, терпеноиды, флавоноиды, фенилпропаноиды, стероиды, пептиды

Поступила в редакцию: 19.06.2026

Принято в печать: 12.08.2026

Abstract

This review provides information on the history of the discovery of cyclodextrins and the technology for their enzymatic production from starch. The physicochemical properties of α -, β -, and γ -cyclodextrins, the mechanism of their complexation with hydrophobic substances, and the key factors influencing this process are described. Information on the use of cyclodextrins in various industrial sectors is also provided. Examples of the practical use of cyclodextrins in the food industry are presented for extracting biologically active substances from plant materials, producing inclusion complexes with essential oils, and reducing the bitter taste of milk protein hydrolyzed peptides. This review is dedicated to the memory of N.G. Usanov, who made a significant contribution to the development of cyclodextrin research and its application.

Keywords:

cyclodextrins, clathrates, biologically active substances, terpenoids, flavonoids, phenylpropanoids, steroids, peptides

Received: 19.06.2026

Accepted: 12.08.2026

Цитировать | Cite as

DOI: <http://doi.org/10.31163/2618-964X/2026-23> EDN: <https://www.elibrary.ru/xznrfq>

В сентябре 2008 года в курортном поселке Нарочь (Беларусь) проходила международная научно-практическая конференция «Инновационные биотехнологии в XXI веке» (Нарочанские чтения-5). На ней рассматривались вопросы фундаментальных и прикладных аспектов применения биологически активных моно- и полисахаридов; получение, свойства и применение БАВ; вопросы стандартизации, токсикологии и фармацевтической химии полисахаридов и их производных. На конференции был представлен доклад Мелентьева А.И., Усанова Н.Г. (Рис. 1).

Участники конференции с большим интересом отнеслись к этому сообщению и презентации, подготовленной Н.Г. Усановым. Впоследствии многие участники включили в свои планы исследований разработку способов получения и применения как конплексов циклодекстринов с биологически активными веществами, так и как способов улучшения вкусовых качеств пищевой продукции. Для проведения этих работ в лаборатории прикладных проблем биологии Белорусского государственного университета Н.Г. Усановым любезно были переданы циклодекстрины, произведенные в Уфимском институте биологии РАН.

Рисунок 1. Тема доклада А.И. Мелентьева и Н.Г. Усанова на конференции Нарочанские чтения-5.

Figure 1. Topic of the report by A.I. Melentyev and N.G. Usanov at the Naroch Readings-5 conference.

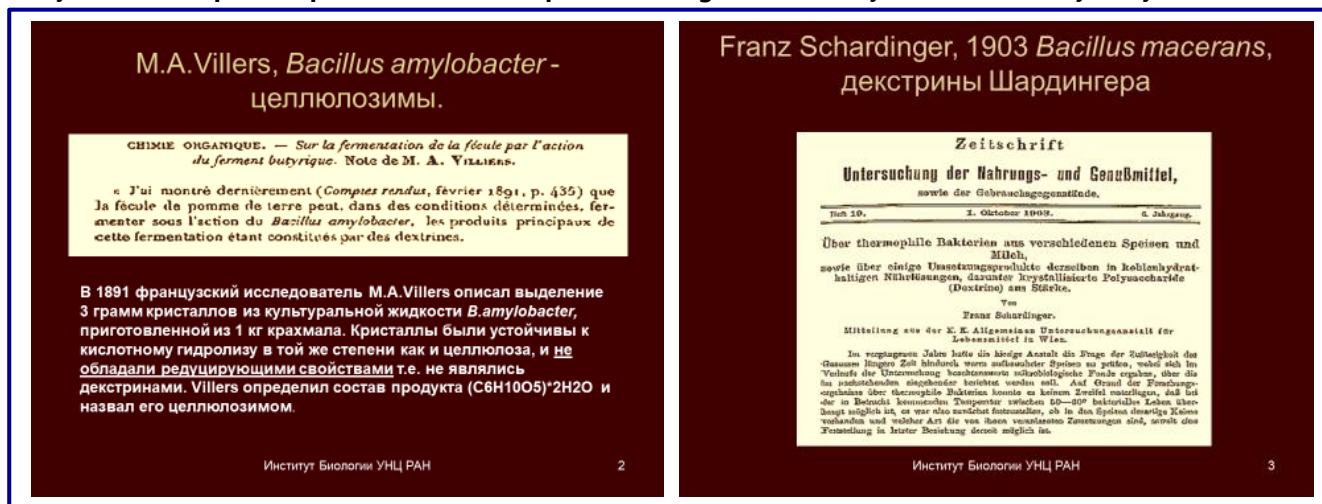


Получение и физико-химические свойства циклодекстринов

В 1891 г. французским исследователем М.А.Виллерс были обнаружены в среде на основе крахмала, в которой выращивали бактерии *Bacillus amylolactis*, необычные кристаллы. Поскольку эти кристаллы не подвергались кислотному гидролизу в той же степени, как и целлюлоза, он назвал данное вещество целлюлозимом. В 1903 году, из продуктов ферментативной трансформации крахмала F. Schardinger выделил и описал два соединения в кристаллической форме, которые назвал α - и β - декстринами (Рис. 2) [Szejtli 2004; Loftsson *et al.* 2005; Crini 2014]. Позднее выяснялось, что отсутствие редуцирующих свойств этих веществ обусловлено циклической структурой этих олигосахаридов.

Рисунок 2. История открытия циклодекстринов

Figure 2. History of the discovery of cyclodextrins

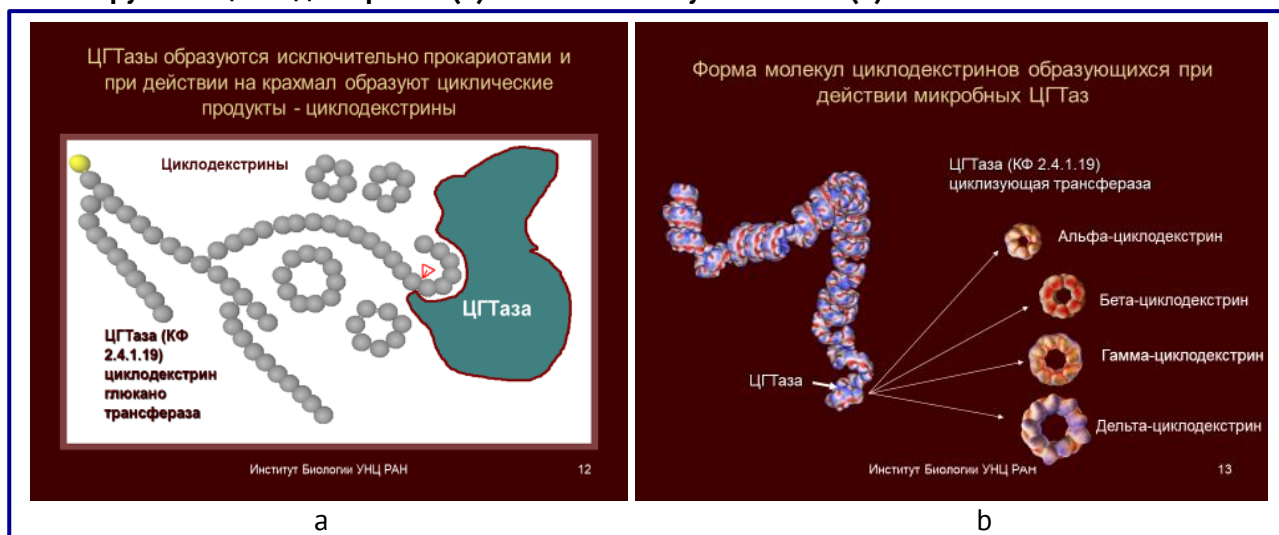


Циклодекстрины, далее ЦД, образуются в результате ферментативной реакции циклизации фрагментов гидролиза крахмала за счет их внутримолекулярного гликолизирования (Рис. 3). Данную реакцию катализирует циклодекстринглюканотрансфераза (КФ 2.4.1.19). Этот уникальный микробный фермент довольно редко встречается и, в основном, лишь у некоторых представителей прокариот рода *Bacillus* Cohn. В 1935 году был обнаружен и изучен γ -циклодекстрин [Larsen 2002; Szejtli 2004].

Циклизация фрагментов гидролиза крахмала возможна лишь в случае наличия не менее шести остатков глюкозы по причине структурно-стерических особенностей строения образуемых молекул [Loftsson, Brewster 1996; Larsen 2002; Del Valle 2004; [Szejtli 2004](#)] (Рис. 3b). По физическим свойствам в сухом состоянии ЦД представляют кристаллический порошок белого цвета. При температурах выше 200°C начинается их термическая деструкция и разрушение образованных с гидрофобными продуктами комплексов [Dodziuk 2006; Miranda *et al.* 2011; Das *et al.* 2013].

Рисунок 3. Ферментативный синтез циклодекстринов из крахмала (а) и типы синтезируемых циклодекстринов (b)

Figure 3. Enzymatic synthesis of cyclodextrins from starch (a) and types of synthesized cyclodextrins (b)



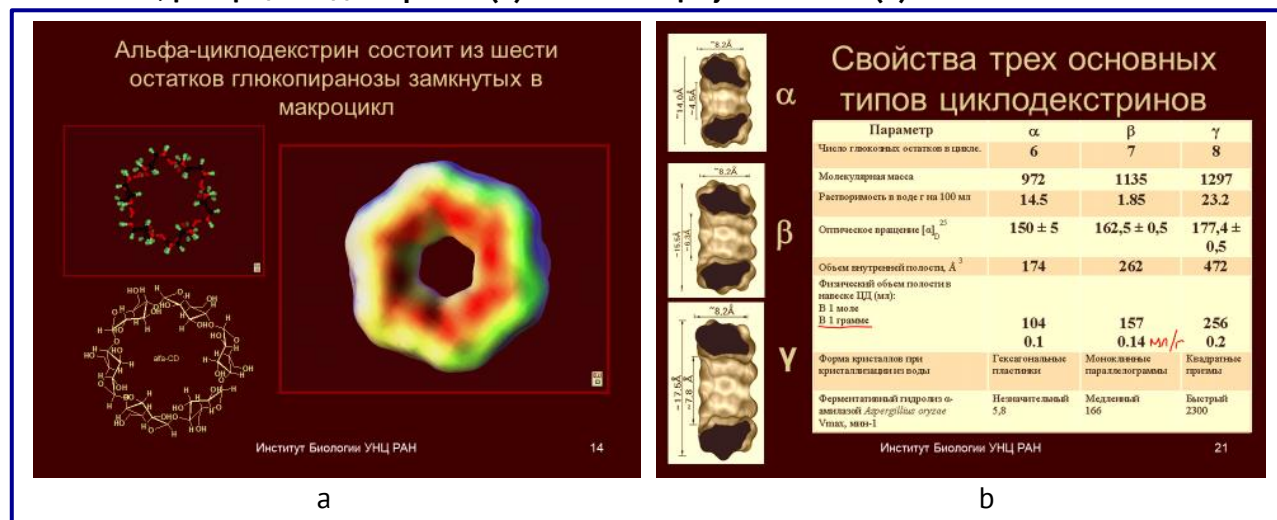
Циклические олигосахариды, полученные в результате биотехнологической конверсии крахмала, различаются по количеству остатков глюкозы в составе молекулы. В 1935 году обнаружили и изучили γ -циклодекстрин [Larsen 2002; [Szejtli 2004](#)]. В течение последних десятилетий были выделены в чистом виде и охарактеризованы δ -, ϵ -, ζ -, η -, θ -ЦД. По количеству остатков глюкозы, в составе структурно упорядоченных молекул циклодекстринов, кроме верхнего предела существует и нижнее ограничение. Молекула циклодекстрина не может быть сформирована менее чем 6 остатками глюкопиранозы за счет стерических затруднений (Рис. 3b) [Loftsson, Brewster 1996; Larsen 2002; Del Valle 2004; [Szejtli 2004](#)].

В сухом состоянии ЦД имеют вид белого кристаллического порошка. У наиболее изученных α -, β - и γ -циклодекстринов известны значения температуры плавления, которые находятся в диапазоне 240–265°C [Loftsson, Brewster 1996]. При температуре свыше 200°C эти соединения теряют стабильность и подвергаются термической деструкции [Dodziuk 2006; Miranda *et al.* 2011; Das *et al.* 2013]. Физическо-химические свойства α -, β - и γ -циклодекстринов представлены на Рис. 4. Растворимость ЦД в воде ограничивается относительно сильными внутримолекулярными водородными связями в кристаллической решетке [[Szejtli 2004](#)]. Самой низкой растворимостью среди всех природных циклодекстринов обладает β -циклодекстрин (Рис. 4b).

На Рис. 4 представлены некоторые физико-химические характеристики трех наиболее изученных циклодекстринов. На Рис. 4а приведена схематическая структура строения циклического декстрина. Особенность его строения заключается в том, что молекула имеет гидрофильную внешнюю поверхность, но внутренняя полость гидрофобна и способна взаимодействовать с липофильными веществами, формируя с ними довольно прочный комплекс включения. Растворимость ЦД в воде (Рис. 4b) ограничивается относительно сильными внутримолекулярными водородными связями, что несколько ограничивает их возможности в реакциях комплексообразования. Тем не менее, пространственная геометрия строения молекул ЦД позволяет образовывать комплексы включения и с нейтральными газообразными веществами, а также, методами механохимии, и с сухими веществами, например, каротиноидами [[Szejtli 2004](#)].

Рисунок 4. Особенности строения α -циклодекстрина (а) и физико-химические свойства α -, β - и γ -циклодекстринов (б)

Figure 4. Structural features of α -cyclodextrin (a) and physical and chemical properties of α -, β - and γ -cyclodextrins (b)



Стабильность этих комплексов основана на нековалентных связях и дает возможность высвобождения включенного соединения в определенных физиологических условиях, что позволяет их использовать для целевой доставки фармацевтических веществ [Frömming, Szejtli 1994]. Согласно результатам исследований, при кристаллизации циклодекстринов из водных растворов, с внешней гидрофобной поверхностью молекулы остаются связанными молекулы воды [Sabadini *et al.* 2006]. В результате встраивания в полость молекулы ЦД гидрофобных веществ растворимость комплекса изменяется [Frömming, Szejtli 1994; Das *et al.* 2013]. Способность ЦД образовывать комплексы с молекулами других веществ, обусловлена соответствием гидрофобной части молекулы включения формам и размерам внутренней полости [Dardeer 2014]. В результате образования комплекса типа «гость-хозяин» возникает энергетически более выгодное и стабильное состояние обоих компонентов [Miranda *et al.* 2011]. Этот процесс требует определенного времени для образования устойчивых нековалентных связей с функциональными группами внутренней полости молекул циклодекстринов [Frömming, Szejtli 1994; Del Valle 2004; Flasiński *et al.* 2010]. Наноструктуры комплексов на основе ЦД могут быть получены различными способами, включая сорастирание, соосаждение, сухого вымешивания, герметичного нагревания, комплексообразования в пастообразном состоянии, распылительной сушки, заморозки, испарения растворителя в зависимости от физико-химических свойств включаемого вещества [Miranda *et al.* 2011; Rajendra Kumar *et al.* 2013; Das *et al.* 2013]. Однако, для образования таких комплексов необходимо наличие хотя бы следовых количеств воды [Del Valle 2004]. Образовавшиеся комплексы с веществами различных органических и неорганических соединений, после их дегидратации, способны храниться длительное время [Marques 2010].

В процессе кристаллизации ЦД из водных растворов, молекулы воды активно включаются в полость тора, а также присутствуют в кристаллической структуре вещества, связываясь с внешней поверхностью молекул. Количество молекул воды ассоциированных с 1 молекулой циклодекстрина составляет: для α -ЦД – 6.2 молекул, для β -ЦД – 9.6 молекул, для γ -ЦД – 14.2 молекул воды [Sabadini *et al.* 2006]. Как видно из Рис. 5, при образовании комплексов включения происходит вытеснение молекул воды из полостей тора ЦД в результате встраивания в нее молекулы вещества «гостя» [Frömming, Szejtli 1994]. Комплексы включения могут обладать большей растворимостью в воде, чем интактные ЦД, при условии, что молекулы вещества «гостя» хорошо растворимы в воде. И, напротив, при образовании комплексов включения с гидрофобными молекулами вещества «гостя», растворимость ЦД в воде может уменьшаться [Das *et al.* 2013].

Получение комплексов циклодекстрина с биологически активными веществами и области их использования

Комплексообразование ЦД с молекулами комплементарных веществ существенно изменяет реакционную способность последних. Так, например, предотвращаются их окисление кислородом или воздействием света, а также деградация микроорганизмами [Dodziuk 2006]. Данное свойство комплексов включения разнообразных веществ с ЦД открывает возможность их широкого применения в пищевом, косметическом производствах и фармацевтике. В настоящее время использование циклодекстринов в пищевом производстве и фармацевтическом применении разрешено в ряде развитых стран, в том числе в России и Беларуси (Решение Совета ЕАК от 21.02.2025 № 18 «О внесении изменений в требования к инструкции по медицинскому применению лекарственного препарата и общей характеристике лекарственного препарата для медицинского применения»).

В Белорусском государственном университете в лаборатории прикладных проблем биологии с энтузиазмом взялись за разработку технологии получения нанокмплесков ЦД с различными биологически активными веществами (далее БАВ) природного происхождения. В первую очередь провели эксперименты с использованием ЦД в качестве экстрагентов. Водные экстракты из трав лекарственных растений - душицы обыкновенной *Origanum vulgare*, Melissa лекарственной *Melissa officinalis*, эхинации пурпурной *Echinacea purpurea*, шалфея *Salvia officinalis* и тимьяна *Thymus* spp. широко используются в качестве лечебно-профилактических средств. При получении экстрактов БАВ из этих лечебных растений важно учитывать не только общий выход экстрактивных веществ, но и способность растворителя направленно извлекать отдельные классы соединений. Анализ составов экстрактов лекарственных трав, полученных водной экстракцией и с использованием раствора β -ЦД 1% масс. показал, что использование ЦД в качестве экстрагента приводит к селективному выделению различных групп метаболитов, которые не содержатся в водном экстракте. В частности, наиболее эффективно проходила экстракция монотерпеновых фенолов и терпеноидов, а также отдельных фенилпропаноидов, липофильных жирных кислот и стерольных компонентов. Полученные результаты подтверждают, что водный раствор β -ЦД является перспективным «зеленым» экстрагентом для направленного извлечения биоактивных соединений из трав лекарственных растений при разработке фитопрепаратов и ингредиентов для функционального питания [Kurchenko *et al.* 2022; Lodygin *et al.* 2024; Головач *и др.* 2025].

Тот факт, что ЦД являются продуктами ферментативно модифицированного крахмала, открывает широкие возможности их применения в пищевой промышленности, в первую очередь для улучшения потребительских качеств продуктов: повышения питательной ценности, вкусовых качеств, реологических свойств, увеличения срока сохранности. ЦД можно использовать в пищевом производстве для сохранения или модификации цвета и органолептических свойств продуктов питания. Эти макроциклические соединения способны образовывать комплексы включения с молекулами жирных кислот, пряно-ароматических соединений, пищевых красителей, витаминов и пр. [Dodziuk 2006; Marques 2010]. Разрешение на использование ЦД в пищевой промышленности в качестве добавок к пищевым продуктам имеется во многих странах, в том числе Франции, Нидерландах, Бельгии и др.

Получение комплексов ЦД с отдельными витаминами

Витамины группы D являются жирорастворимыми и практически не растворимы в воде, что является препятствием для их усвоения. Витамин B₁₂ характеризуется самым сложным строением. Его основой является корриновое кольцо, в которое включен ион кобальта. Выяснилось, что взаимодействие с молекулами ЦД возможно образование клатратов этих витаминов, что значительно увеличивает их биодоступность. В отличие от молекулярных комплексов включения, клатраты формируются в гетерогенных системах (Рис. 5).

Исследования, проведенные в Белорусском государственном университете, позволили разработать метод получения клатратов витаминов D₂, D₃ и B₁₂ с β -ЦД. Методами ИК-спектроскопии было установлено, что клатраты витаминов с β -ЦД формируются при их мольном соотношении 1:4 [Курченко и др. 2021].

Рисунок 5. Примеры образования клатратов ЦД с различными по физико-химическим свойствам веществами

Figure 5. Examples of the formation of CD clathrates with substances of different physico-chemical properties



Получение клатратов ЦД с эфирными маслами

Комплексообразование эфирных масел пряных растений с циклодекстринами позволяет пролонгировать запах, маскирует горький привкус, и сохраняет аромат при длительном хранении. Методом сорастирания эфирных масел гвоздики, кардамона и мускатного ореха с β -ЦД с добавлением небольшого количества воды, были получены клатраты и изучены их характеристики. При соотношении ЦД:эфирное масло 1:1 масс. содержание эфирного масла гвоздики в клатратах составило 27.8%, кардамона 17.1%, мускатного ореха 22.0%. Вероятно, это связано с различиями в составе терпеновых соединений. Полученные комплексы включения β -ЦД с эфирными маслами мускатного ореха, кардамона и гвоздики были исследованы с использованием ГХ-МС. В результате проведенных анализов выяснилось, что основными компонентами таких клатратов, как мускатного ореха, так и кардамона и гвоздики являются спирты и эфиры терпеновых соединений. Данные биологически активные соединения способствуют улучшению аппетита и процессов пищеварения, что создает возможность их использования в кондитерских изделиях и напитках [Тарасова *и др.* 2017a, b, c].

Использование ЦД для получения ранозаживляющих комплексов с куркуминоидами

Известно, что куркуминоиды, обладают рядом полезных свойств, в т.ч. иммунофармакологическими и средств, нормализующих деятельность микрофлоры ЖКТ [Гизингер *и др.* 2018a, b]. Кроме того, благодаря их антиоксидантным и генопротекторным свойствам, они могут быть использованы и в ранозаживляющей терапии. Представляло интерес получить препараты комплексов ЦД с куркуминоидами, чтоб обеспечить их постепенное выделение в область раны. Комплексы (клатраты) получали способом соиспарения и последующей лиофилизации в двух соотношениях куркуминоид:ЦД 1:2 и 1:4 масс. Как следует из результатов испытаний их эффективности на моделях лоскутной раны кожи, к 21 дню эксперимента в контроле, без лечения, сохранялся глубокий раневый дефект с нагноением. Напротив, при применении препарата на основе клатрата куркуминоидов с ЦД, наблюдалось безрубцовое заживление, то есть процесс регенерации шел в сторону восстановления первоначального строения кожи [Капустин *и др.* 2020, 2025; Kapustin *et al.* 2022, 2023].

Использование ЦД для снижения неприятных вкусовых ощущений в молочных продуктах для детского питания

Для питания детей, лишенных грудного вскармливания, используются смеси, содержащие белки сыворотки коровьего молока, которые могут вызывать аллергические реакции у младенцев. Для снижения их аллергенного потенциала они подвергаются ферментативному гидролизу. В результате происходит расщепление их антигенных детерминант, вызывающих синтез иммуноглобулинов Е, которые обуславливают аллергическую реакцию организма ребенка. При ферментации белков молочной сыворотки алкалазой были получены глубокие гидролизаты, содержащие гипоаллергенные пептиды, однако они обладали неприятным горьким вкусом. Это обусловлено наличием в продуктах гидролиза специфических аминокислот, входящих в пептиды, в первую очередь фенилаланина, триптофана, тирозина, изолейцина, пролина и гистидина. Согласно данным ВЭЖХ и масс-спектрометрии, гидролизат белков сыворотки содержал значительную фракцию полипептидов с Mw менее 10 кДа. Согласно данным ВЭЖХ и масс-спектрометрии, гидролизат белков сыворотки содержал значительную фракцию полипептидов с Mw менее 10 кДа. Для экранирования воздействия вышеназванных аминокислот, входящих в состав таких пептидов, был испытан способ получения комплексов или клатратов с такими пептидами. Методами нагревания гидролизатов в смеси с β -ЦД до 50°C, последующего охлаждения и лиофилизации, были получены и охарактеризованы их клатраты. При содержании β -ЦД 5% и пептидов 5% в реакционной смеси, уровень горечи сформированных клатратов достигал минимального значения согласно тестам (ГОСТ ISO 8587, ГОСТ ISO 8588, ГОСТ ISO 10399). Образование комплексов продуктов протеолиза белков сыворотки коровьего молока с β -ЦД подтверждено данными термогравиметрического анализа. Клатраты, сформированные с молекулами β -ЦД алкалазой не несут антигенных детерминант, вызывающих аллергическую реакцию, и могут быть использованы при разработке продуктов детского питания [Halavach *et al.* 2021, 2023; Курченко *и др.* 2023].

Послесловие

Суть настоящего краткого обзора состоит в том, что непосредственное участие в работе научных конференций, общение с их участниками, обмен опытом, знаниями и идеями с ведущими учеными той или иной отрасли науки, способствует возможному дальнейшему развитию фундаментальных и прикладных исследований в том или данном направлении. Николай Глебович Усанов был очень увлечен уникальными свойствами молекул ЦД, но в СССР и в России вообще отсутствовало производство данных продуктов, как и не было штаммов-продуцентов циклодекстринов глюканотрансфераз (ЦГТаз). Ему, вместе со своим учеником Олегом Николаевичем Логиновым, удалось разработать методику изоляции микроорганизмов-продуцентов ЦГТаз [Усанов *и др.* 1990, 1992a], выделить из различных природных источников микроорганизмы, обладающие ЦГТ-азной активностью и создать первую в РФ коллекцию микроорганизмов, пригодных к использованию в биотехнологических процессах [Усанов *и др.* 1992b, 2005, 2008]. В сложные годы начала 90-х годов прошлого столетия по его инициативе была сконструирована опытная установка по производству ЦД от наработки фермента, ферментализации крахмала и получения кристаллов β -ЦД. На этот процесс были разработаны и утверждены соответствующие ТУ, а впервые в России наработанные 300 кг циклодекстринов, были переданы во ВНИИ витаминов (г. Москва). Однако дальнейшая судьба их использования, как и дальнейшая судьба этого ВНИИ неизвестны.

Конфликт интересов | Conflicts of Interest

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

The authors declare no actual or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Капустин М.А., Чубарова А.С., Евдокимов И.А., Лодыгин А.Д., Лодыгина С.В., Цыганков В.Г., Бондарук А.М., Курченко В.П. (2020) Получение нанокомплексов куркуминоидов с циклодекстринами и характеристика их структурно-функциональных свойств. *Современная наука и инновации*. (3): 105–114. <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2020.3.13> EDN: YZHDX
- Капустин М.А., Чубарова А.С., Лодыгин А.Д., Ржепаковский И.В., Дудчик Н.В., Цыганков В.Г., Курченко В.П. (2025) Технология получения нанокомплексов куркуминоидов с циклодекстринами, исследование их свойств и биологической активности. *Экспериментальная биология и биотехнология*. (1): 24–39. EDN: TEKSDQ
- Курченко В.П., Головач Т.Н., Сушинская Н.В., Шрамко М.И., Алиева Л.Р., Лодыгин А.Д., Евдокимов И.А. (2023) Использование полисахаридов для снижения горького вкуса гипоаллергенных пептидов гидролизата белков сыворотки молока. *Молочная промышленность*. (3): 28–31. <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2023-03-28-31> EDN: IUNAF
- Курченко В.П., Симоненко Е.С., Головач Т.Н., Майорова К.И., Цыганков В.Г., Симоненко С.В. (2021) Нанокомплексы β -циклодекстрина с жирорастворимыми витаминами и пептидами гидролизата белков молока для функциональных продуктов питания. *Пищевая промышленность*. (6): 43–48. <https://doi.org/10.52653/PPI.2021.6.6.016> EDN: TRNRAF
- Тарасова Ю.В., Лодыгина С.В., Лодыгин А.Д., Капустин М.А., Ризевский С.В., Буткевич Т.В., Цыганков В.Г., Бондарук А.М., Филонюк В.А., Курченко В.П. (2017a) Получение и свойства клатратов циклодекстрина с эфирным маслом бутонов гвоздики. В: *Молекулярно-генетические и биотехнологические основы получения и применения синтетических и природных биологически активных веществ (Нарочанские чтения - 11): материалы Международной научно-практической конференции. 20–23 сентября 2017 года*. Минск - Ставрополь: 120–125. EDN: ZISGWF
- Тарасова Ю.В., Лодыгина С.В., Лодыгин А.Д., Капустин М.А., Ризевский С.В., Буткевич Т.В., Цыганков В.Г., Бондарук А.М., Филонюк В.А., Курченко В.П. (2017b) Получение и свойства клатратов циклодекстрина с эфирным маслом кардамона. В: *Молекулярно-генетические и биотехнологические основы получения и применения синтетических и природных биологически активных веществ (Нарочанские чтения - 11): материалы Международной научно-практической конференции. 20–23 сентября 2017 года*. Минск - Ставрополь: 126–132. EDN: ZISGWP
- Тарасова Ю.В., Лодыгина С.В., Лодыгин А.Д., Капустин М.А., Ризевский С.В., Буткевич Т.В., Цыганков В.Г., Бондарук А.М., Филонюк В.А., Курченко В.П. (2017c) Получение и свойства клатратов циклодекстрина с эфирным маслом мускатного ореха. В: *Молекулярно-генетические и биотехнологические основы получения и применения синтетических и природных биологически активных веществ (Нарочанские чтения - 11): материалы Международной научно-практической конференции. 20–23 сентября 2017 года*. Минск - Ставрополь: 133–139. EDN: ZISGWZ
- Усанов Н.Г., Гильванова Е.А., Елизарьев П.А., Мелентьев А.И. (2005) Штамм бактерий *Paenibacillus campinasensis* - продуцент циклодекстринглюканотрансферазы. Патент № RU 2312135 С2.
- Усанов Н.Г., Гильванова Е.А., Мелентьев А.И., Курченко В.П. (2008) Свойства циклодекстринглюканотрансферазы *Paenibacillus illinoisensis* IB-1087. *Труды Белорусского государственного университета. Серия: Физиологические, биохимические и молекулярные основы функционирования биосистем*. 3(2): 132–140. EDN: WMDDMR
- Усанов Н.Г., Логинов О.Н., Мелентьев А.И. (1990) Синтез циклодекстринглюканотрансфераз микроорганизмами, утилизирующими циклодекстрины в качестве единственного источника углерода. *Доклады Академии наук СССР*. 310(6): 1489–1492. EDN: VUMFOH
- Усанов Н.Г., Логинов О.Н., Мелентьев А.И. (1992a) Способ выделения бактерий *Bacillus macerans* из почвы. Патент № SU 1703681 А1.

- Усанов Н.Г., Логинов О.Н., Мелентьев А.И. (1992b) Штамм бактерий *Bacillus* sp. - продуцент - циклодекстринтрансферазы. Патент № SU 1738852 A1. EDN: MUXYUT
- Crini G. (2014) Review: a history of cyclodextrins. *Chemical Reviews*. **114**(21): 10940–10975. <https://doi.org/10.1021/cr500081p> EDN: UURIYP
- Dardeer H.M. (2014) Importance of cyclodextrins into inclusion complexes. *International Journal of Advanced Research*. **2**(4): 414–428.
- Das S.K., Rajabalaya R., David S., Gani N., Khanam J., Nanda A. (2013) Cyclodextrins-the molecular container. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. **4**(2): 1694–1720. EDN: YBTNVE
- Del Valle E.M.M. (2004) Cyclodextrins and their uses: a review. *Process Biochemistry*. **39**(9): 1033–1046. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(03\)00258-9](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00258-9)
- Dodziuk H. (ed.) (2006) Cyclodextrins and their complexes: chemistry, analytical methods, applications. Wiley-VCH. Weinheim: 489. <https://doi.org/10.1002/3527608982>
- Flasiński M., Broniatowski M., Majewski J., Dynarowicz-Łątka P. (2010) X-ray grazing incidence diffraction and Langmuir monolayer studies of the interaction of β -cyclodextrin with model lipid membranes. *Journal of Colloid and Interface Science*. **348**(2): 511–521. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.04.086> EDN: NWOVDB
- Frömming K.-Heinz., Szejtli J. (1994) Cyclodextrins in pharmacy. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht: 224. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-8277-3>
- Halavach T.M., Kurchenko V.P., Tarun E.I., Dudchik N. V., Yatskou M.M., Lodygin A.D., Alieva L.R., Evdokimov I.A., Ulrih N.P. (2023) Influence of complexation with β - and γ -cyclodextrin on bioactivity of whey and colostrum peptides. *International Journal of Molecular Sciences*. **24**(18): 13987. <https://doi.org/10.3390/ijms241813987>
- Halavach T.M., Kurchenko V.P., Tsygankow V.G., Bondaruk A.M., Tarun E.I., Asafov V.A. (2021) β -cyclodextrin nanocomplexes with biologically active peptides from hydrolysed bovine whey and colostrum. *Biointerface Research in Applied Chemistry*. **12**(6): 8502–8514. <https://doi.org/10.33263/BRIAC126.85028514> EDN: BYGWWA
- Kapustin M., Chubarova H., Tsygankow V., Lodigina S., Holodova E. (2022) Investigation of the acute, subacute and chronic toxicity of curcuminoids with native and hydroxypropylated β -cyclodextrin complex nanostructures. In: Kurchenko V., Lodygin A., Machado da Costa R.M., et al. (eds.) *Intelligent Biotechnologies of Natural and Synthetic Biologically Active Substances*. Springer International Publishing. Cham: 221–235. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96641-6_26 EDN: KONMIF
- Kapustin M., Piskov S., Rzhepakovsky I., Chubarova H., Antonovich A. (2023) Wound healing activity of curcuminoids: β -cyclodextrin complex nanostructures. *AIP Conference Proceedings*. **2931**(1): 060007. <https://doi.org/10.1063/5.0177712>
- Kurchenko V., Halavach T., Sushynskaya N., Tarun E., Dudchik N., Tsygankow V., Evdokimov I., Lodygin A. (2022) Multicomponent composites of cyclodextrin nanocomplexes with biologically active substances for functional foods. *Food Processing: Techniques and Technology*. **52**(2): 375–389. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2370> EDN: UALJNZ
- Larsen K.L. (2002) Large cyclodextrins. *Journal of inclusion phenomena and macrocyclic chemistry*. **43**(1-2): 1–13. <https://doi.org/10.1023/A:1020494503684> EDN: BCARGD
- Lodygin A., Khalanskaya D., Evdokimov I., Lodygina S., Garibyan L., Kurchenko V., Kapustin M., Chubarova H. (2024) Application of whey for plant biologically active substances extraction. *Journal of Hygienic Engineering and Design*. **46**: 73–79.
- Loftsson T., Brewster M.E. (1996) Pharmaceutical applications of cyclodextrins. 1. Drug solubilization and stabilization. *Journal of Pharmaceutical Sciences*. **85**(10): 1017–1025. <https://doi.org/10.1021/js950534b> EDN: YAGPGL
- Loftsson T., Jarho P., Másson M., Järvinen T. (2005) Cyclodextrins in drug delivery. *Expert Opinion on Drug Delivery*. **2**(2): 335–351. <https://doi.org/10.1517/17425247.2.1.335>

- Marques H.M.C. (2010) A review on cyclodextrin encapsulation of essential oils and volatiles. *Flavour and Fragrance Journal*. **25**(5): 313–326. <https://doi.org/10.1002/ffj.2019>
- Miranda J.C. de, Martins T.E.A., Veiga F., Ferraz H.G. (2011) Cyclodextrins and ternary complexes: technology to improve solubility of poorly soluble drugs. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*. **47**(4): 665–681. <https://doi.org/10.1590/S1984-82502011000400003>
- Rajendra Kumar A., Ashok K., Bonthagarala B., Nama S., Baburao Ch. (2013) The cyclodextrins: A review. *International journal of pharmaceutical research and bio-science*. **2**(2): 291-304. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Sreekanth-Nama-Dr/publication/255763196_The_cyclodextrins_A_review/links/00b49520a577a2445d000000/THe-cyclodextrins-A-review.pdf? (Accessed: 05/12/2026)
- Sabadini E., Cosgrove T., Egídio F. do C. (2006) Solubility of cyclomaltooligosaccharides (cyclodextrins) in H₂O and D₂O: a comparative study. *Carbohydrate Research*. **341**(2): 270–274. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2005.11.004>
- Szejtli J. (2004) Past, present and future of cyclodextrin research. *Pure and Applied Chemistry*. **76**(10): 1825–1845. <https://doi.org/10.1351/pac200476101825>

REFERENCES

- Gizinger O., Simonyan E., Khisamova A. (2018) Investigation of immunofarmacological properties of medicinal medicine with methyonine and extract of kurcum *in vitro*. *Russian Journal of Immunology*. **12**(21)(3): 238–241. <https://doi.org/10.31857/S102872210002388-1> EDN: YYCPFR (in Russian)
- Gizinger O.A., Simonyan E.V., Khisamova A.A. (2019) Method for preparing medicine with methionine and turmeric extract in granular type with intestinal sustainable coating of system action. Patent № RU 2684111 C1. (in Russian)
- Halavach T.M., Kurchenko V.P., Kazimirov A.D., Grigorian R.E., Garibian L.V., Lodygin A.D. (2025) Evaluation of the efficiency of bioactive compound extraction from the herb of purple coneflower (*Echinacea purpurea* (L.) Moench) using cyclodextrin and whey proteins. *News of biomedical sciences*. **25**(3): 240–247. (in Russian)
- Kapustin M.A., Chubarova A.S., Evdokimov I.A., Lodigin A.D., Lodigina S.V., Cigankov V.G., Bondaruk A.M., Kurchenko V.P. (2020) Preparation of nanocomplexes of curcuminoids with cyclodextrins and characteristics of its structural and functional properties. *Sovremennaya nauka i innovatsii*. (3): 105–114. <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2020.3.13> EDN: YZHDX (in Russian)
- Kapustin M.A., Chubarova H.S., Lodygin A.D., Rzhepakovsky I.V., Dudchik N.V., Tsygankov V.G., Kurchenko V.P. (2025) Technology for nanocomplexes of curcuminoids with cyclodextrins production, investigation of their properties and biological activity. *Experimental Biology and Biotechnology*. (1): 24–39. EDN: TEKSDO (in Russian)
- Kurchenko V.P., Golovach T.N., Sushynskaya N.V., Shramko M.I., Alieva L.R., Lodygin A.D., Evdokimov I.A. (2023) The use of polysaccharides to reduce the bitter taste of hypoallergenic peptides of milk whey protein hydrolysate. *Dairy industry*. (3): 28–31. <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2023-03-28-31> EDN: IUHAPF (in Russian)
- Kurchenko V.P., Simonenko E.S., Golovach T.N., Mayorova K.I., Tsygankov V.G., Symonenko S.V. (2021) Nanocomplexes of β -cyclodextrin with liposoluble vitamins and peptides of milk protein hydrolysate for functional food products. *Food processing industry*. (6): 43–48. <https://doi.org/10.52653/PPI.2021.6.6.016> EDN: TRNRAF (in Russian)
- Tarasova Yu.V., Lodygina S.V., Lodygin A.D., Kapustin M.A., Rizevskiy S.V., Butkevich T.V., Tsygankov V.G., Bondaruk A.M., Filonyuk V.A., Kurchenko V.P. (2017a) Preparation and properties of cyclodextrin clathrates with clove bud essential oil [Poluchenie i svoystva klatratov tsiklodekstrina s efirnym maslom butonov gvozdiki]. In: *Molecular-genetic and biotechnological bases of obtaining and application of synthetic and natural biologically active substances (Naroch readings - 11)*:

- Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. 20–23 September 2017. Minsk – Stavropol: 120–125. EDN: ZISGWF* (in Russian)
- Tarasova Yu.V., Lodygina S.V., Lodygin A.D., Kapustin M.A., Rizevskiy S.V., Butkevich T.V., Tsygankov V.G., Bondaruk A.M., Filonyuk V.A., Kurchenko V.P. (2017b) Preparation and properties of cyclodextrin clathrates with cardamom essential oil [Poluchenie i svoystva klatratov tsiklodekstrina s efirnym maslom kardamona]. In: *Molecular-genetic and biotechnological bases of obtaining and application of synthetic and natural biologically active substances (Naroch readings - 11): Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. 20–23 September 2017. Minsk – Stavropol: 126–132. EDN: ZISGWP* (in Russian)
- Tarasova Yu.V., Lodygina S.V., Lodygin A.D., Kapustin M.A., Rizevskiy S.V., Butkevich T.V., Tsygankov V.G., Bondaruk A.M., Filonyuk V.A., Kurchenko V.P. (2017c) Preparation and properties of cyclodextrin clathrates with nutmeg essential oil [Poluchenie i svoystva klatratov tsiklodekstrina s efirnym maslom muskatnogo orekha]. In: *Molecular-genetic and biotechnological bases of obtaining and application of synthetic and natural biologically active substances (Naroch readings - 11): Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. 20–23 September 2017. Minsk – Stavropol: 133–139. EDN: ZISGWZ* (in Russian)
- Usanov N.G., Gil'vanova E.A., Elizar'ev P.A., Melent'ev A.I. (2005) Strain of bacterium *Paenibacillus campinasensis* campinasensis as producer of cyclodextringlucanotransferase. Patent № RU 2312135 C2. (in Russian)
- Usanov N.G., Gilvanova E.A., Melentev A.I., Kurchenko V.P. (2008) Properties of cyclodextringlucanotransferase *Paenibacillus illinoisensis* IB-1087. *Proceedings of the Belarusian State University. Physiological, biochemical and molecular bases of functioning of Biosystems*. **3**(2): 132–140. EDN: WMDDMR (in Russian)
- Usanov N.G., Loginov O.N., Melent'ev A.I. (1990) Synthesis of cyclodextringlucanotransferases by microorganisms utilizing cyclodextrins as sole carbon source. *Doklady Akademii nauk SSSR*. **310**(6): 1489–1492. EDN: VUMFOH (in Russian)
- Usanov N.G., Loginov O.N., Melentev A.I. (1992a) Method of isolating *Bacillus macerans* bacteria from soil. Patent № SU 1703681 A1. (in Russian)
- Usanov N.G., Loginov O.N., Melentiev A.I. (1992b) Bacterial strain *Bacillus* sp. – producer of cyclodextrin transferase. Patent № SU 1738852 A1. EDN: MUXYUT (in Russian)
- Crini G. (2014) Review: a history of cyclodextrins. *Chemical Reviews*. **114**(21): 10940–10975. <https://doi.org/10.1021/cr500081p> EDN: UURIYP
- Dardeer H.M. (2014) Importance of cyclodextrins into inclusion complexes. *International Journal of Advanced Research*. **2**(4): 414–428.
- Das S.K., Rajabalaya R., David S., Gani N., Khanam J., Nanda A. (2013) Cyclodextrins-the molecular container. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. **4**(2): 1694–1720. EDN: YBTNVE
- Del Valle E.M.M. (2004) Cyclodextrins and their uses: a review. *Process Biochemistry*. **39**(9): 1033–1046. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(03\)00258-9](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00258-9)
- Dodziuk H. (ed.) (2006) Cyclodextrins and their complexes: chemistry, analytical methods, applications. Wiley-VCH. Weinheim: 489. <https://doi.org/10.1002/3527608982>
- Flasiński M., Broniatowski M., Majewski J., Dynarowicz-Łątka P. (2010) X-ray grazing incidence diffraction and Langmuir monolayer studies of the interaction of β -cyclodextrin with model lipid membranes. *Journal of Colloid and Interface Science*. **348**(2): 511–521. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.04.086> EDN: NWOVDB
- Frömming K.-Heinz., Szejtli J. (1994) Cyclodextrins in pharmacy. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht: 224. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-8277-3>
- Halavach T.M., Kurchenko V.P., Tarun E.I., Dudchik N. V., Yatskou M.M., Lodygin A.D., Alieva L.R., Evdokimov I.A., Ulrih N.P. (2023) Influence of complexation with β - and γ -cyclodextrin on bioactivity of whey and colostrum peptides. *International Journal of Molecular Sciences*. **24**(18): 13987. <https://doi.org/10.3390/ijms241813987> EDN: CMHNFZ

- Halavach T.M., Kurchenko V.P., Tsygankow V.G., Bondaruk A.M., Tarun E.I., Asafov V.A. (2021) β -cyclodextrin nanocomplexes with biologically active peptides from hydrolysed bovine whey and colostrum. *Biointerface Research in Applied Chemistry*. **12**(6): 8502–8514. <https://doi.org/10.33263/BRIAC126.85028514> EDN: BYGWWA
- Kapustin M., Chubarova H., Tsygankow V., Lodigina S., Holodova E. (2022) Investigation of the acute, subacute and chronic toxicity of curcuminoids with native and hydroxypropylated β -cyclodextrin complex nanostructures. In: Kurchenko V., Lodygin A., Machado da Costa R.M., et al. (eds.) *Intelligent Biotechnologies of Natural and Synthetic Biologically Active Substances*. Springer International Publishing. Cham: 221–235. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96641-6_26 EDN: KONMJF
- Kapustin M., Piskov S., Rzhepakovsky I., Chubarova H., Antonovich A. (2023) Wound healing activity of curcuminoids: β -cyclodextrin complex nanostructures. *AIP Conference Proceedings*. **2931**(1): 060007. <https://doi.org/10.1063/5.0177712>
- Kurchenko V., Halavach T., Sushynskaya N., Tarun E., Dudchik N., Tsygankow V., Evdokimov I., Lodygin A. (2022) Multicomponent composites of cyclodextrin nanocomplexes with biologically active substances for functional foods. *Food Processing: Techniques and Technology*. **52**(2): 375–389. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2370> EDN: UALJNZ
- Larsen K.L. (2002) Large cyclodextrins. *Journal of inclusion phenomena and macrocyclic chemistry*. **43**(1-2): 1–13. <https://doi.org/10.1023/A:1020494503684> EDN: BCARGD
- Lodygin A., Khalanskaya D., Evdokimov I., Lodygina S., Garibyan L., Kurchenko V., Kapustin M., Chubarova H. (2024) Application of whey for plant biologically active substances extraction. *Journal of Hygienic Engineering and Design*. **46**: 73–79.
- Loftsson T., Brewster M.E. (1996) Pharmaceutical applications of cyclodextrins. 1. Drug solubilization and stabilization. *Journal of Pharmaceutical Sciences*. **85**(10): 1017–1025. <https://doi.org/10.1021/js950534b> EDN: YAGPGL
- Loftsson T., Jarho P., Másson M., Järvinen T. (2005) Cyclodextrins in drug delivery. *Expert Opinion on Drug Delivery*. **2**(2): 335–351. <https://doi.org/10.1517/17425247.2.1.335>
- Marques H.M.C. (2010) A review on cyclodextrin encapsulation of essential oils and volatiles. *Flavour and Fragrance Journal*. **25**(5): 313–326. <https://doi.org/10.1002/ffj.2019>
- Miranda J.C. de, Martins T.E.A., Veiga F., Ferraz H.G. (2011) Cyclodextrins and ternary complexes: technology to improve solubility of poorly soluble drugs. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*. **47**(4): 665–681. <https://doi.org/10.1590/S1984-82502011000400003>
- Rajendra Kumar A., Ashok K., Bonthagarala B., Nama S., Baburao Ch. (2013) The cyclodextrins: A review. *International journal of pharmaceutical research and bio-science*. **2**(2): 291-304. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Sreekanth-Nama-Dr/publication/255763196_The_cyclodextrins_A_review/links/00b49520a577a2445d000000/T-he-cyclodextrins-A-review.pdf? (Accessed: 05/12/2026)
- Sabadini E., Cosgrove T., Egídio F. do C. (2006) Solubility of cyclomaltooligosaccharides (cyclodextrins) in H₂O and D₂O: a comparative study. *Carbohydrate Research*. **341**(2): 270–274. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2005.11.004>
- Szejtli J. (2004) Past, present and future of cyclodextrin research. *Pure and Applied Chemistry*. **76**(10): 1825–1845. <https://doi.org/10.1351/pac200476101825>

Цитировать как

Мелентьев А.И., Курченко В.П. (2026). Получение и применение биологически активных нанокомплексов циклодекстринов. *Экобиотех.* **9**(3): 308-320. DOI: <http://doi.org/10.31163/2618-964X/2026-23> EDN: <https://www.elibrary.ru/xznrfq>

Cited as

Melentyev A.I., Kurchenko V.P. (2026). Preparation and application of cyclodextrin complexes with biologically active substances. *Ecobiotech.* **9**(3): 308-320. DOI: <http://doi.org/10.31163/2618-964X/2026-23> EDN: <https://www.elibrary.ru/xznrfq>

Сведения об авторах

Александр Иванович Мелентьев, доктор биологических наук, профессор, Уфимский Федеральный Исследовательский Центр РАН, Уфа, Россия. E-mail: mlnt@anrb.ru. SPIN-код: 1765-5774, WoS Research ID: P-3862-2015, ORCID: 0000-0003-1166-602X, Scopus Author ID: 8579144700.

Владимир Петрович Курченко, к.б.н., доцент, заведующий научно-исследовательской лабораторией прикладных проблем биологии, биологический факультет, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь. E-mail: kurchenko@bsu.by. SPIN-код: 6118-6385, WoS Researcher ID: AAC-6642-2022, ORCID: 0000-0002-4859-2389, Scopus Author ID: 6603704011.

Information About the Authors

Alexander Ivanovich Melentyev, Doctor of Biological Sciences, Professor, Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia. E-mail: mlnt@anrb.ru. SPIN-код: 1765-5774, WoS Research ID: P-3862-2015, ORCID: 0000-0003-1166-602X, Scopus Author ID: 8579144700.

Vladimir Petrovich Kurchenko, PhD, Associate Professor, Head of the Research Laboratory of Applied Biology, Faculty of Biology, Belarusian State University, Minsk, Belarus. E-mail: kurchenko@bsu.by. SPIN-код: 6118-6385, WoS Researcher ID: AAC-6642-2022, ORCID: 0000-0002-4859-2389, Scopus Author ID: 6603704011.