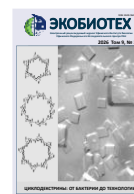




ЭКОБИОТЕХ

ISSN 2618-964X

<http://ecobiotech-journal.ru>



УДК 637.1/.3.04/07+577.114



Научная статья | RESEARCH ARTICLE

БИОАКТИВНЫЕ СУПРАМОЛЕКУЛЯРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ЦИКЛОДЕКСТРИНОВ С ПЕПТИДАМИ СЫВОРОТОЧНЫХ БЕЛКОВ МОЛОКА

Головач Т.Н.^{1*}, Курченко В.П.¹, Тарун Е.И.²,
Дудчик Н.В.³, Ржепаковский И.В.⁴

¹ Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

² Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова БГУ, Минск, Беларусь

³ РУП «Научно-практический центр гигиены», Минск, Беларусь

⁴ ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», Ставрополь, Россия

*E-mail: halavachtn@gmail.com

BIOACTIVE SUPRAMOLECULAR INCLUSION COMPLEXES OF CYCLODEXTRINS WITH WHEY PROTEIN PEPTIDES

Halavach T.M.^{1*}, Kurchenko V.P.¹, Tarun E.I.²,
Dudchik N.V.³, Rzhepakovsky I.V.⁴

¹ Belarusian State University, Minsk, Belarus

² International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Minsk, Belarus

³ Scientific and Practical Center of Hygiene, Minsk, Belarus

⁴ North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

*E-mail: halavachtn@gmail.com

Аннотация

Предложен комплексный биотехнологический подход к повышению биоактивности и улучшению органолептических свойств частичных ферментативных гидролизатов лактопротеинов. Разработанный технологический процесс включает расщепление белков молочной сыворотки щелочной бактериальной протеазой (алкалаза) и мембранное фракционирование с отсечкой по молекулярной массе 10 кДа, что обеспечивает получение низкомолекулярных пептидных фракций со сниженной остаточной антигенностью наряду с увеличением антиоксидантной активности в 3.0 и 5.3 раза по данным ORAC- и ABTS-методов соответственно. В исследовании продемонстрировано, что комплексообразование β - и γ -циклодекстринов с пептидами дополнительно приводит к возрастанию радикал-восстанавливающего действия гидролизатов в 1.8–1.9 раза (ORAC-метод), сохранению либо усилению антимутагенного и антимикробного эффекта пептидов, а также существенному снижению интенсивности их горечи. Полученные результаты подтверждают перспективность применения β - и γ -циклодекстриновых комплексов включения с гидролизатами лактопротеинов в качестве функциональных ингредиентов для специализированных пищевых продуктов.

Ключевые слова:

сывороточные белки молока; ферментативный гидролиз; пептиды; циклодекстрин; комплексы включения; антиоксидантная активность; органолептические свойства

Поступила в редакцию: 19.06.2026

Принято в печать: 29.08.2026

Abstract

A comprehensive biotechnological approach is proposed to enhance the bioactivity and improve the organoleptic properties of partially hydrolyzed lactoproteins. The developed technological process includes the cleavage of whey proteins by an alkaline bacterial protease (Alcalase) and membrane fractionation with a molecular weight cut-off of 10 kDa, resulting in low-molecular-weight peptide fractions with reduced residual antigenicity, along with a 3.0- and 5.3-fold increase in antioxidant activity according to ORAC and ABTS assays, respectively. This study demonstrates that complex formation of β - and γ -cyclodextrins with peptides further increases the radical-scavenging activity of the hydrolysates by 1.8–1.9 times (ORAC assay), maintains or enhances the antimutagenic and antimicrobial effects of the peptides, and significantly reduces their bitterness intensity. These findings confirm the promise of using β - and γ -cyclodextrin inclusion complexes with lactoprotein hydrolysates as functional ingredients for specialized food products.

Keywords:

whey proteins; enzymatic hydrolysis; peptides; cyclodextrin; inclusion complexes; antioxidant activity; organoleptic properties

Received: 19.06.2026

Accepted: 29.08.2026

Цитировать | Cite as

DOI: <http://doi.org/10.31163/2618-964X/2026-26> EDN: <https://www.elibrary.ru/fucvey>

ВВЕДЕНИЕ

Коровье молоко и продукты его переработки традиционно являются одним из доминирующих источников пищевого белка и биологически активных пептидов, способных проявлять широкий спектр физиологического действия [Dullius *et al.* 2018; Berry *et al.* 2020]. При создании функциональных продуктов питания особое внимание уделяется гидролизатам сывороточных белков молока и выделяемым из них пептидам, обладающим антиоксидантной, антимуtagenной, антимикробной и др. активностью. Ферментативный гидролиз рассматривается в качестве наиболее эффективного подхода к модификации свойств молочных белков, поскольку позволяет одновременно повышать их биодоступность, изменять техно-функциональные характеристики и снижать аллергенный потенциал за счет разрушения областей антигенных эпитопов [Milessi *et al.* 2022; Najafian 2023; Rivero-Pino *et al.* 2023].

Для получения фракций сывороточных белков молока с глубокой степенью гидролиза широко используют щелочные эндопептидазы микробного происхождения, в частности алкалазу (Alcalase®), в сочетании с мембранным фракционированием (микро- и ультрафильтрация) [Dullius *et al.* 2018; Milessi *et al.* 2022]. В ранее опубликованных работах показано, что при гидролизе сывороточных белков алкалазой с последующей фильтрацией через мембраны с отсечкой по M_w 10 кДа антиоксидантная активность белковой фракции возрастает наряду со снижением иммунореактивности лактопротеинов. Тепловая обработка позволяет дополнительно уменьшить остаточную антигенность гидролизатов при сохранении их биоактивности [Halavach 2024; Halavach *et al.* 2024].

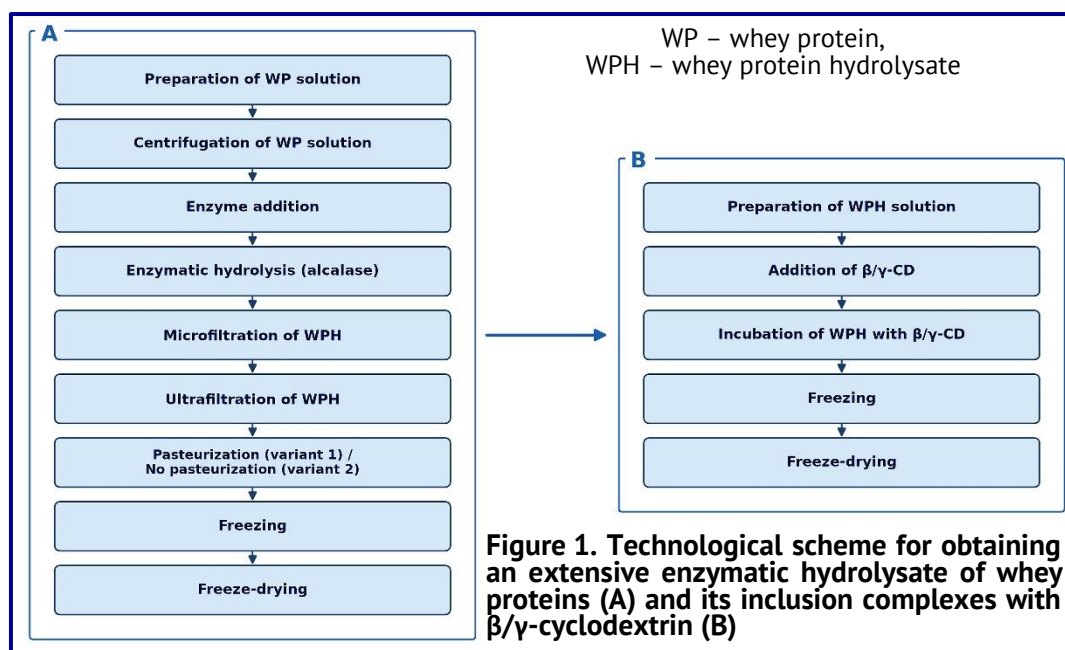
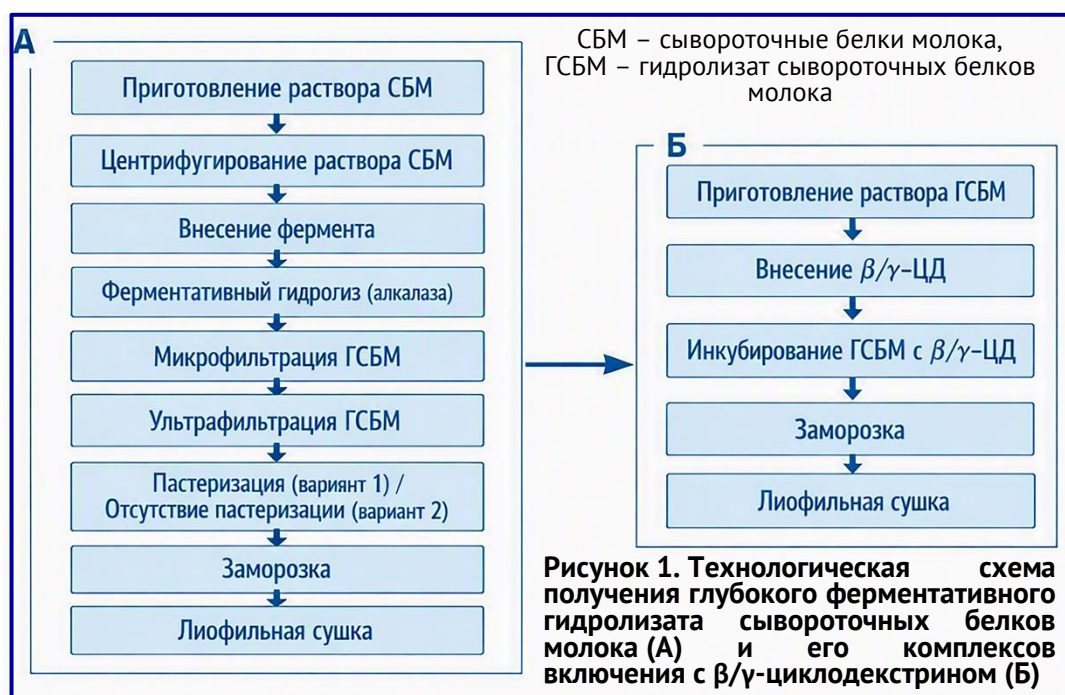
Существенным ограничением применения глубоко гидролизированных белков является выраженный горький вкус, обусловленный накоплением низкомолекулярных продуктов протеолиза [Yang *et al.* 2020]. Для коррекции органолептических характеристик перспективно использование циклодекстринов (ЦД) – циклических олигосахаридов с гидрофобной полостью, которые способны образовывать комплексы включения с гидрофобными и амфифильными лигандами, ассоциированными с горьким вкусом [Poulson *et al.* 2021; Zhou *et al.* 2022]. Согласно данным литературы [Singh *et al.* 2020; Jo *et al.* 2021] и предшествующим собственным исследованиям [Halavach *et al.* 2021, 2022, 2023; Halavach 2023; Головач и др. 2024], при формировании супрамолекулярных комплексов β - и γ -ЦД с пептидами сохраняется или усиливается их биоактивное действие наряду с существенным снижением уровня горечи. При этом β -ЦД рассматривается как один из наиболее эффективных агентов, обеспечивающих улучшение органолептических свойств, поскольку размер его полости способствует более селективному связыванию с радикалами ароматических и алифатических аминокислот (Trp, Tyr, Phe, Leu, Ile и Pro) в составе горьких пептидов [Singh *et al.* 2020; Halavach *et al.* 2022, 2023; Halavach 2023].

Цель настоящей работы – охарактеризовать биотехнологический подход к повышению биоактивности и улучшению органолептических свойств лактопротеинов, основанный на частичном ферментативном гидролизе сывороточных белков коровьего молока, мембранном фракционировании пептидов и последующем комплексообразовании с β - и γ -циклодекстринами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для получения гидролизатов лактопротеинов и их ЦД-комплексов применяли концентрат сывороточных белков молока (массовая доля белка 80%, Щучинский филиал ОАО «Молочный мир», Республика Беларусь), протеолитический фермент Alcalase® 2.4L FG (КФ 3.4.21.62, 2.4 ЕА/г; Novozymes A/S, Дания; далее – алкалаза), β -ЦД (Henan Haoyuhang Economic & Trade Co. Ltd., Китай) и γ -ЦД (Chem-Impex International Inc., Китай).

Ферментативные гидролизаты сывороточных белков коровьего молока и ЦД-комплексы с пептидами получены в НИЛ прикладных проблем биологии БГУ и межкафедральной научно-образовательной лаборатории экспериментальной иммуноморфологии Северо-Кавказского федерального университета согласно технологической схеме, представленной на Рис. 1. Основные физико-химические свойства опытных образцов приведены в Табл. 1.



Массовую долю общего азота (TN) и белка в образцах гидролизатов определяли по СТБ ISO 8968–1. Массовую долю α-аминного азота (AN) устанавливали по ГОСТ Р 55479. Степень гидролиза (СГ, %) рассчитывали как отношение AN/TN; для исследуемого гидролизата значение СГ составило 31.2%. Анализ молекулярно-массового распределения исследуемых гидролизатов осуществляли методом масс-спектрометрии с применением масс-спектрометра высокого разрешения с источником ионизации MALDI производства Bruker Daltonics (Бремен, Германия).

Антиоксидантную активность (АОА) лактопротеинов, их гидролизатов и β/γ-ЦД-комплексов с пептидами определяли ORAC- и ABTS-методами с расчетом показателя IC₅₀ [Halavach et al. 2023, 2024]. Остаточную антигенность (ОА) оценивали с применением конкурентного иммуноферментного анализа (ИФА) по содержанию иммунореактивного β-лактоглобулина, антимуtagenное действие – в тесте Эймса (штаммы *Salmonella typhimurium* TA 98 и TA 100), антимикробный эффект – импедиметрически в отношении *Escherichia coli* ATCC 8739 и *Staphylococcus aureus* ATCC 6538 [Halavach et al. 2021, 2023]. Сенсорную оценку уровня горечи гидролизатов и ЦД-комплексов с пептидами проводили методом ранжирования (ГОСТ ISO 8587–2015), в тестах «А – не А» (ГОСТ ISO 8588–2011) и «дуо – трио» (ГОСТ ISO 10399–2015). Статистическую обработку данных выполняли методами дисперсионного анализа (ANOVA) и множественных сравнений (тест Тьюки) при уровне значимости p<0.05.

Таблица 1. Характеристика лактопротеинов и их гидролизатов ЦД-комплексов с пептидами**Table 1. Characteristics of lactoprotein hydrolysates and their peptide-cyclodextrin inclusion complexes**

Образец	Состав и форма	Степень гидролиза, %	Молекулярно-массовая характеристика	Соотношение компонентов
ГСБМ (вариант 1/2)	Лиофилизированный ГСБМ (80% белка)	31.2	Пептидная фракция с $M_w < 10$ кДа	ЦД отсутствует
β -ЦД-ГСБМ	Лиофилизированные комплексы β -ЦД с пептидами ГСБМ	31.2 (для ГСБМ)	Пептиды с $M_w < 10$ кДа в составе β -ЦД-комплексов	ГСБМ : β -ЦД = 50 : 50 ¹ ; ГСБМ : β -ЦД = 50 : 51 ²
γ -ЦД-ГСБМ	Лиофилизированные комплексы γ -ЦД с пептидами ГСБМ	31.2 (для ГСБМ)	Пептиды с $M_w < 10$ кДа в составе γ -ЦД-комплексов	ГСБМ : γ -ЦД = 50 : 50 ¹

Примечание: – вариант 1 включает пастеризацию, вариант 2 – получение образца без пастеризации; ГСБМ – гидролизат сывороточных белков молока; ЦД – циклодекстрин. 1 – соотношение компонентов при определении биоактивности ЦД-комплексов; 2 – соотношение компонентов в эксперименте по расширенной оценке органолептических свойств комплекса β -ЦД-ГСБМ; M_w – молекулярная масса

Note: option 1 includes pasteurization, option 2 – preparation of sample without pasteurization; WPH – whey protein hydrolysate; CD – cyclodextrin. 1 – component ratio for determination of bioactivity of CD complexes; 2 – component ratio in the experiment for extended evaluation of sensory properties of the β -CD-WPH complex; M_w – molecular weight

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Технологический процесс получения ферментативного гидролизата предусматривает приготовление раствора сывороточных белков молока и его центрифугирование для удаления нерастворимой фракции, внесение щелочной бактериальной протеазы алкалазы, ферментативный гидролиз, микрофильтрацию с отсечкой по размеру пор 0.2 мкм, ультрафильтрацию с отсечкой по M_w 10 кДа, пастеризацию (вариант 1) / отсутствие пастеризации (вариант 2), заморозку, лиофильную сушку (Рис. 1). Проведено комплексное исследование влияния ферментативного расщепления лактопротеинов, фракционирования пептидов и последующего комплексообразования опытных образцов гидролизатов с β - и γ -ЦД на их биоактивные свойства и уровень горечи.

По данным ORAC/ABTS-анализа установлено, что ферментативный гидролиз сывороточных белков с последующей мембранной фильтрацией (M_w 10 кДа) сопровождается увеличением антиоксидантной активности в 3.0 и 5.3 раза соответственно по сравнению с нативной сывороткой (Табл. 2). Значения IC_{50} для пептидной фракции составляют 35.4 мкг белка/мл (ORAC) и 18.1–18.3 мкг белка/мл (ABTS). Комплексообразование гидролизатов с β - и γ -ЦД дополнительно снижает $IC_{50(ORAC)}$ до 19.8 и 18.6 мкг белка/мл (повышение АОА в 1.8–1.9 раза соответственно), при этом $IC_{50(ABTS)}$ сохраняется на уровне 18.3–18.5 мкг белка/мл. Следовательно, в соответствии с результатами ORAC-метода подтверждено возрастание протон-донорных свойств пептидов молока в составе ЦД-комплексов [Halavach *et al.* 2022, 2023].

Таблица 2. Показатели антиоксидантной активности и остаточной антигенности гидролизатов сывороточных белков молока (ГСБМ), β/γ -ЦД и их комплексов с пептидами (ЦД-ГСБМ)**Table 2. Parameters of antioxidant activity and residual antigenicity of whey protein hydrolysates (WPH), β/γ -CD, and their complexes with peptides (CD-WPH)**

Наименование образца	$IC_{50(ORAC)}$, мкг белка/мл	$IC_{50(ABTS)}$, мкг белка/мл	ОА, %	ОА (СБМ)/ОА (ГСБМ)
СБМ	105.9 ^a	96.9 ^a	100 ^a	1.0 ^a
ГСБМ*	–	18.1 ^b	0.17 ^b	589 ^b
ГСБМ**	35.4 ^b	18.3 ^b	0.38 ^c	265 ^c
β -ЦД-ГСБМ**	19.8 ^c	18.5 ^b	0.43 ^c	237 ^c
γ -ЦД-ГСБМ**	18.6 ^c	18.3 ^b	0.40 ^c	254 ^c
β -ЦД/ γ -ЦД (контроль)	104.9 ^a /79.8 ^d	0	0	–

Примечание: */** – вариант технологического процесса № 1/2 (Рис. 1). Значения без общего буквенного индекса (a–d) в пределах одного столбца указывают на достоверные различия при $p < 0.05$ ($n=3$)

Note: */** – technological process variant No. 1/2 (Fig. 1). Values without a common letter superscript (a–d) within the same column indicate significant differences at $p < 0.05$ ($n=3$)

Согласно данным конкурентного ИФА в результате протеолиза алкалазой и фракционирования (M_w 10 кДа) уровень антигенности основного аллергена коровьего молока (β -лактоглобулина) в ГСБМ существенно снижается по сравнению с нативными сывороточными белками. В частности, остаточная антигенность ГСБМ составляет около 0.38%, а при включении стадии термообработки – порядка 0.17%. Соотношение ОА(СБМ)/ОА(ГСБМ) достигает значений 265–589, что свидетельствует о глубоком разрушении областей антигенных эпитопов. При этом для β/γ -ЦД-комплексов способность связывать антиген-специфичные антитела достоверно не отличалась от исходного гидролизата (Табл. 2).

В соответствии с итогами оценки антимутагенного действия и антимикробной активности (Табл. 3), ГСБМ снижает уровень индуцированного мутирования *S. typhimurium* TA 98 и TA 100, а также проявляет умеренно выраженное антимикробное действие в отношении *E. coli* ATCC 8739 и *S. aureus* ATCC 6538. Формирование β/γ -ЦД-комплексов сопровождалось сохранением или усилением антимутагенного эффекта и антимикробной активности, особенно для β -ЦД-комплексов, что согласуется с ранее полученными данными для супрамолекулярных комплексов ЦД с пептидами сыворотки и молозива [Halavach *et al.* 2021].

Таблица 3. Антимутагенное и антимикробное действие гидролизата сывороточных белков молока (ГСБМ), β/γ -ЦД и их комплексов с пептидами (ЦД–ГСБМ)

Table 3. Antimutagenic and antimicrobial effects of whey protein hydrolysate (WPH), β/γ -CD, and their peptide complexes (CD–WPH)

Наименование образца	Уровень снижения мутирования*, %		Уровень антимикробного действия в отношении тест-штаммов***, %	
	<i>S. typhimurium</i> TA 98	<i>S. typhimurium</i> TA 100	<i>E. coli</i> ATCC 8739	<i>S. aureus</i> ATCC 6538
ГСБМ*	11.2–19.1 ^{A, I}	10.0–13.9 ^{A, II}	19.4 ^{A, I}	10.6 ^{A, II}
β -ЦД–ГСБМ*	16.4–20.0 ^{A, I}	13.8–17.7 ^{B, II}	27.4 ^{B, I}	15.2 ^{B, II}
γ -ЦД–ГСБМ*	11.0–21.4 ^{A, I}	17.8–26.2 ^{C, II}	18.6 ^{A, I}	11.8 ^{A, II}
β/γ -ЦД (контроль)	0	0	0	0

Примечание: * – вариант технологического процесса № 2 (Рис. 1); ** – 0.03–0.5 мг белка на чашку; *** – содержание белка 0.5 мг/мл. Значения без общего буквенного индекса в пределах одного столбца (A–C) и строки (I, II) указывают на достоверные различия при $p < 0.05$

Note: * – technological process variant No. 2 (Fig. 1); ** – 0.03–0.5 mg protein per plate; *** – protein content of 0.5 mg/mL. Values without a common letter superscript within the same column (A–C) and row (I, II) indicate significant differences at $p < 0.05$

В ранее проведенных исследованиях отмечено выраженное снижение горечи при использовании β -ЦД по сравнению с γ -ЦД [Halavach 2023], что обусловлено размером его гидрофобной полости (максимальный диаметр устья – 0.78 нм), оптимально комплементарной радикалам ароматических и алифатических аминокислот в составе горьких пептидов [Singh *et al.* 2020; Yang *et al.* 2020]. Циклодекстрины маскируют данные участки, включая их в полость и блокируя контакт с соответствующими рецепторами [Singh *et al.* 2020; Poulson *et al.* 2021; Zhou *et al.* 2022]. Большой диаметр полости γ -ЦД (0.95 нм) не обеспечивает достаточной комплементарности для коротких пептидов, тогда как β -ЦД формирует более устойчивые комплексы, что и послужило основанием для его выбора в дальнейших экспериментах.

Таблица 4. Сенсорная оценка интенсивности горечи ГСБМ (вариант 2) и его комплекса с β -ЦД

Table 4. Sensory evaluation of bitterness intensity of WPH (variant 2) and its complex with β -CD

Образец	Соотношение компонентов	Интенсивность горечи, балл	Метод оценки
ГСБМ	ЦД отсутствует	4.5	5-балльная шкала; ранжирование
β -ЦД–ГСБМ	ГСБМ : β -ЦД = 50 : 51	0.5	5-балльная шкала; ранжирование; «А – не А»; «дуо – трио»

Примечание: ГСБМ – гидролизат сывороточных белков молока; β -ЦД – β -циклодекстрин. Расширенная сенсорная оценка выполнена для гидролизата, полученного по варианту 2 технологической схемы (Рис. 1). Интенсивность горечи оценивали по 5-балльной шкале

Note: WPH – whey protein hydrolysate; β -CD – β -cyclodextrin. The extended sensory evaluation was carried out on the hydrolysate produced by technological variant 2 (Fig. 1). The intensity of bitterness was rated on a 5-point scale

Для экспериментального подтверждения эффективности выбранного подхода проведена расширенная сенсорная оценка опытных образцов (Табл. 4). В данном эксперименте использовали ГСБМ, полученный по варианту 2 технологической схемы (Рис. 1). Следует отметить, что оба образца ГСБМ, соответствующие вариантам 1/2, обладали аналогичным уровнем горечи – 4.5 балла по 5-балльной шкале. После образования комплекса с β -ЦД при массовом соотношении ГСБМ : β -ЦД равном 50 : 51 интенсивность горечи снижалась до 0.5 балла, тогда как контрольный образец β -ЦД собственной горечью не обладал.

Так, результаты расширенной сенсорной оценки подтверждают целесообразность выбора β -ЦД для эффективного снижения горечи гидролизатов лактопротеинов. При оптимальном массовом соотношении гидролизат : β -ЦД порядка 50 : 51 интенсивность горечи снижается до уровня, приемлемого для применения в пищевых продуктах (0.5 балла по 5-балльной шкале). При этом согласно полученным данным и опубликованным результатам антиоксидантная, антимуtagenная и антимикробная активность пептидных фракций сохраняется или усиливается, что позволяет рассматривать β -ЦД как эффективный инструмент одновременной коррекции биоактивных свойств и вкусового профиля пептидов лактопротеинов [Singh *et al.* 2020; Halavach *et al.* 2022, 2023; Halavach 2023].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный комплексный биотехнологический подход, включающий расщепление сывороточных белков молока щелочной бактериальной протеазой, мембранное фракционирование и комплексообразование с β - и γ -циклодекстринами, обеспечивает получение низкомолекулярных пептидных фракций с подтвержденной антиоксидантной, антимуtagenной и антимикробной активностью, гипоаллергенными свойствами и улучшенными органолептическими характеристиками. Вклад β -циклодекстрина проявляется как в дополнительном увеличении антиоксидантного потенциала и антимикробного действия включенных пептидов, так и в существенном снижении интенсивности горечи ГСБМ с 4.5 до 0.5 балла по 5-балльной шкале, что особенно важно для практического применения в составе специализированных продуктов питания. Полученные результаты согласуются с современными представлениями о функциональных пептидах лактопротеинов и подтверждают перспективность их использования в составе специализированных пищевых продуктов с антиоксидантными, антимуtagenными и антимикробными свойствами.

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

- Головач Т.Н., Ловкис З.В., Курченко В.П., Янцевич А.В., Тарун Е.И., Дудчик Н.В., Ржепаковский И.В., Лодыгин А.Д. (2024) Биологически активные гидролизаты белков молока и их комплексы включения с циклодекстринами. *Техника и технология пищевых производств*. **54**(3): 461–482. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-3-2521> EDN: RCPBYJ
- Berry S., Sheehy P., Williamson P., Sharp J., Menzies K., Lefèvre C., Digby M., Harland C., Davis S., Snell R. (2020) Chapter 4 - Defining the origin and function of bovine milk proteins through genomics: The biological implications of manipulation and modification. In: Boland M., Singh H. (eds.) *Milk Proteins* (3 ed.). Academic Press: 143–171. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815251-5.00004-9> EDN: YVMZJB
- Dullius A., Goettert M.I., de Souza C.F.V. (2018) Whey protein hydrolysates as a source of bioactive peptides for functional foods – Biotechnological facilitation of industrial scale-up. *Journal of Functional Foods*. **42**: 58–74. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.12.063> EDN: VDZYLA
- Halavach T. (2023) Taste quality of β / γ -cyclodextrin nanocomplexes with whey and colostrum peptides. *AIP Conference Proceedings*. **2931**(1): 060006. <https://doi.org/10.1063/5.0177511>
- Halavach T.M. (2024) Efficient enzymatic hydrolysis of the whey protein fraction from bovine milk. *Journal of Global Innovations in Agricultural Sciences*. **12**(3): 743–749. <https://doi.org/10.22194/JGIAS/24.1362> EDN: GOYZSE
- 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., Tarun E.I., Yantsevich A. V., Shchur V. V., Tsygankow V.G., Lodygin A.D., Evdokimov I.A., Poklar Ulrih N. (2024) Effect of hydrolysis degree with Alcalase on antioxidant and antigenic properties of whey and colostrum protein hydrolysates. *Journal of Agriculture and Food Research*. **15**: 100975. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.100975> EDN: SKOZRU
- Halavach T.M., Kurchenko V.P., Tsygankow V.G., Bondaruk A.M., Tarun E.I., Asafov V.A. (2022) 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
- Halavach T.M., Savchuk E.S., Bobovich A.S., Dudchik N. V., Tsygankow V.G., Tarun E.I., Yantsevich A. V., Kurchenko V.P., Kharitonov V.D., Asafov V.A. (2021) Antimutagenic and antibacterial activity of β -cyclodextrin clathrates with extensive hydrolysates of colostrum and whey. *Biointerface Research in Applied Chemistry*. **11**(2): 8626–8638. <https://doi.org/10.33263/BRIAC112.86268638> EDN: KKJOZK
- Jo Y.-J., Cho H.-S., Chun J.-Y. (2021) Antioxidant activity of β -cyclodextrin inclusion complexes containing trans-cinnamaldehyde by DPPH, ABTS and FRAP. *Food Science and Biotechnology*. **30**(6): 807–814. <https://doi.org/10.1007/s10068-021-00914-y> EDN: LVWNUM
- Milessi T.S., Lopes L.A., Novelli P.K., Tardioli P.W., Giordano R.L.C. (2022) Improvement of functional properties of cow's milk peptides through partial proteins hydrolysis. *Journal of Food Science and Technology*. **59**(11): 4520–4529. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05533-x> EDN: YJPVUX
- Najafian L. (2023) A review of bioactive peptides as functional food ingredients: mechanisms of action and their applications in active packaging and food quality improvement. *Food & Function*. **14**(13): 5835–5857. <https://doi.org/10.1039/D3FO00362K> EDN: MHBBBG
- Poulson B.G., Alsulami Q.A., Sharfalddin A., El Agammy Emam.F., Mouffouk F., Emwas A.-H., Jaremko L., Jaremko M. (2021) Cyclodextrins: Structural, chemical, and physical properties, and applications. *Polysaccharides*. **3**(1): 1–31. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides3010001> EDN: DMIZDK
- Rivero-Pino F., Villanueva Á., Montserrat-de-la-Paz S., Sanchez-Fidalgo S., Millán-Linares M.C. (2023) Evidence of immunomodulatory food-protein derived peptides in human nutritional interventions: Review on the outcomes and potential limitations. *Nutrients*. **15**(12): 2681. <https://doi.org/10.3390/nu15122681> EDN: AEGVAG
- Singh A., Idowu A.T., Benjakul S., Kishimura H., Aluko R.E., Kumagai Y. (2020) Debittering of salmon (*Salmo salar*) frame protein hydrolysate using 2-butanol in combination with β -cyclodextrin: Impact on some physicochemical characteristics and antioxidant activities. *Food Chemistry*. **321**: 126686. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126686> EDN: KMIEEG
- Yang P., Liu C., Song H., Wang L., Wang X., Hua J. (2020) Sensory-directed flavor analysis of off-flavor compounds in infant formula with deeply hydrolyzed milk protein and their possible sources. *LWT*. **119**: 108861. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108861> EDN: KVEYEE
- Zhou J., Jia J., He J., Li J., Cai J. (2022) Cyclodextrin inclusion complexes and their application in food safety analysis: recent developments and future prospects. *Foods*. **11**(23): 3871. <https://doi.org/10.3390/foods11233871> EDN: FDXXHZ

REFERENCES

- Halavach T.M., Lovkis Z.V., Kurchenko V.P., Yantsevich A.V., Tarun E.I., Dudchik N.V., Rzhepakovsky I.V., Lodygin A.D. (2024) Biologically Active Dairy Protein Hydrolysates and Their Cyclodextrin Inclusion Complexes: Biotechnological Aspects of Production. *Food Processing: Techniques and Technology*. **54**(3): 461–482. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-3-2521> EDN: RCPBYJ (in Russian)
- Berry S., Sheehy P., Williamson P., Sharp J., Menzies K., Lefèvre C., Digby M., Harland C., Davis S., Snell R. (2020) Chapter 4 - Defining the origin and function of bovine milk proteins through genomics: The biological implications of manipulation and modification. In: Boland M., Singh H. (eds.) *Milk Proteins* (3 ed.). Academic Press: 143–171. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815251-5.00004-9> EDN: YVMZIB
- Dullius A., Goetttert M.I., de Souza C.F.V. (2018) Whey protein hydrolysates as a source of bioactive peptides for functional foods – Biotechnological facilitation of industrial scale-up. *Journal of Functional Foods*. **42**: 58–74. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.12.063> EDN: VDZYLA
- Halavach T. (2023) Taste quality of β/γ -cyclodextrin nanocomplexes with whey and colostrum peptides. *AIP Conference Proceedings*. **2931**(1): 060006. <https://doi.org/10.1063/5.0177511>

- Halavach T.M. (2024) Efficient enzymatic hydrolysis of the whey protein fraction from bovine milk. *Journal of Global Innovations in Agricultural Sciences*. **12**(3): 743–749. <https://doi.org/10.22194/JGIAS/24.1362> EDN: GOYZSE
- 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., Tarun E.I., Yantsevich A. V., Shchur V. V., Tsygankow V.G., Lodygin A.D., Evdokimov I.A., Poklar Ulrih N. (2024) Effect of hydrolysis degree with Alcalase on antioxidant and antigenic properties of whey and colostrum protein hydrolysates. *Journal of Agriculture and Food Research*. **15**: 100975. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.100975> EDN: SKOZRU
- Halavach T.M., Kurchenko V.P., Tsygankow V.G., Bondaruk A.M., Tarun E.I., Asafov V.A. (2022) 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
- Halavach T.M., Savchuk E.S., Bobovich A.S., Dudchik N. V., Tsygankow V.G., Tarun E.I., Yantsevich A. V., Kurchenko V.P., Kharitonov V.D., Asafov V.A. (2021) Antimutagenic and antibacterial activity of β -cyclodextrin clathrates with extensive hydrolysates of colostrum and whey. *Biointerface Research in Applied Chemistry*. **11**(2): 8626–8638. <https://doi.org/10.33263/BRIAC112.86268638> EDN: KKJOZK
- Jo Y.-J., Cho H.-S., Chun J.-Y. (2021) Antioxidant activity of β -cyclodextrin inclusion complexes containing trans-cinnamaldehyde by DPPH, ABTS and FRAP. *Food Science and Biotechnology*. **30**(6): 807–814. <https://doi.org/10.1007/s10068-021-00914-y> EDN: LVWNUM
- Milessi T.S., Lopes L.A., Novelli P.K., Tardioli P.W., Giordano R.L.C. (2022) Improvement of functional properties of cow's milk peptides through partial proteins hydrolysis. *Journal of Food Science and Technology*. **59**(11): 4520–4529. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05533-x> EDN: YJPVUX
- Najafian L. (2023) A review of bioactive peptides as functional food ingredients: mechanisms of action and their applications in active packaging and food quality improvement. *Food & Function*. **14**(13): 5835–5857. <https://doi.org/10.1039/D3FO00362K> EDN: MHBBBG
- Poulson B.G., Alsulami Q.A., Sharfalddin A., El Agammy Emam.F., Mouffouk F., Emwas A.-H., Jaremko L., Jaremko M. (2021) Cyclodextrins: Structural, chemical, and physical properties, and applications. *Polysaccharides*. **3**(1): 1–31. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides3010001> EDN: DMIZDK
- Rivero-Pino F., Villanueva Á., Montserrat-de-la-Paz S., Sanchez-Fidalgo S., Millán-Linares M.C. (2023) Evidence of immunomodulatory food-protein derived peptides in human nutritional interventions: Review on the outcomes and potential limitations. *Nutrients*. **15**(12): 2681. <https://doi.org/10.3390/nu15122681> EDN: AEGVAG
- Singh A., Idowu A.T., Benjakul S., Kishimura H., Aluko R.E., Kumagai Y. (2020) Debittering of salmon (*Salmo salar*) frame protein hydrolysate using 2-butanol in combination with β -cyclodextrin: Impact on some physicochemical characteristics and antioxidant activities. *Food Chemistry*. **321**: 126686. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126686> EDN: KMIEEG
- Yang P., Liu C., Song H., Wang L., Wang X., Hua J. (2020) Sensory-directed flavor analysis of off-flavor compounds in infant formula with deeply hydrolyzed milk protein and their possible sources. *LWT*. **119**: 108861. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108861> EDN: KVEYEE
- Zhou J., Jia J., He J., Li J., Cai J. (2022) Cyclodextrin inclusion complexes and their application in food safety analysis: recent developments and future prospects. *Foods*. **11**(23): 3871. <https://doi.org/10.3390/foods11233871> EDN: FDXXHZ

Цитировать как

Головач Т.Н., Курченко В.П., Тарун Е.И., Дудчик Н.В., Ржепаковский И.В. (2026). Биоактивные супрамолекулярные комплексы включения циклодекстринов с пептидами сывороточных белков молока. *Экобиотех.* **9**(3): 345–353.
DOI: <http://doi.org/10.31163/2618-964X/2026-26>
EDN: <https://www.elibrary.ru/fucvey>

Cited as

Halavach T.M., Kurchenko V.P., Tarun E.I., Dudchik N.V., Rzhepakovsky I.V. (2026). Bioactive supramolecular inclusion complexes of cyclodextrins with whey protein peptides. *Ecobiotech.* **9**(3): 345–353.
DOI: <http://doi.org/10.31163/2618-964X/2026-26>
EDN: <https://www.elibrary.ru/fucvey>

Сведения об авторах

Головач Татьяна Николаевна, к.б.н., доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории прикладных проблем биологии, биологический факультет, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь. E-mail: halavachtn@gmail.com, [SPIN: 2133-1933](#), [WoS Researcher ID: AAE-7947-2021](#), [ORCID: 0000-0002-2096-8030](#), [Scopus Author ID: 57190978534](#).

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

Тарун Екатерина Ивановна, к.х.н., доцент, доцент кафедры экологической химии и биохимии факультета экологической медицины, Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь. E-mail: ktarun@tut.by, [SPIN: 9692-3530](#), [ORCID: 0000-0001-5711-6037](#), [Scopus Author ID: 6603404269](#).

Дудчик Наталья Владимировна, д.б.н., профессор, главный научный сотрудник РУП «Научно-практический центр гигиены», Минск, Беларусь. E-mail: n_dudchik@mail.ru, [SPIN: 8438-1266](#), [WoS Researcher ID: JVN-8173-2024](#), [ORCID: 0000-0002-5877-9307](#), [Scopus Author ID: 7801566515](#).

Ржепаковский Игорь Владимирович, к.б.н., доцент, ведущий научный сотрудник межкафедральной научно-образовательной лаборатории экспериментальной иммуноморфологии, иммунопатологии и иммунобиотехнологии медико-биологического факультета, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия. E-mail: 78igorr@mail.ru, [SPIN: 4406-8285](#), [WoS Researcher ID: G-5660-2015](#), [ORCID: 0000-0002-2632-8923](#), [Scopus Author ID: 56465946800](#).

Information About the Authors

Tatsiana M. Halavach, PhD in Biological Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of the Research Laboratory of Applied Biology, Faculty of Biology, Belarusian State University, Minsk, Belarus. E-mail: halavachtn@gmail.com, [SPIN: 2133-1933](#), [WoS Researcher ID: AAE-7947-2021](#), [ORCID: 0000-0002-2096-8030](#), [Scopus Author ID: 57190978534](#).

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

Ekaterina I. Tarun, PhD in Chemical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Environmental Chemistry and Biochemistry, Faculty of Environmental Medicine, International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Minsk, Belarus. E-mail: ktarun@tut.by, [SPIN: 9692-3530](#), [ORCID: 0000-0001-5711-6037](#), [Scopus Author ID: 6603404269](#).

Natalia V. Dudchik, Dr in Biological Sciences, Professor, Chief Researcher, Scientific and Practical Centre of Hygiene, Minsk, Belarus. E-mail: n_dudchik@mail.ru, [SPIN: 8438-1266](#), [WoS Researcher ID: JVN-8173-2024](#), [ORCID: 0000-0002-5877-9307](#), [Scopus Author ID: 7801566515](#).

Igor V. Rzhepakovsky, PhD in Biological Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of the Interdepartmental Scientific and Educational Laboratory of Experimental Immunomorphology, Immunopathology and Immunobiotechnology, Faculty of Medicine and Biology, North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia. E-mail: 78igorr@mail.ru, [SPIN: 4406-8285](#), [WoS Researcher ID: G-5660-2015](#), [ORCID: 0000-0002-2632-8923](#), [Scopus Author ID: 56465946800](#).