

УДК 612.396.111

Разработка пищевых продуктов на основе циклодекстринов

В. А. Грибкова, Д. П. Митрошина*, А. А. Славянский, Н. В. Николаева,
В. В. Литвяк, В. В. Шилов

**Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет), г. Москва, Россия;*

e-mail: d_mitr96@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8724-3368>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
14.03.2025;

принята
к публикации
06.05.2025

Ключевые слова:

циклодекстрины,
йод,
комплекс
"хозяин – гость",
сахар,
йодированные
сахаросодержащие
продукты

Производство нового поколения продуктов питания с заранее установленными требованиями к их качеству относится к приоритетным направлениям развития современной пищевой индустрии. Следует отметить необходимость более полного использования для этих целей социально значимых продуктов питания, к которым относится белый сахар. Кристаллический белый сахар является не только энергетически важным компонентом питания, но и сырьем для целого ряда отраслей пищевой промышленности. К ним, например, можно отнести кондитерское производство, где годовая потребность в нем составляет около 1 млн т. Придание сахару новых пищевых свойств позволит расширить линейку продуктов на его основе. Актуальным в этом направлении может быть использование йода, поскольку проблема йододефицита в России не потеряла своей актуальности. Тем не менее реализация подобного подхода сопряжена с технологическими особенностями, в том числе при создании йодированных продуктов. Расширение представлений по решению данной проблемы потребовало соответствующего анализа и проведения обоснованных исследований для более глубокого ее понимания. Причем особое внимание было обращено на механизм инкапсулирования йода при создании на его основе новых сахаросодержащих продуктов. Предварительные подходы к этой задаче показали возможность использования с этой целью продуктов крахмального производства – циклодекстринов (ЦД). В статье рассмотрены не только их основные свойства и особенности, но также предпринята попытка разобраться в осуществлении механизма комплексообразования ЦД с йодом. Полученные результаты доказали перспективность использования β-ЦД в пищевой промышленности для расширения линейки новых сахаросодержащих продуктов и, в частности, их значимость в решении проблемы дефицита йода.

Для цитирования

Грибкова В. А. и др. Разработка пищевых продуктов на основе циклодекстринов. Вестник МГТУ. 2025. Т. 28, № 2. С. 151–163. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-151-163>.

Development of food products based on cyclodextrins

Vera A. Gribkova, Daria P. Mitroshina*, Anatoliy A. Slavyanskiy,
Natalia V. Nikolaeva, Vladimir V. Litvyak, Valery V. Shilov

**Razumovsky Moscow State University of Technology and Management
(First Cossack University), Moscow, Russia;*

e-mail: d_mitr96@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8724-3368>

Article info

Received
14.03.2025;

accepted
06.05.2025

Key words:

cyclodextrins,
iodine,
host – guest complex,
sugar,
iodized sugar-containing
products

Abstract

The production of a new generation of food products with pre-established quality requirements is one of the priority areas of development of the modern food industry. It is especially important to note the need for a more complete use of socially significant food products for these purposes, which also includes white sugar. Crystalline white sugar is not only an energy-important component of nutrition, but also a raw material for a number of food industry sectors. These include, for example, confectionery production, where the annual demand for it is about 1 mln tons. Imparting new nutritional properties to sugar will expand the range of products based on it. The use of iodine may be relevant in this area, since the problem of iodine deficiency in Russia still exists and has not lost its relevance. However, the implementation of such an approach is associated with technological features, including the creation of iodized products. Expanding ideas on how to solve this problem has required appropriate analysis and substantiated research for a deeper understanding of it. Moreover, special attention has been paid to the mechanism of iodine encapsulation when creating new sugar-containing products on its basis. Preliminary approaches to this problem have shown the possibility of using starch production products – cyclodextrins (CD) – for this purpose. Therefore, this paper not only examines their main properties and features, but also attempts to understand the mechanism of complex formation of CD with iodine. The results obtained have shown the prospects for using β-CD in the food industry to expand the range of new sugar-containing products and, in particular, their importance in solving the problem of iodine deficiency.

For citation

Gribkova, V. A. et al. 2025. Development of food products based on cyclodextrins. *Vestnik of MSTU*, 28(2), pp. 151–163. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-151-163>.

Введение

Стратегические основы и подходы, сформированные к качеству и безопасности пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 г.¹, как и производство новых видов продуктов питания, тесно увязаны с улучшением здоровья населения и профилактикой их дефицитных состояний. Поэтому йодирование пищевых продуктов представляется весьма актуальной и вполне обоснованной задачей современности. Использование с этой целью социально значимых продуктов питания позволит ускорить ее положительное решение². Известно, что йод является одним из важнейших микроэлементов, необходимых для обеспечения нормальной жизнедеятельности человека. В настоящее время более 60 % населения РФ проживает в регионах с природно-обусловленным дефицитом йода. Особенно остро данная проблема ощущается в горных и предгорных районах Северного Кавказа, Урала, Алтая, Дальнего Востока, а также в Поволжье (*Цыплихин и др., 2025*). Поэтому в этих регионах имеют место риски йододефицитных заболеваний.

Одним из перспективных методов устранения или снижения подобных заболеваний является преднамеренное добавление в пищевые продукты жизненно необходимых нутриентов (*Борисова и др., 2021*). Вместе с этим, несмотря на значительные преимущества такого подхода, процесс обогащения продуктов питания сталкивается с рядом технологических затруднений. Последние, как правило, обусловлены сохранностью добавляемых нутриентов в производстве и процессе хранения готовой продукции. При этом одной из важнейших проблем является обеспечение минимизации контакта используемых добавок с одним из самых сильных природных окислителей – кислородом воздуха. Невзирая на то что кислород жизненно необходим для обеспечения процессов дыхания у растительных и животных организмов, выступающих в качестве источников продовольственного сырья, он также является ключевым фактором, инициирующим окислительные процессы (*Фролова и др., 2024*). Известно также, что последние могут быть причиной деградации вводимых пищевых добавок. При этом наблюдается не только ухудшение органолептических характеристик пищевой продукции, но и снижение ее пищевой ценности.

Следует отметить, что повышение стабильности и сохранности различных биологически активных веществ (БАВ) при их использовании как добавок в продукты питания является довольно новым направлением в пищевой науке. Одним из возможных перспективных способов защиты вводимых нутриентов от агрессивного воздействия окружающей среды является гранулирование (*Славянский и др., 2021*). Ранее было установлено, что этот процесс препятствует диффузии кислорода к вводимым нутриентам, например, в технологии гранулирования сахара. Помимо кислорода воздуха данная технология может защитить используемый нутриент от таких способствующих деградации факторов, как влага, свет и температурное воздействие. При этом молекулы БАВ в процессе гранулирования могут быть дополнительно защищены на молекулярном уровне покрытием на основе сахарных спиртов.

Технология инкапсулирования (способ введения пищевых добавок в обогащаемый ими пищевой продукт), с одной стороны, хорошо известна и уже используется в пищевых технологиях с разными целями, а с другой – наукоемка и позволяет разрабатывать или улучшать инновационные продукты для различных отраслей промышленности. Существующие сегодня методы инкапсулирования довольно широко применяются в медицине и фармацевтической промышленности (*Do Nascimento Cavalcante et al., 2019*). При этом они позволяют решать множество задач, связанных с защитой, высвобождением и сохранением лекарственных веществ. Один из перспективных подходов их решения в фармацевтике основывается на использовании циклодекстринов (ЦД) – циклических олигосахаридов, получаемых из крахмала. Известно, что ЦД способны на молекулярном уровне образовывать комплексы "гость – хозяин" с широким спектром разнообразных продуктов (*Amiri et al., 2017; Crini, 2014*). Так, в фармацевтике они необходимы для улучшения свойств лекарственных препаратов, особенно когда возникают проблемы с их растворимостью, стабилизацией протекания процесса или биодоступностью. ЦД относят к перспективному классу крахмалопродуктов, используемых в производстве лекарств. Вместе с тем потенциальные возможности их обогащения или придания им дополнительных пищевых свойств в продуктах питания еще до конца не исчерпаны.

Материалы и методы

Строение молекул циклодекстринов

Наиболее известные ЦД – это α -, β - и γ -ЦД, которые представляют собой циклические олигосахариды. Они могут содержать в своих структурах соответственно 6, 7 или 8 остатков D-глюкопиранозы³ (*Jambhekar et al., 2016; Mura, 2015*). При этом в основе их соединений связующими являются α -1-4-гликозидные связи. Молекулам циклодекстринов характерна форма усеченного конуса. Стабильность подобной формы молекул

¹ Распоряжение Правительства РФ от 29 июня 2016 г. № 1364-р "Об утверждении Стратегии повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года" // Собрание законодательства РФ. 2016. № 28. Ст. 4758. URL: <https://base.garant.ru/71435844/>.

² Указ Президента РФ от 21.01.2021 № 20 "Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации" // Собрание законодательств РФ. 2020. № 4. Ст. 345. URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/45106>.

³ Славянский А. А., Лукин Н. Д. Инновационные решения в производстве крахмала и крахмалопродуктов. М. : Русайнс, 2023. 420 с. EDN: MDFZKN.

обусловлена наличием водородных связей между ОН-группами. Все ОН-группы располагаются на внешней поверхности молекулы, в результате чего внутренняя полость ЦД является гидрофобной (Zhang *et al.*, 2013). Центральная их полость имеет определенный размер, который зависит от количества молекул глюкозы в цикле (рис. 1). Наличие атомов водорода на внутренней поверхности молекулы ЦД обуславливает ее гидрофобные свойства. В свою очередь, внешняя поверхность, напротив, проявляет гидрофильные свойства, что обусловлено присутствием гидроксильных групп (ОН-групп). Данные группы классифицируются по положению: первичные ОН-группы локализованы у узкого края молекулы ЦД, в то время как вторичные ОН-группы расположены у более широкого края (Das *et al.*, 2020; Raffaini *et al.*, 2019). На рис. 2 приведено схематическое изображение молекулы β -ЦД.

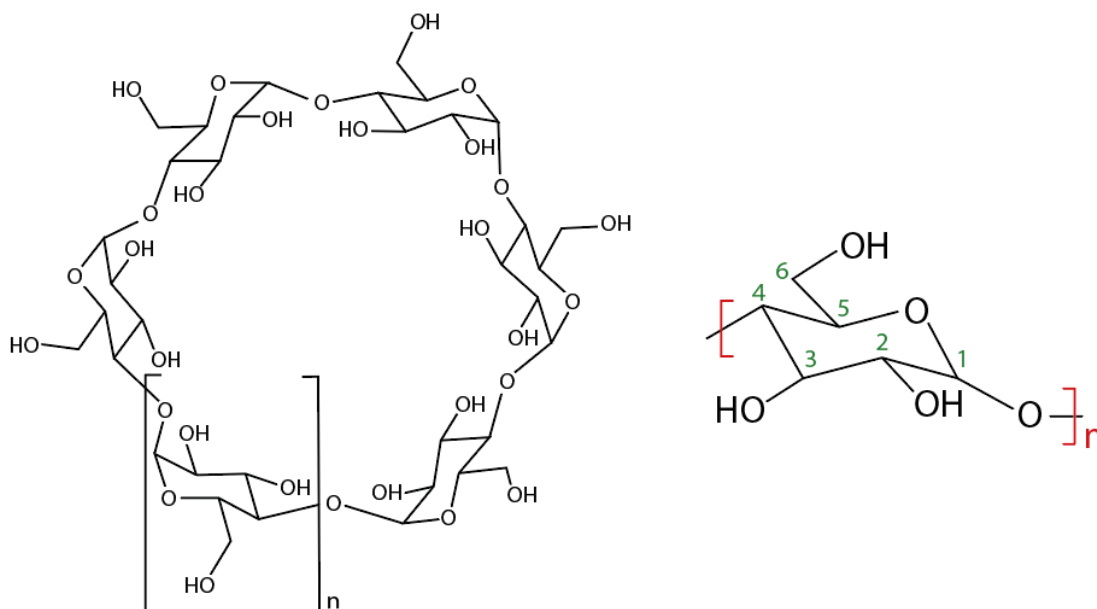


Рис. 1. Химическая структура ЦД ($n = 6 - \alpha$ -ЦД, $n = 7 - \beta$ -ЦД, $n = 8 - \gamma$ -ЦД)
Fig. 1. Chemical structure of cyclodextrin (CD): $n = 6 - \alpha$ -CD, $n = 7 - \beta$ -CD, $n = 8 - \gamma$ -CD

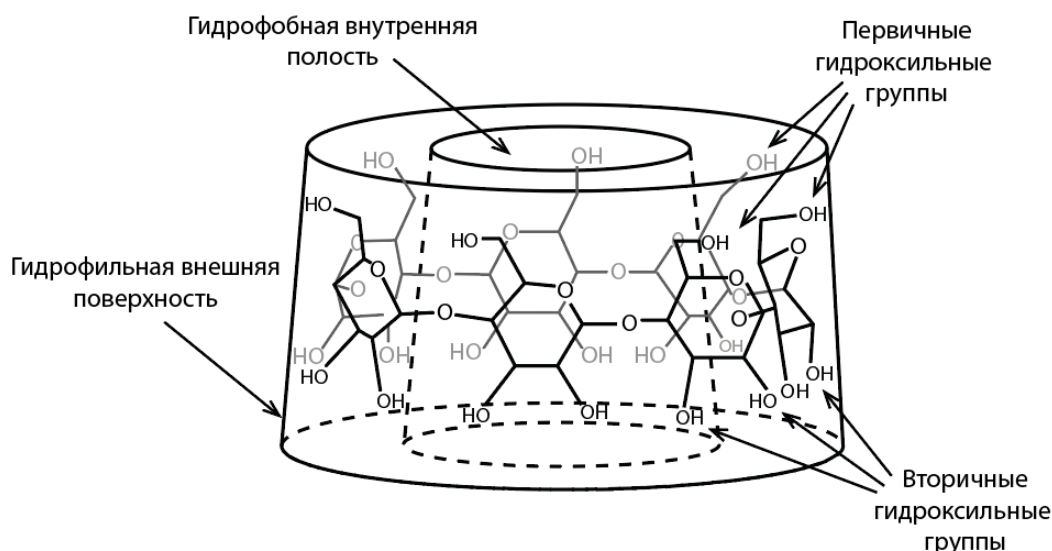


Рис. 2. Схематическое расположение первичных и вторичных гидроксильных групп в молекуле β -ЦД
Fig. 2. Schematic arrangement of primary and secondary hydroxyl groups in the β -CD molecule

ЦД способны формировать молекулярные комплексные включения, известные как клатраты, с разнообразными веществами по принципу "гость – хозяин". В клатратах молекулы ЦД благодаря своей внутренней гидрофобной полости выступают в роли "хозяев", а молекулы включаемых субстанций играют роль "гостя". В результате подобного взаимодействия возможно достигнуть существенного улучшения физических и биологических свойств гостевых молекул (Kavetsou *et al.*, 2021). Такая ситуация объясняет повышенное внимание к ЦД в современных исследованиях.

Комплексообразование ЦД по схеме "хозяин – гость"

Способность ЦД образовывать и формировать на молекулярном уровне комплексные включения с разнообразными веществами разного назначения считается основой, определяющей их значимость и практическое применение (Mashaqbeh et al., 2021; Minns et al., 2002). Так, например, благодаря их способности к комплексообразованию ЦД могут на молекулярном уровне образовывать особые включения по типу "хозяин – гость". При этом последние могут быть разного химического состава и структуры: твердыми, жидкими и газообразными химическими соединениями. В этих соединениях полость молекулы "хозяина" ЦД служит местом хранения молекулы "гостя".

Прочность и стабильность образуемого комплексного соединения зависят от соответствия размеров молекул "хозяина" и "гостя", а также от специфических локальных взаимодействий между их атомами, молекулами, а также соответствующими химическими и поверхностными связями.

Стереохимическое строение комплексов "хозяин – гость" может быть описано двумя возможными вариантами (Natural..., 2016):

1) комбинация 1 : 1 молекула-хозяин (ЦД)/молекула-гость (МХ/МГ ($K_{1:1}$)), следующее уравнение дает стехиометрию комплекса включения: $\text{MX} + \text{MG} \rightarrow \text{MX/MG} (K_{1:1})$, при $\text{MX} = \text{ЦД}$ уравнение примет вид $\text{ЦД} + \text{МГ} \rightarrow \text{ЦД/МГ} (K_{1:1})$;

2) комбинация 2 : 1 молекула-хозяин (ЦД)/молекула-гость ($\text{MX}_2/\text{МГ} (K_{2:1})$), следующее уравнение дает стехиометрию комплекса включения: $2\text{MX} + \text{MG} \rightarrow \text{MX}_2/\text{МГ} (K_{2:1})$, при $\text{MX} = \text{ЦД}$ уравнение примет вид $2\text{ЦД} + \text{МГ} \rightarrow \text{ЦД}_2/\text{МГ} (K_{2:1})$.

Равновесное связывание гостевой молекулы и ЦД с образованием комплекса в комбинации 1 : 1 и с комбинацией 2 : 1 показаны на рис. 3 и 4.

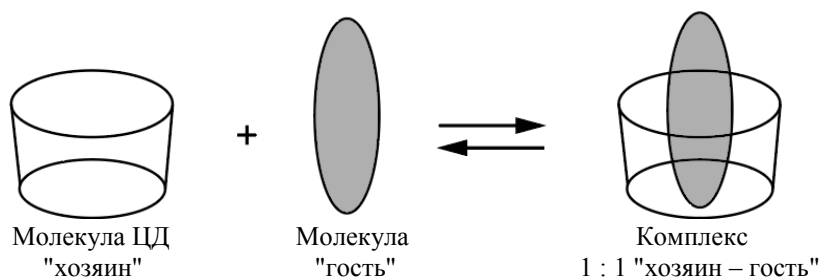


Рис. 3. Схема образование комплекса включения "хозяин – гость" при равновесном связывании гостевой молекулы и ЦД с образованием комплекса 1 : 1

Fig. 3. Scheme of formation of the host – guest inclusion complex upon equilibrium binding of the guest molecule and CD with formation of a 1 : 1 complex

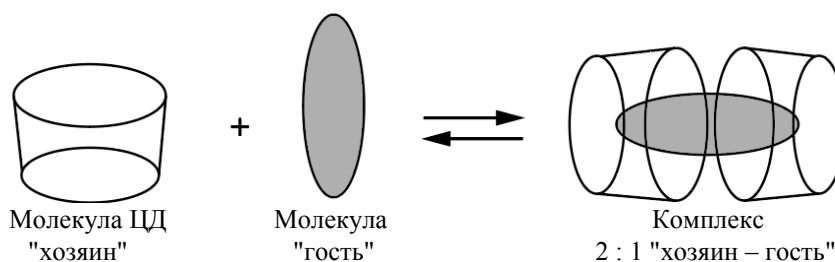


Рис. 4. Схема образование комплекса включения "хозяин – гость" с равновесным связыванием гостевой молекулы и ЦД с образованием комплекса 2 : 1

Fig. 4. Scheme of formation of the host – guest inclusion complex with equilibrium binding of the guest molecule and CD to form a 2 : 1 complex

Комбинация ЦД/МГ (1 : 1) является наиболее распространенным типом комплекса ЦД (Leclercq, 2016). Она возникает, когда размер вводимого "гостя" соответствует размеру полости ЦД и одна молекула "гостя" оптимально заполняет полость. Предположительно, комплексы включения типа 2 : 1 образуются путем взаимодействия второй молекулы ЦД с ранее сформированным комплексом 1 : 1 (Li et al., 2022).

Размеры полости ЦД и гостевой молекулы считаются определяющими и оказывают существенное влияние на комплексообразование (Mohammed-Saeid et al., 2019; Maniam et al., 2022). Однако механизм протекания этого процесса еще до конца не уточнен и исследования в этом направлении продолжаются. Так, например, до настоящего времени остается открытым вопрос о природе сил, удерживающих вводимые в ЦД молекулы, как и характер образующихся при этом связей. Известно также, что важную роль в образовании соответствующих связей могут играть Ван-дер-Ваальсовы силы и межмолекулярные связи,

формирующиеся за счет гидрофобной внутренней полости циклодекстринов (Saokham *et al.*, 2018; Venuti *et al.*, 2019). В этой полости может быть сформирована особая среда и в нее могут проникать наиболее активные гидрофобные гостевые молекулы. При этом происходит вытеснение молекул воды из внутренней полости ЦД. Схема механизма подобного процесса с образованием комплексного соединения "гость – хозяин" показана на рис. 5.

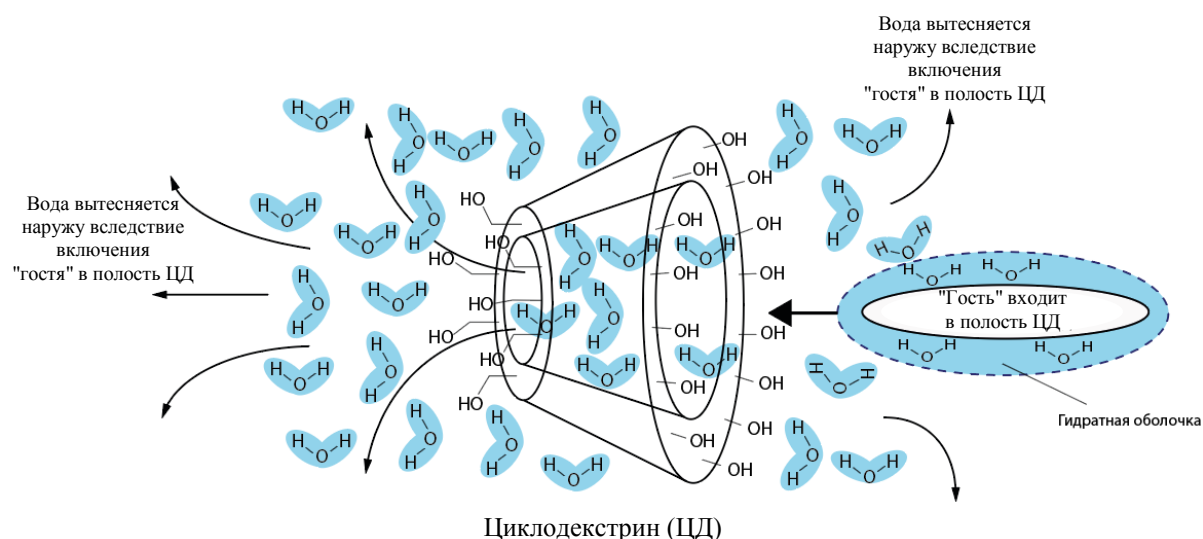


Рис. 5. Схема механизма образования комплекса "хозяин – гость"
Fig. 5. Scheme of the mechanism of formation of the host – guest complex

Движущей силой процесса образования комплексных соединений является способность молекулы "гостя" внедряться внутрь гидрофобной полости ЦД (Zhu *et al.*, 2015). Предполагается, что в этот период между гостевой молекулой и внутренней поверхностью полости ЦД могут иметь место некоторые силы (например, Ван-дер-Ваальсовы). При этом они стабилизируют молекулярное состояние образуемого комплекса. Характерной особенностью гидрофобных молекул "гостя" является отсутствие у них способности образовывать водородные связи с молекулами воды (Adamiak *et al.*, 2019). Поэтому количество водородных связей между молекулами воды с формированием более упорядоченной структуры вокруг поверхности гостевой молекулы возрастает. При этом как бы формируется гидратная оболочка вокруг "гостя". Следует также отметить, что внутренняя полость ЦД не является абсолютно свободной, так как внутри нее находятся молекулы воды. Последние связаны с выстилающими полость ЦД атомами кислорода и водорода посредством слабых водородных связей и диполь-дипольных взаимодействий (Jia *et al.*, 2022). К тому же на внешней поверхности ЦД присутствуют гидроксильные группы, которые конкурируют за взаимодействие с молекулами воды из окружающего ЦД раствора. Все это ограничивает подвижность молекул воды внутри полости ЦД и влияет на их ориентацию в его полости. Когда гидрофобная молекула "гостя" инкапсулируется в гидрофобную полость ЦД, его гидратная оболочка разрушается. Молекулы воды, которые ранее были ограничены в своей подвижности и строго расположены в гидратной оболочке, в этой ситуации получают возможность свободно двигаться и взаимодействовать с другими молекулами воды окружающего их раствора. При инкапсуляции во внутреннюю полость ЦД молекулы воды вытесняются из нее. При этом следует отметить то, что при этом наблюдается разрушение связей между молекулами воды и атомами, выстилающими полость ЦД. Высвобождение молекул воды из полости ЦД в свою очередь приводит к повышению энтропии сформированной системы (Ali *et al.*, 2021; Mohammed-Saeid *et al.*, 2019). Возрастает ее неупорядоченность и подвижность молекул. Увеличение энтропии при высвобождении молекул воды вокруг гидрофобной молекулы "гостя" и внутри полости ЦД стабилизирует сформированный комплекс. Причем его образование становится термодинамически выгодным.

Методы получения комплексов с ЦД

Существует множество различных подходов к комплексообразованию. Их разнообразие обусловлено широким спектром молекул-гостей и соединений, компонентов рецептур, производственных процессов и конечных продуктов (Janicka *et al.*, 2022). В настоящее время известен ряд методов получения комплексов ЦД с "гостями": сорастирание, соосаждение, сухое вымешивание, герметичное нагревание, комплексообразование в пастообразном состоянии, нейтрализация, распылительная сушка, замораживание, испарение растворителя (Sbârcea *et al.*, 2019).

Производные ЦД с измененными свойствами

Целью модификации природных ЦД является получение на их основе производных ЦД, т. е. превращение в аморфные или кристаллические формы с различными свойствами (Topuz *et al.*, 2022). После подобных превращений ЦД должны обладать высокой растворимостью в воде. Это необходимо, чтобы обеспечить микробиологическую и физико-химическую стабильность в течение определенного периода времени. Поскольку все ЦД (α -, β - и γ -) имеют взаимозаменяемые гидроксильные группы, то существует много вариантов их потенциальных производных.

Выделяют следующие типы модифицированных ЦД:

1. Метилированные циклодекстрины (МЦД) представляют собой модифицированные формы циклодекстринов, в которых гидроксильные группы ($-\text{OH}$) на внешней стороне молекулы заменены на метильные ($-\text{CH}_3$), что приводит к изменению их свойств (Christoforides *et al.*, 2022). Например, растворимость в воде метилированного β -ЦД выше, чем у нативного β -ЦД. Это объясняется тем, что немодифицированные ЦД имеют множество гидроксильных групп на внешней стороне молекулы. Последние способны образовывать межмолекулярные водородные связи с другими молекулами ЦД. Подобное взаимодействие является причиной формирования относительно крупных труднорастворимых агрегатов ЦД. Метилирование ЦД препятствует образованию межмолекулярных водородных связей между молекулами ЦД (Aiassa *et al.*, 2023). Это объясняется тем, что метильные группы не способны образовывать водородные связи. Таким образом, метилирование циклодекстринов повышает их растворимость, главным образом за счет разрушения межмолекулярных водородных связей между молекулами ЦД. Высокая растворимость МЦД расширяет сферы их применения, особенно в фармацевтике и пищевой промышленности, где необходимо работать с водными растворами.

2. Гидроксильрованные производные ЦД – это ЦД, у которых гидроксильные группы ($-\text{OH}$) на внешней поверхности молекулы модифицированы путем добавления гидроксиалкильных групп. Наиболее распространенными являются гидроксипропил-циклодекстрины (ГП-ЦД) и гидроксиэтил-циклодекстрины (ГЭ-ЦД) (Kato *et al.*, 2009). Реакция гидроксирования заключается в присоединении гидроксиалкильных групп к гидроксильным группам на внешней поверхности молекулы ЦД. Это обычно достигается путем взаимодействия ЦД с пропиленоксидом для ГП-ЦД и этиленоксидом для ГЭ-ЦД, соответственно. Как и МЦД, данные модифицированные формы ЦД обладают значительно более высокой растворимостью в воде по сравнению с нативными ЦД. Кроме того, гидроксирование может оказывать влияние на способность ЦД к комплексообразованию. Так, гидроксиалкильные группы, присоединенные к гидроксильным группам на внешней стороне ЦД, являются более объемными, чем простые гидроксильные группы (Matencio *et al.*, 2016). Несмотря на то что эти группы не находятся внутри полости ЦД, они создают некоторое пространственное препятствие на входе в полость ЦД, которое может в некоторой степени изменить размер полости ЦД. В результате этих изменений гидроксильрованные ЦД приобретают селективность в процессе комплексообразования, т. е. если гостевые молекулы не совпадают с размерами полости, то эффективность их включения существенно ниже.

3. Сульфолкилированные производные ЦД (САЦД) – под ними понимают модифицированные ЦД, в которых к молекуле ЦД присоединены сульфолкильные группы. Эти группы представляют собой алкильные цепи, на конце которых находится сульфонатная группа ($-\text{SO}_3^-$), имеющая отрицательный заряд (Qu *et al.*, 2002). Отличительной особенностью САЦД является их пониженная способность к образованию комплексов с молекулами-гостями. Это может быть объяснено тем, что сульфонатные группы отрицательно заряжены, и если молекула-гость также имеет отрицательный заряд (или несет частично отрицательный заряд в определенной части своей структуры), то между ними может возникать электростатическое отталкивание, что в свою очередь может затруднять или препятствовать образованию комплекса. Помимо этого, в случае если "гость" имеет положительный заряд, то сульфонатные группы САЦД могут вступать в ионные взаимодействия. Однако эти взаимодействия могут связывать молекулу-гостя не внутри полости, а, скорее, на поверхности САЦД, что также снижает эффективность образования комплексов.

4. Серосодержащие производные ЦД (ССЦД) – это производные, в которых в молекулу ЦД введены атомы серы. Они могут включать различные серосодержащие функциональные группы, такие как тиолы ($-\text{SH}$), сульфиды ($-\text{S}-$), сульфоксиды ($-\text{SO}-$), сульфоны ($-\text{SO}_2-$), сульфаты ($-\text{SO}_3-$) и тиоэфиры ($-\text{C}-\text{S}-\text{C}-$) (Mohandoss *et al.*, 2019). Благодаря введению атомов серы в структуру ЦД данные модификации могут образовывать координационные связи с ионами металлов, что позволяет использовать серосодержащие ЦД в качестве хелатирующих агентов. Это связано с тем, что эти функциональные группы способны отдавать свои неподеленные электронные пары и образовывать координационные (донорно-акцепторные) связи с ионами металлов. Эта особенность позволяет использовать ССЦД, например, для удаления тяжелых металлов и других загрязнений из окружающей среды (Mura, 2014).

Факторы, влияющие на комплексообразование ЦД с гостевыми молекулами

На образование комплекса ЦД/гостевая молекула влияет ряд факторов:

1. Тип ЦД и размер его полости. Различные типы ЦД имеют разное количество глюкозных звеньев в кольцевой структуре, что напрямую определяет размер внутренней гидрофобной полости. "Гость" должен быть расположен внутри ЦД, следовательно, размер его полости должен быть соответствующим. ЦД имеют различный диаметр центральной полости, поэтому они способны образовывать комплексы с молекулами соответствующего размера (*Adamiak et al.*, 2019).

2. Влияние методов приготовления. Известны различные методы образования комплексных соединений с гостевыми молекулами, причем от выбранного способа зависит протекание процесса комплексообразования (*Araújo et al.*, 2021).

3. Связь между pH и состоянием ионизации. Если гостевая молекула при определенном pH становится более гидрофильной из-за ионизации (т. е. в результате процесса образования ионов из нейтральных атомов или молекул), ее сродство к гидрофобной полости ЦД снижается, что приводит к уменьшению стабильности комплекса. Оптимальное pH для комплексообразования часто соответствует pH, при котором гостевая молекула находится в наименее ионизированной форме (т. е. наиболее гидрофобна) (*Da Rocha Neto et al.*, 2018).

4. Температура. На процесс образования комплексов между ЦД и молекулами-гостями заметное влияние оказывает температура. Так, стабильность комплексного включения может уменьшаться с повышением температуры (*Xiao et al.*, 2019).

5. Степень замещения. Тип, количество и расположение заместителя в исходной молекуле ЦД может оказывать заметное влияние на физико-химические свойства молекулы, такие как ее комплексообразующая способность. Например, различия в физико-химических свойствах образцов ГП-ЦД, имеющих одинаковый уровень замещения в разных условиях, может быть результатом нерегулярности в размещении гидроксипропильных групп в различных местах исходной молекулы ЦД. Это обусловлено тем, что чистота ЦД может оказывать существенное влияние на конечное качество гостевой молекулы и его товарность (*Guendouzi et al.*, 2020).

Таким образом, на эффективность процесса формирования комплексов между ЦД и гостевыми молекулами, а также их стабильность влияет множество факторов, понимание которых критически важно для оптимизации комплексообразования и инкапсулирования различных незаменимых нутриентов. В рамках настоящего исследования особое внимание было уделено комплексообразованию β-ЦД с йодом.

Результаты и обсуждение

Получение комплексов йод-ЦД

По данным ВОЗ дефицит йода считается одной из причин заболевания щитовидной железы человека⁴. Это объясняется тем, что в его организме йод является неотъемлемой частью гормонов щитовидной железы. В мировой практике дефицит йода наблюдается почти у двух миллиардов человек (*Zimmerman, 2012; O'Kane et al.*, 2018). По существующим рекомендациям для решения проблемы йодосодержания детям рекомендуется в сутки потреблять 70–150 мкг йода, тогда как взрослым его требуется – 150 мкг⁵. Одним из важнейших мероприятий профилактики йододефицита является йодирование пищевых продуктов (*Iodine...*, 2017). Добавление йода в продукты питания, особенно социально значимые, позволит обеспечить необходимое потребление этого важного микроэлемента.

К категории социально значимых продуктов питания относится белый сахар⁶ (*Николаева и др.*, 2021). Вследствие его широкого использования в рационе питания, экономической доступности и востребованности в различных отраслях пищевой промышленности (включая производство кондитерских изделий, хлебобулочных изделий и напитков) он может быть перспективной основой для обогащения йодом⁷ (*Славянский и др.*, 1984). В соответствии с действующими рекомендациями, взрослому населению рекомендуется употреблять примерно 25 г сахара в сутки³. Хорошо известно, что йод является весьма летучим элементом. Поэтому повышение его устойчивости к условиям окружающей среды является критически важным фактором. Это обусловлено тем, что последний определяет эффективность профилактики йододефицитных состояний.

⁴ WHO. Assessment of Iodine Deficiency Disorders and Monitoring Their Elimination: A Guide for Programme Managers. World Health Organization; Geneva, Switzerland, 2007.

⁵ Методические рекомендации МР 2.3.1.0253-21. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации, утв. руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации. 22.07.2021. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/402716140/>.

⁶ Славянский А. А. Сахар: назначение, свойства и производство. М. : Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского (Первый казачий университет), 2012. 213 с. EDN: WFFVYR.

⁷ Славянский А. А., Сапронов А. Р. Пути повышения качества продукции в сахарной промышленности. М. : Агропромиздат, 1985. 39 с. EDN: WGDHRT.

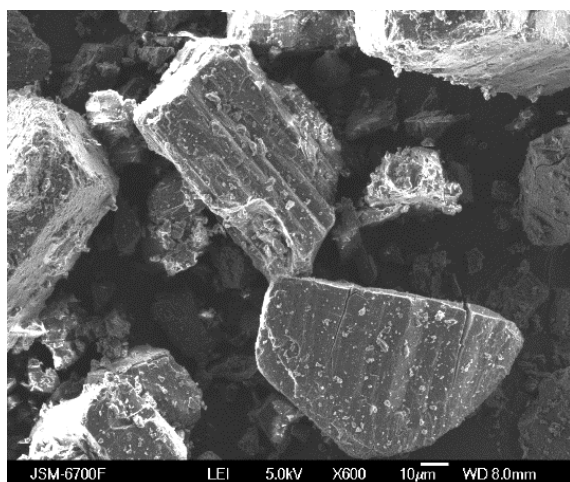
Благодаря своей уникальной циклической структуре и наличию гидрофобной полости ЦД способны захватывать в нее различные молекулы. Например, включать в себя микроэлементы, которые часто имеют низкую стабильность и растворимость. При этом ЦД способны увеличить физическую и химическую стабильность этих компонентов (Bednarek et al., 2019; Neoh et al., 2006). Получение комплексов ЦД с йодом – весьма перспективно для создания новых йодированных пищевых продуктов.

Вместе с тем известно, что йод весьма нестабилен и чувствителен к факторам окружающей его среды. Поэтому при его инкапсулировании в ЦД, а также при разработке йодированных сахаросодержащих продуктов, могут потребоваться дополнительные исследования в этом направлении (Wang, 2011; Moini et al., 2020).

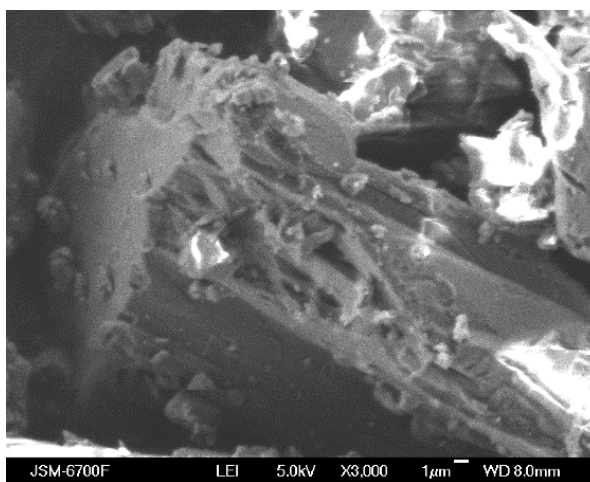
На основе ранее выполненных работ установлено, что α -ЦД образует комплекс со смесью йодида калия и йода (Minns et al., 2002; Lechat et al., 1992). Проведенные в этом направлении эксперименты показали на стабильность разработанного соединения – после 16 месяцев его хранения. Кроме того отмечена его пригодность для промышленного использования.

Отмечено, что основой для включения и формирования комплексов с йодом могут быть как α -ЦД, так и β -ЦД. При этом уточнено то, что β -ЦД способен к образованию более стабильного комплекса с йодом, чем с α -ЦД. Причем этот тип комплексообразования в целом увеличивает растворимость йода в воде (Polumbryk et al., 2019; Sharipov et al., 2017).

В ходе дальнейших исследований были получены комплексы ЦД с йодом (α -ЦД- I_2 и β -ЦД- I_2) путем смешивания концентрированных растворов ЦД и KI с последующим выпадением осадка, его промыванием и сушкой под разрежением (Литвяк и др., 2024). Результаты этих экспериментов представлены на рис. 6 и 7. На рис. 8 показана схема образования комплексного соединения между β -ЦД и KI.



Комплекс α -ЦД с йодом



Комплекс β -ЦД с йодом

Рис. 6. Сканирующие электронные микрофотографии комплекса ЦД с йодом

Fig. 6. Scanning electron micrographs of the CD complex with iodine

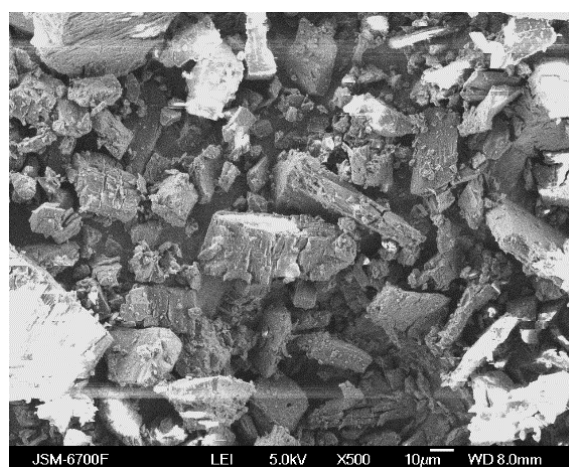
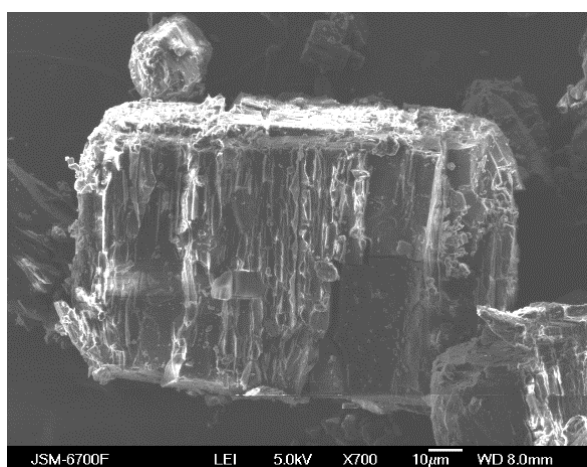


Рис. 7. Сканирующие электронные микрофотографии комплекса β -ЦД с йодом

Fig. 7. Scanning electron micrographs of the β -CD complex with iodine

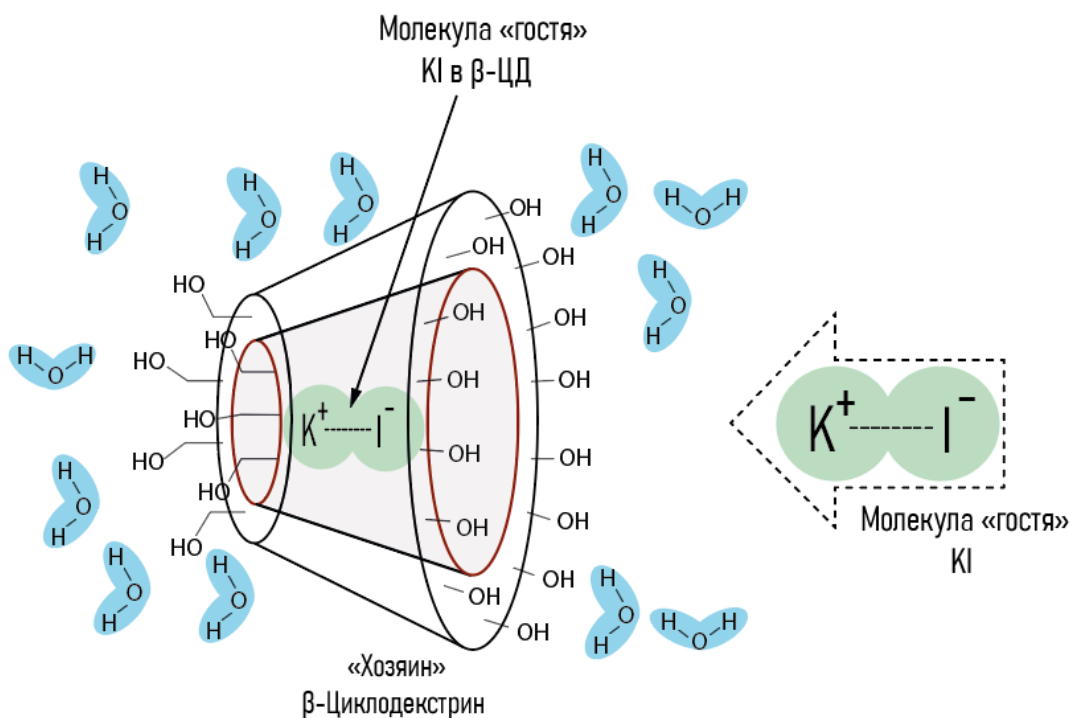


Рис. 8. Схема образования комплексного соединения между β-ЦД и KI
Fig. 8. Scheme of formation of the complex compound between β-CD and KI

Таким образом, ЦД обеспечивает защиту молекулы йода от взаимодействия с кислородом и влагой из воздуха, которые могут вызывать деградацию "гостя" или химические реакции между ним и компонентами окружающей среды. Помимо этого включенные в полость β-ЦД молекулы йода становятся менее доступными для перехода в газовую фазу, так как полость β-ЦД препятствует высвобождению молекул йода. В ходе работы сканирующей электронной микроскопией и йодометрическим титрованием было установлено, что содержание йода в комплексе β-ЦД-I₂ составляет 16,82–16,90 %.

Заключение

Способность ЦД к образованию комплексных соединений открывает новые перспективные возможности их использования, например, для разработки новых видов обогащенных пищевых продуктов. При выборе последних в первую очередь следует ориентироваться на социально значимые продукты питания. В результате проведенных исследований в этом направлении отмечена важность понимания особенностей взаимодействий ЦД и гостевых молекул и новых подходов к их использованию. Особое внимание в данной работе уделено проблеме инкапсулирования и формирования комплексов йода с β-ЦД. Показано, что дальнейшие исследования в этой области могут стать основой разработки уточненных условий инкапсуляции с защитой их от факторов внешней среды. При этом данная проблема является не только актуальной в контексте йододефицита, но и перспективной, так как она ориентирована на создание нового поколения социально значимых пищевых продуктов с заданными или строго персонализированными характеристиками.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

References

- Adamiak, M., Ignaczak, A. 2019. Quantum chemical study of the complexation process of bis-β-D-glucopyranosyl diazacrown derivative with aspirin and paracetamol molecules. *Computational and Theoretical Chemistry*, 1167. Article number: 112591. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comptc.2019.112591>.
- Aiassa, V., Garnero, C., Zoppi, A., Longhi, M. R. 2023. Cyclodextrins and their derivatives as drug stability modifiers. *Pharmaceuticals*, 16(8). Article number: 1074. DOI: <https://doi.org/10.3390/ph16081074>.
- Ali, K. A., Roy, P., Maity, A., Chakraborty, P. 2021. Tailor-made cyclodextrin-based nanomaterials as drug carriers. In *Tailor-Made and Functionalized Biopolymer Systems*. Eds.: H. Bera, B. Layek, J. Singh. Woodhead Publishing, pp. 155–200. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821437-4.00004-9>.
- Amiri, S., Amiri, S. 2017. Cyclodextrins: Properties and industrial applications. John Wiley & Sons Ltd. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119247609>.

- Araújo, L. D. S. S., Lazzara, G., Chiappisi, L. 2021. Cyclodextrin/surfactant inclusion complexes: An integrated view of their thermodynamic and structural properties. *Advances in Colloid and Interface Science*, 289. Article number: 102375. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102375>.
- Bednarek, E., Bocian, W., Michalska, K. 2019. Nuclear magnetic resonance spectroscopic study of the inclusion complex of (R)-tedizolid with HDAS- β -CD, β -CD, and γ -cyclodextrin in aqueous solution. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 169, pp. 170–180. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jpba.2019.02.031>.
- Borisova, A. V., Shayarova, M. V., Shishkina, N. Yu. 2021. Functional foods: The relationship between theory, production and consumer. *New Technologies*, 17(1), pp. 21–32. = Борисова А. В., Шаярова М. В., Шишкина Н. Ю. Функциональные продукты питания: связь между теорией, производством и потребителем // Новые технологии. 2021. Т. 17, № 1. С. 21–32. DOI: <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2021-17-1-21-32>. EDN: KMZWIA. (In Russ.)
- Christoforides, E., Andreou, A., Papaioannou, A., Bethanis, K. 2022. Structural studies of piperine inclusion complexes in native and derivative β -cyclodextrins. *Biomolecules*, 12(12). Article number: 1762. DOI: <https://doi.org/10.3390/biom12121762>.
- Crini, G. 2014. Review: A history of cyclodextrins. *Chemical Reviews*, 114(21), pp. 10940–10975. DOI: <https://doi.org/10.1021/cr500081p>.
- da Rocha Neto, A. C., da Rocha, A. B. D. O., Maraschin, M., di Piero, R. M. et al. 2018. Factors affecting the entrapment efficiency of β -cyclodextrins and their effects on the formation of inclusion complexes containing essential oils. *Food Hydrocolloids*, 77, pp. 509–523. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.10.029>.
- Das, S., Nath, S., Singh, T. S., Chattopadhyay, N. 2020. Cavity size dependent stoichiometry of probe – cyclodextrin complexation: Experimental and molecular docking demonstration. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 388. Article number: 112158. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.112158>.
- do Nascimento Cavalcante, A., Feitosa, C. M., da Silva Santos, F. P., de Sousa, A. P. R. et al. 2019. Elaboration and characterization of the inclusion complex between β -cyclodextrin and the anticholinesterase 2-oleyl-1,3-dipalmitoyl-glycerol extracted from the seeds of *Platonia insignis* MART. *Journal of Molecular Structure*, 1177, pp. 286–301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.09.067>.
- Frolova, A. S., Milentyeva, I. S., Fedorova, A. M., Miller, E. S. et al. 2024. Effect of biologically active substances on thermal and oxidative stress of model objects *Caenorhabditis elegans*. *Food Processing: Techniques and Technology*, 54(3), pp. 571–584. = Фролова А. С., Милентьева И. С., Федорова А. М., Миллер Е. С. [и др.]. Влияние биологически активных веществ на тепловой и окислительный стресс модельных объектов *Caenorhabditis elegans* // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54, № 3. С. 571–584. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-3-2530>. EDN: KEDBNI. (In Russ.)
- Guendouzi, O., Guendouzi, A., Ouici, H. B., Brahim, H. et al. 2020. A quantum chemical study of encapsulation and stabilization of gallic acid in β -cyclodextrin as a drug delivery system. *Canadian Journal of Chemistry*, 98(4), pp. 204–214. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjc-2019-0464>.
- Iodine deficiency disorders and their elimination. 2017. Ed.: E. N. Pearce. Springer International Publishing AG.
- Jambhekar, S. S., Breen, P. 2016. Cyclodextrins in pharmaceutical formulations I: Structure and physicochemical properties, formation of complexes, and types of complex. *Drug Discovery Today*, 21(2), pp. 356–362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2015.11.017>.
- Janicka, P., Kaykhaii, M., Plotka-Wasyłka, J., Gębicki, J. 2022. Supramolecular deep eutectic solvents and their applications. *Green Chemistry*, 24(13), pp. 5035–5045. DOI: <https://doi.org/10.1039/D2GC00906D>.
- Jia, Z., Luo, Y., Barba, F. J., Wu, Y. et al. 2022. Effect of β -cyclodextrins on the physical properties and anti-staling mechanisms of corn starch gels during storage. *Carbohydrate Polymers*, 284. Article number: 119187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119187>.
- Kato, S., Aoshima, H., Saitoh, Y., Miwa, N. 2009. Highly hydroxylated or γ -cyclodextrin-bicapped water-soluble derivative of fullerene: The antioxidant ability assessed by electron spin resonance method and β -carotene bleaching assay. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 19(18), pp. 5293–5296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bmcl.2009.07.149>.
- Kavetsou, E., Pitterou, I., Katopodi, A., Petridou, G. et al. 2021. Preparation, characterization, and acetylcholinesterase inhibitory ability of the inclusion complex of β -Cyclodextrin-Cedar (*Juniperus phoenicea*) essential oil. *Micro*, 1(2), pp. 250–266. DOI: <https://doi.org/10.3390/micro1020019>.
- Lechat, F. L., Wouessidjewe, D., Herrenknecht, C., Duchêne, D. 1992. Preparation and stability of iodine/ α -cyclodextrin inclusion complex. *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 18(17), pp. 1853–1863. DOI: <https://doi.org/10.3109/03639049209046335>.
- Leclercq, L. 2016. Interactions between cyclodextrins and cellular components: Towards greener medical applications? *Beilstein Journal of Organic Chemistry*, 12, pp. 2644–2662. DOI: <https://doi.org/10.3762/bjoc.12.261>.
- Li, T., Guo, R., Zong, Q., Ling, G. 2022. Application of molecular docking in elaborating molecular mechanisms and interactions of supramolecular cyclodextrin. *Carbohydrate Polymers*, 276. Article number: 118644. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118644>.

- Litvyak, V. V., Slavyansky, A. A., Avakova, A. A. 2024. Study of cyclodextrins enriched with microelements. *Bulletin of the Moscow State University of Technology and Management named after K. G. Razumovsky (First Cossack University). Series of applied scientific disciplines*, 4, pp. 24–36. = Литвяк В. В., Славянский А. А., Авакова А. А. Исследование циклодекстринов, обогащенных микроэлементами. Вестник Московского государственного университета технологий и управления им. К. Г. Разумовского (Первый казачий университет). Серия прикладных научных дисциплин. 2024. № 4. С. 24–36. EDN: JRLIVI. (In Russ.)
- Maniam, M. M. R., Loong, Y. H., Samsudin, H. 2022. Understanding the formation of β -Cyclodextrin inclusion complexes and their use in active packaging systems. *Starch-Stärke*, 74(7–8). Article number: 2100304. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.202100304>.
- Mashaqbeh, H., Obaidat, R., Al-Shar'I, N. 2021. Evaluation and characterization of curcumin- β -cyclodextrin and cyclodextrin-based nanosponge inclusion complexation. *Polymers*, 13(23). Article number: 4073. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13234073>.
- Matencio, A., García-Carmona, F., López-Nicolás, J. M. 2016. Encapsulation of piceatannol, a naturally occurring hydroxylated analogue of resveratrol, by natural and modified cyclodextrins. *Food & Function*, 7(5), pp. 2367–2373. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6FO00557H>.
- Minns, J. W., Khan, A. 2002. α -Cyclodextrin- I_3 host – guest complex in aqueous solution: Theoretical and experimental studies. *The Journal of Physical Chemistry A*, 106(26), pp. 6421–6425. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp020628r>.
- Mohammed-Saeid, W., Karoyo, A. H., Verrall, R. E., Wilson, L. D. et al. 2019. Inclusion complexes of melphalan with gemini-conjugated β -cyclodextrin: Physicochemical properties and chemotherapeutic efficacy in in-vitro tumor models. *Pharmaceutics*, 11(9). Article number: 427. DOI: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics11090427>.
- Mohandoss, S., Atchudan, R., Edison, T. N. J. I., Mandal, T. K. et al. 2019. Enhanced solubility of guanosine by inclusion complexes with cyclodextrin derivatives: Preparation, characterization, and evaluation. *Carbohydrate Polymers*, 224. Article number: 115166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115166>.
- Moini, J., Pereira, K., Samsam, M. 2020. Epidemiology of thyroid disorders. Elsevier; Amsterdam, The Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2018-0-03841-4>.
- Mura, P. 2014. Analytical techniques for characterization of cyclodextrin complexes in aqueous solution: A review. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 101, pp. 238–250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2014.02.022>.
- Mura, P. 2015. Analytical techniques for characterization of cyclodextrin complexes in the solid state: A review. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 113, pp. 226–238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2015.01.058>.
- Natural sources, physicochemical characterization and applications. 2016. Ed.: C. Apetrei. Bentham Science Publishers (Series Title: Frontiers in Bioactive Compounds, Vol. 1). DOI: <https://doi.org/10.2174/97816810834141160101>.
- Neoh, T.-L., Noda, Y., Yoshii, H., Furuta, T. 2006. Release characteristics of iodine encapsulated in cyclodextrins. *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 56, pp. 117–123. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10847-006-9072-7>.
- Nikolaeva, N. V., Mitroshina, D. P., Slavyansky, A. A., Gribkova, V. A. et al. 2021. Sucrose crystals as the basis of sugar-containing products. *Sugar*, 8, pp. 34–39. = Николаева Н. В., Митрошина Д. П., Славянский А. А., Грибкова В. А. [и др.]. Кристаллы сахарозы как основа сахаросодержащих продуктов // Сахар. 2021. № 8. С. 34–39. DOI: 10.24412/2413-5518-2021-8-34-38. EDN: ONLDGW. (In Russ.)
- O’Kane, S. M., Mulhern, M. S., Pourshahidi, L. K., Strain, J. J. et al. 2018. Micronutrients, iodine status and concentrations of thyroid hormones: A systematic review. *Nutrition reviews*, 76(6), pp. 418–431. DOI: <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuy008>.
- Polumbryk, M., Kravchenko, V., Pasichnyi, V., Omelchenko, C. et al. 2019. The effect of intake of sausages fortified with β -CD-I2 complex on iodine status and thyroid function: A preliminary study. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 51, pp. 159–163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.10.014>.
- Qu, Q., Tucker, E., Christian, S. D. 2002. Sulfoalkyl ether β -cyclodextrin derivatives: Synthesis and characterizations. *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 43, pp. 213–222. DOI: <https://doi.org/10.1023/a:1021255314835>.
- Raffaini, G., Ganazzoli, F. 2019. A molecular dynamics study of a photodynamic sensitizer for cancer cells: Inclusion complexes of γ -Cyclodextrins with C_{70} . *International Journal of Molecular Sciences*, 20(19). Article number: 4831. DOI: <http://doi.org/10.3390/ijms20194831>.
- Saokham, P., Muankaew, C., Jansook, P., Loftsson, T. 2018. Solubility of cyclodextrins and drug/cyclodextrin complexes. *Molecules*, 23(5). Article number: 1161. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules23051161>.
- Sbârcea, L., Ledeti, A., Udrescu, L., Văruț, R. M. et al. 2019. Betulonic acid-cyclodextrins inclusion complexes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138, pp. 2787–2797. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10973-019-08359-6>.

- Sharipov, A. T., Boboev, Z. D., Fazliev, S. A., Aminov, S. N. 2017. Standartization of the iodine- β -cyclodextrine substance. *Pharmaceutical Journal*, 2, pp. 59–63.
- Slavyansky, A. A., Gribkova, V. A., Nikolaeva, N. V., Mitroshina, D. P. 2021. Study of the possibility of using a granulated sugar-containing product with functional additives in the production of jelly fillings. *Food Processing: Techniques and Technology*, 51(4), pp. 859–868. = Славянский А. А., Грибкова В. А., Николаева Н. В., Митрошина Д. П. Исследование возможности применения гранулированного сахаросодержащего продукта с функциональными добавками при производстве жележных начинок // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51, № 4. С. 859–868. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-859-868>. EDN: NEQQJX. (In Russ.)
- Slavyansky, A. A., Sapronov, A. R., Lobanova, A. P., Pugachev, V. A. et al. 1984. Improving the working conditions of the product department at the Chimshinsky sugar plant. *Sugar Industry*, 10, pp. 22–25. = Славянский А. А., Сапронов А. Р., Лобанова А. П., Пугачев В. А. [и др.]. Улучшение условий работы продуктового отделения на Чимшинском сахарном заводе // Сахарная промышленность. 1984. № 10. С. 22–25. EDN: EECCHT. (In Russ.)
- Topuz, F., Uyar, T. 2022. Advances in the development of cyclodextrin-based nanogels/microgels for biomedical applications: Drug delivery and beyond. *Carbohydrate Polymers*, 297. Article number: 120033. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120033>.
- Tsyplikhin, N. O., Komarova, E. V., Fedorova, M. G., Vasiliev, V. S. 2025. Statistics of general morbidity and mortality from non-neoplastic diseases of the thyroid gland in iodine-deficient regions located in the zone of radioactive contamination (on the example of the Penza region). *The Siberian Scientific Medical Journal*, 45(1), pp. 221–227. = Цыплихин Н. О., Комарова Е. В., Фёдорова М. Г., Васильев В. С. Статистика общей заболеваемости и смертности от неопухолевых заболеваний щитовидной железы в йододефицитных регионах, находившихся в зоне радиоактивного загрязнения (на примере Пензенской области) // Сибирский научный медицинский журнал. 2025. Т. 45, № 1. С. 221–227. DOI: <https://doi.org/10.18699/SSMJ20250124>. EDN: FUNSYE. (In Russ.)
- Venuti, V., Corsaro, C., Stancanelli, R., Paciaroni, A. et al. 2019. Analysis of the thermal fluctuations in inclusion complexes of genistein with β -cyclodextrin derivatives. *Chemical Physics*, 516, pp. 125–131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2018.09.003>.
- Wang, T., Li, B., Feng, Y., Guo, Q. 2011. Preparation, quantitative analysis and bacteriostasis of solid state iodine inclusion complex with β -cyclodextrin. *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 69, pp. 255–262. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10847-010-9836-y>.
- Xiao, Z., Hou, W., Kang, Y., Niu, Y. et al. 2019. Encapsulation and sustained release properties of watermelon flavor and its characteristic aroma compounds from γ -cyclodextrin inclusion complexes. *Food Hydrocolloids*, 97. Article number: 105202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105202>.
- Zhang, J., Ma, P. X. 2013. Cyclodextrin-based supramolecular systems for drug delivery: Recent progress and future perspective. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 65(9), pp. 1215–1233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addr.2013.05.001>.
- Zhu, G., Feng, N., Xiao, Z., Zhou, R. et al. 2015. Production and pyrolysis characteristics of citral-monochlorotriazinyl- β -cyclodextrin inclusion complex. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 120, pp. 1811–1817. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-015-4498-z>.
- Zimmermann, M. B. 2012. Iodine and iodine deficiency disorders. In *Present Knowledge in Nutrition*. Eds.: J. W. Erdman, I. A. Macdonald, S. H. Zeisel. Wiley-Blackwell; Oxford, UK, pp. 554–567. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119946045.ch36>.

Сведения об авторах

Грибкова Вера Анатольевна – ул. Земляной Вал, 73, г. Москва, Россия, 109004;
Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет), канд. техн. наук, доцент;
e-mail: vera_gribkova@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5079-8132>

Vera A. Gribkova – 73 Zemlyanoy Val Str., Moscow, Russia, 109004;
Razumovsky Moscow State University of Technology and Management (First Cossack University),
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: vera_gribkova@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5079-8132>

Митрошина Дарья Петровна – ул. Земляной Вал, 73, г. Москва, Россия, 109004;
Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет), канд. техн. наук, доцент;
e-mail: d_mitr96@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8724-3368>

Daria P. Mitroshina – 73 Zemlyanoy Val Str., Moscow, Russia, 109004;
Razumovsky Moscow State University of Technology and Management (First Cossack University),
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: d_mitr96@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8724-3368>

Славянский Анатолий Анатольевич – ул. Земляной Вал, 73, г. Москва, Россия, 109004;
Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет), д-р техн. наук, профессор;
e-mail: mgutu-sahar@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0262-8841>

Anatoliy A. Slavyanskiy – 73 Zemlyanoy Val Str., Moscow, Russia, 109004;
Razumovsky Moscow State University of Technology and Management (First Cossack University),
Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: mgutu-sahar@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0262-8841>

Николаева Наталья Валерьевна – ул. Земляной Вал, 73, г. Москва, Россия, 109004;
Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет), канд. техн. наук, доцент;
e-mail: nata_nik@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4349-1287>

Natalia V. Nikolaeva – 73 Zemlyanoy Val Str., Moscow, Russia, 109004;
Razumovsky Moscow State University of Technology and Management (First Cossack University),
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: nata_nik@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4349-1287>

Литвяк Владимир Владимирович – ул. Некрасова, 11, г. Люберцы, Московская обл., Россия, 140051;
ВНИИ крахмала и переработки крахмалсодержащего сырья – филиал Федерального исследовательского
центра картофеля имени А. Г. Лорха, д-р техн. наук, канд. хим. наук, доцент, вед. науч. сотрудник;
e-mail: besserk1974@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1456-9586>

Vladimir V. Litvyak – 11 Nekrasov Str., Lyubertsy, Moscow region, Russia, 140051;
All-Russian Research Institute of Starch and Starch-containing Raw Materials Processing –
Branch of Russian Potato Research Centre,
Dr Sci. (Engineering), Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor, Leading Researcher;
e-mail: besserk1974@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1456-9586>

Шилов Валерий Викентьевич – ул. Долгобродская, 23/1, г. Минск, Республика Беларусь, 220070;
Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова Белорусского
государственного университета, канд. биол. наук, доцент;
e-mail: valery.shilov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2716-4182>

Valery V. Shilov – 23/1 Dolgobrodskaya Str., Minsk, Republic of Belarus, 220070;
International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University,
Cand. Sci. (Biology), Associate Professor;
e-mail: valery.shilov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2716-4182>