

УДК 547.458.6+637.144.5+543.426

КОМПЛЕКСЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ЦИКЛОДЕКСТРИНА С ПЕПТИДАМИ СЫВОРОТОЧНЫХ БЕЛКОВ МОЛОКА: ХАРАКТЕРИСТИКА АНТИОКСИДАНТНОЙ АКТИВНОСТИ

Т. Н. ГОЛОВАЧ¹⁾, Е. И. ТАРУН²⁾,
В. Г. ЦЫГАНКОВ³⁾, А. Д. БУТИНА¹⁾, В. П. КУРЧЕНКО¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

²⁾Международный государственный экологический институт

им. А. Д. Сахарова БГУ, ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь

³⁾Научно-практический центр гигиены, ул. Академическая, 8, 220012, г. Минск, Беларусь

Проведен сравнительный анализ органолептических и антиоксидантных свойств клатратов β-циклодекстрина с пептидами сывороточных белков молока. Согласно данным термогравиметрического анализа, подтверждено образование комплексов включения и установлено увеличение термостабильности пептидов в составе клатратов. Показано снижение горечи экспериментальных образцов комплексов на 20–70 % и возрастание антирадикальной активности в 1,3–1,6 раза по сравнению с исходным гидролизатом. При повышении температуры комплексообразования с 25 до 50 °С наблюдалось увеличение антиоксидантного эффекта и улучшение органолептических

Образец цитирования:

Головач ТН, Тарун ЕИ, Цыганков ВГ, Бутина АД, Курченко ВП. Комплексы включения циклодекстрина с пептидами сывороточных белков молока: характеристика антиоксидантной активности. *Журнал Белорусского государственного университета. Биология.* 2018;3:3–13.

For citation:

Halavach TM, Tarun EI, Zhygankov VG, Butina AD, Kurchenko VP. Inclusion complexes of cyclodextrin with whey peptides: characteristic of antioxidant activity. *Journal of the Belarusian State University. Biology.* 2018;3:3–13. Russian.

Авторы:

Татьяна Николаевна Головач – кандидат биологических наук; старший научный сотрудник лаборатории прикладных проблем биологии биологического факультета.

Екатерина Ивановна Тарун – кандидат химических наук, доцент; доцент кафедры экологической химии и биохимии факультета экологической медицины.

Василий Георгиевич Цыганков – кандидат медицинских наук, доцент; ведущий научный сотрудник лаборатории комплексных проблем гигиены пищевых продуктов.

Анастасия Дмитриевна Бутина – студентка биологического факультета. Научный руководитель – Т. Н. Головач.

Владимир Петрович Курченко – кандидат биологических наук, доцент; заведующий лабораторией прикладных проблем биологии биологического факультета.

Authors:

Tatsiana M. Halavach, PhD (biology); senior researcher at the laboratory of applied biology, faculty of biology.

halavachtn@gmail.com

Ekaterina I. Tarun, PhD (chemistry), docent; associate professor at the department of environmental chemistry and biochemistry, faculty of environmental medicine.

ktarun@tut.by

Vasily G. Zhygankov, PhD (medicine), docent; leading researcher at the laboratory of complex problems of food hygiene.

vgz@tut.by

Anastasia D. Butina, student at the faculty of biology.

nastuha-24@mail.ru

Vladimir P. Kurchenko, PhD (biology), docent; head of the laboratory of applied biology, faculty of biology.

kurchenko@tut.by

свойств клатратов. Перспективным является использование гидролизатов белков молока с выраженным горьким вкусом в составе биологически активных комплексов включения с β -циклодекстрином, обладающих приемлемыми органолептическими свойствами и высоким антиоксидантным потенциалом.

Ключевые слова: гидролизат сывороточных белков; горечь пептидов; β -циклодекстрин; клатраты циклодекстрина с пептидами; термогравиметрия; органолептические свойства; антиоксидантная активность.

INCLUSION COMPLEXES OF CYCLODEXTRIN WITH WHEY PEPTIDES: CHARACTERISTIC OF ANTIOXIDANT ACTIVITY

T. M. HALAVACH^a, E. I. TARUN^b,
V. G. ZHYGANKOV^c, A. D. BUTINA^a, V. P. KURCHENKO^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^bInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus

^cScientific Practical Centre of Hygiene, 8 Akademičnaja Street, Minsk 220012, Belarus

Corresponding author: T. M. Halavach (halavachtn@gmail.com)

A comparative analysis of organoleptic and antioxidant properties of β -cyclodextrin clathrates with peptides of whey proteins was carried out. According to the data of thermogravimetric analysis the formation of inclusion complexes was confirmed and the increase in thermal stability of peptides in composition of clathrates was established. The reduction in bitter taste of the experimental complexes by 20–70 % and the increase in antiradical activity in 1.3–1.6 times compared to initial hydrolysate was shown. With the raise in complexation temperature from 25 to 50 °C the increase in antioxidant effect and the improvement in organoleptic properties of clathrates were achieved. Perspective is the use of milk protein hydrolysates with pronounced bitter taste in the composition of biologically active inclusion complexes with β -cyclodextrin which have acceptable organoleptic properties and high antioxidant potential.

Key words: whey protein hydrolysates; bitter peptides; β -cyclodextrin; cyclodextrin clathrates with peptides; thermogravimetry; organoleptic properties; antioxidant activity.

Введение

Гидролизованные белки молока характеризуются высокой функциональной ценностью в связи с содержанием пептидов, обладающих биологически активными свойствами (иммуномодулирующим, гипотензивным, антиоксидантным, антимикробным и другими действиями) [1]. Вместе с тем гидролизаты имеют специфический горький вкус, который обусловлен наличием в пептидах определенных аминокислот (фенилаланин, триптофан, тирозин, изолейцин, пролин и гистидин) [2–4].

Предложены различные способы снижения горечи белковых гидролизатов: хроматография гидрофобного взаимодействия [5], обработка активированным углем [6], расщепление специфическими пептидазами [7; 8], изоэлектрическая преципитация и др. [9]. Основными недостатками данных методов считаются снижение количества незаменимых аминокислот, возрастание осмолярности продукта, высокая стоимость, низкая эффективность некоторых ферментативных реакций в промышленном масштабе, токсичность ряда органических растворителей, образование большого объема побочных продуктов производства. Востребованными являются новые подходы, обеспечивающие сохранность биологически активных компонентов и улучшение их органолептических свойств.

Циклодекстрины (ЦД), или циклические олигосахариды, обладают специфической конусообразной пространственной структурой, включающей гидрофобную полость, что обуславливает способность формировать комплексы включения (клатраты) с различными соединениями [10; 11]. Для клатратов показана повышенная растворимость, устойчивость к химическим и физическим факторам, лучшая переносимость и биодоступность в отличие от исходных лекарственных средств [12].

Согласно данным литературы, образование комплексов ЦД с пептидами и аминокислотами, для которых характерен выраженный горький вкус, приводит к улучшению их органолептических показателей [13–16]. Формирование комплексов включения α -ЦД (6 глюкопиранозных остатков, объединенных α -(1,4)-связями) с аминокислотами гидролизованных белков сои было подтверждено с применением техник ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [15]. Установлено, что сродство аминокислот с полостью ЦД убывает в последовательности: фенилаланин \approx триптофан > пролин > изолейцин \approx тирозин \approx гистидин. Внесение α -ЦД обусловило улучшение органолептических свойств как растворов чистых аминокислот, так и белкового гидролизата сои. Наряду с этим изучено формирование комплексов с β -ЦД (7 глюкопиранозных остатков) [16]. Для тестируемых аминокислот показано снижение сродства к β -ЦД в ряду: трип-

тофан > тирозин > фенилаланин > пролин > гистидин > изолейцин. Комплексообразование с β -ЦД привело к уменьшению горечи чистых аминокислот, а также пептидов сои. Ощущение горечи было снижено на 90 % при внесении 5 % β -ЦД, в связи с чем данный циклический олигосахарид рекомендован в качестве перспективной добавки для маскирования горького вкуса новых функциональных продуктов питания.

Эффективная защита от окислительного стресса обеспечивается различными антиоксидантами, которые препятствуют распространению окислительных реакций [17]. По данным литературы изучена антиоксидантная активность (АОА) природных веществ и их комплексов включения с ЦД [18–23]. В частности, с применением ЯМР-анализа показано образование комплексов рутина с α -, β -ЦД и его производными; в тест-системе 2,2'-азино-бис-3-этилбензтиазолино-6-сульфоновая кислота – Тролокс для полученных образцов установлено возрастание АОА за счет увеличения стабильности рутина в составе ЦД [18]. Напротив, при восстановлении 2,2-дифенил-1-пикрилгидразил (DPPH)-радикала обнаружено незначительное увеличение антирадикальных свойств клатратов ЦД (β -ЦД и гидроксипропил- β -ЦД) с ресвератролом наряду с возрастанием растворимости исследуемого соединения [19]. Для увеличения биодоступности высокоактивного природного антиоксиданта куркумина также получают наноструктуры с ЦД [20]. В тест-системе с DPPH-радикалом показано четырехкратное возрастание АОА клатратов β -ЦД с катехином по сравнению с чистым веществом [21]. Для кофейной кислоты в реакции с DPPH-радикалом установлена большая АОА в комплексе с α -ЦД, чем с β -ЦД [22]. Различные радикалвосстанавливающие свойства выявлены для изомеров кумаровой кислоты в составе клатратов β -ЦД [23].

Известно, что антиоксидантная активность белков и их производных связана с восстанавливающими свойствами аминокислотных радикалов метионина, гистидина, триптофана и тирозина [24; 25]. Согласно литературным источникам, образование клатратов с ЦД приводит к уменьшению горечи аминокислот и пептидов [13–16], в то же время не установлено влияние комплексообразования на их антирадикальную активность. Актуальность работы связана с получением комплексов включения ЦД с пептидами молока как компонента специализированных продуктов питания, определением органолептических и биологически активных свойств клатратов.

Цель исследования – изучение биологически активных комплексов включения β -ЦД с пептидами сывороточных белков молока. Объекты исследования – экспериментальные образцы клатратов β -ЦД с пептидами сывороточной фракции молока. Предмет исследования – органолептические и антиоксидантные свойства полученных клатратов.

Материалы и методы исследования

В исследовании применяли β -ЦД производства *Roquette* (Франция), гидролизат белков молочной сыворотки *Peptigen IF 3080 WPH* производства *Arla Foods Ingredients Group* (Дания) с массовой долей белка 80 % и степенью гидролиза 22–28 %, содержащий до 99,9 % фракции с молекулярной массой менее 10 кДа.

Готовили 2 серии растворов, содержащих 3 % β -ЦД и 5 % пептидов (1-я серия), 5 % β -ЦД и 5 % пептидов (2-я серия). Полученные растворы циклического олигосахаридов и гидролизата инкубировали в течение 4 ч при температуре 25 и 50 °С в условиях постоянного перемешивания (200 об/мин). Оценку органолептических свойств жидких экспериментальных образцов проводили согласно методике, описанной в [16]. При дегустации 5 % раствор гидролизата сывороточных белков молока использовали в качестве контроля. Для последующего анализа образцы клатратов лиофильно высушивали при температуре –53 °С, давлении 0,1 атм в течение 24–48 ч.

Для ВЭЖХ-анализа применяли хроматограф *Agilent 1100* производства *Agilent* (США), разделение белков и пептидов молока проводили на колонке *Zorbax-300SB C8* (4,6 × 250,0 мм, 5 мкм) производства *Agilent* (США) в соответствии с методикой, представленной в [26]. Молекулярно-массовый состав гидролизата сывороточных белков молока изучали с помощью прибора *Bruker Microflex* производства *Bruker* (США).

Определение параметров термической деструкции экспериментальных образцов клатратов β -ЦД с пептидами осуществляли с использованием термогравиметрического анализа (ТГА) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на приборе *TGA/DSC1 (Mettler Toledo, Швейцария)*. Расчет эффективной энергии активации E_a проводили в соответствии с методом Бройдо по кривым ТГА [27]. Навеска материала составляла 20 мг, разрешение 1 мкг; ТГА/ДСК-анализ выполняли в температурном диапазоне 30–600 °С, скорость подъема температуры 5 °С/мин, точность ± 2 °С. В качестве контрольных использовали чистые вещества (пептиды и β -ЦД) и механические смеси гидролизата и β -ЦД в массовом соотношении 5 : 3 и 1 : 1.

АОА экспериментальных образцов клатратов оценивали с применением флуориметрического метода (*Oxygen Radical Absorbance Capacity, ORAC*), основанного на подавлении флуоресценции флуоресцеина (ФЛ) в результате его окисления кислородными радикалами и ингибирования этого процесса антиоксидантами. В настоящей работе использовали методику, описанную в [28]. Результаты 3 независимых

опытов представлены как среднее арифметическое значение \pm доверительный интервал. Достоверность различий между выборками экспериментальных данных определяли методом доверительных интервалов.

Результаты и их обсуждение

Для получения клатратов с β -ЦД применяли гидролизат сывороточных белков молока Peptigen IF 3080 WRH. По результатам ВЭЖХ (рис. 1) он содержит пептидную фракцию с молекулярной массой менее 10 кДа, что подтверждено данными масс-спектрометрического анализа и соответствует показателям, заявленным изготовителем.

В связи с относительно высокой степенью гидролиза белковых субстратов для данного образца характерен выраженный горький вкус. С целью улучшить органолептические свойства получены комплексы включения β -ЦД с пептидами сывороточных белков молока согласно представленной выше методике. В настоящем исследовании установлено влияние комплексообразования с β -ЦД на органолептические показатели и антиоксидантную активность гидролизата Peptigen IF 3080 WRH.

Согласно экспериментальным данным, гидролизат сывороточных белков (ГСБ) хорошо растворим при 25 °С и обладает выраженной горечью (10 баллов) (рис. 2). Инкубирование пептидов с β -ЦД при 25 °С обусловило изменение вкуса до умеренно горького (6–8 баллов) наряду с частичным растворением циклического олигосахарида. Предварительное нагревание раствора β -ЦД и последующее инкубирование с гидролизатом при 50 °С обеспечили возрастание растворимости олигосахарида и значительное уменьшение горечи пептидов (3–4 балла, или 30–40 % по сравнению с контрольным образцом гидролизата).

Для подтверждения образования клатратов β -ЦД с пептидами использовали ТГА/ДСК-анализ. Принцип ДСК заключается в фиксации изменения энтальпии системы во времени при увеличении температуры в определенном диапазоне с установленной скоростью. ТГА основан на фиксации изменения массы исследуемого образца при аналогичном изменении температуры. Результаты ТГА представлены в виде кривой потери массы (термогравиметрия, ТГ/TG) и кривой скорости v изменения массы образца в зависимости от температуры системы (дифференциальная термогравиметрия, ДТГ/DTG). Для каждого образца установлены стадии термического разложения в условиях программируемого нагрева от 30 до 600 °С со скоростью 5 °С/мин.

В табл. 1 приведена сравнительная характеристика параметров термического разложения чистых веществ (гидролизат, циклический олигосахарид), механических смесей чистых веществ и клатратов по данным ДТГ/ТГ-профилей. Так, для образца β -ЦД характерен пик потери массы при 304,6 °С с максимумом скорости термодеструкции, составляющим 0,65 мг/°С. В случае гидролизата сывороточных белков выявлены многочисленные пики разложения с максимумами скорости потери массы при 202,2; 300,3 и 477,5 °С (0,040; 0,065 и 0,14 мг/°С соответственно).

Таблица 1

Сравнительный анализ параметров термического разложения контрольных образцов и клатратов согласно данным ДТГ/ТГ-профилей (в области доминирующего пика, соответствующего термодеструкции β -ЦД)

Table 1

Comparative analysis of thermal decomposition parameters of control samples and clathrates according to data of DTG/TG-profiles (in region of dominant peak corresponding to thermal degradation of β -CD)

Образец	Температура максимальной скорости деструкции $T_{v_{max}}$, °С	Максимальная скорость деструкции v_{max} , мг/°С	Количество образца в системе при $T_{v_{max}}$, % от исходного содержания	Энергия активации E_a , кДж/моль
ГСБ (контроль)	300,3	0,065	65,5	47
β -ЦД (контроль)	304,6	0,65	58,7	357
Механическая смесь (ГСБ : β -ЦД = 5 : 3)	321,3	0,17	57,3	80
5 % ГСБ + 3 % β -ЦД (25 °С)*	309,0	0,12	63,0	70
5 % ГСБ + 3 % β -ЦД (50 °С)*	310,4	0,13	62,9	72
Механическая смесь (ГСБ : β -ЦД = 1 : 1)	315,6	0,15	58,9	82
5 % ГСБ + 5 % β -ЦД (25 °С)*	304,9	0,24	61,1	94
5 % ГСБ + 5 % β -ЦД (50 °С)*	301,8	0,17	62,7	85

*Температура образования комплекса.

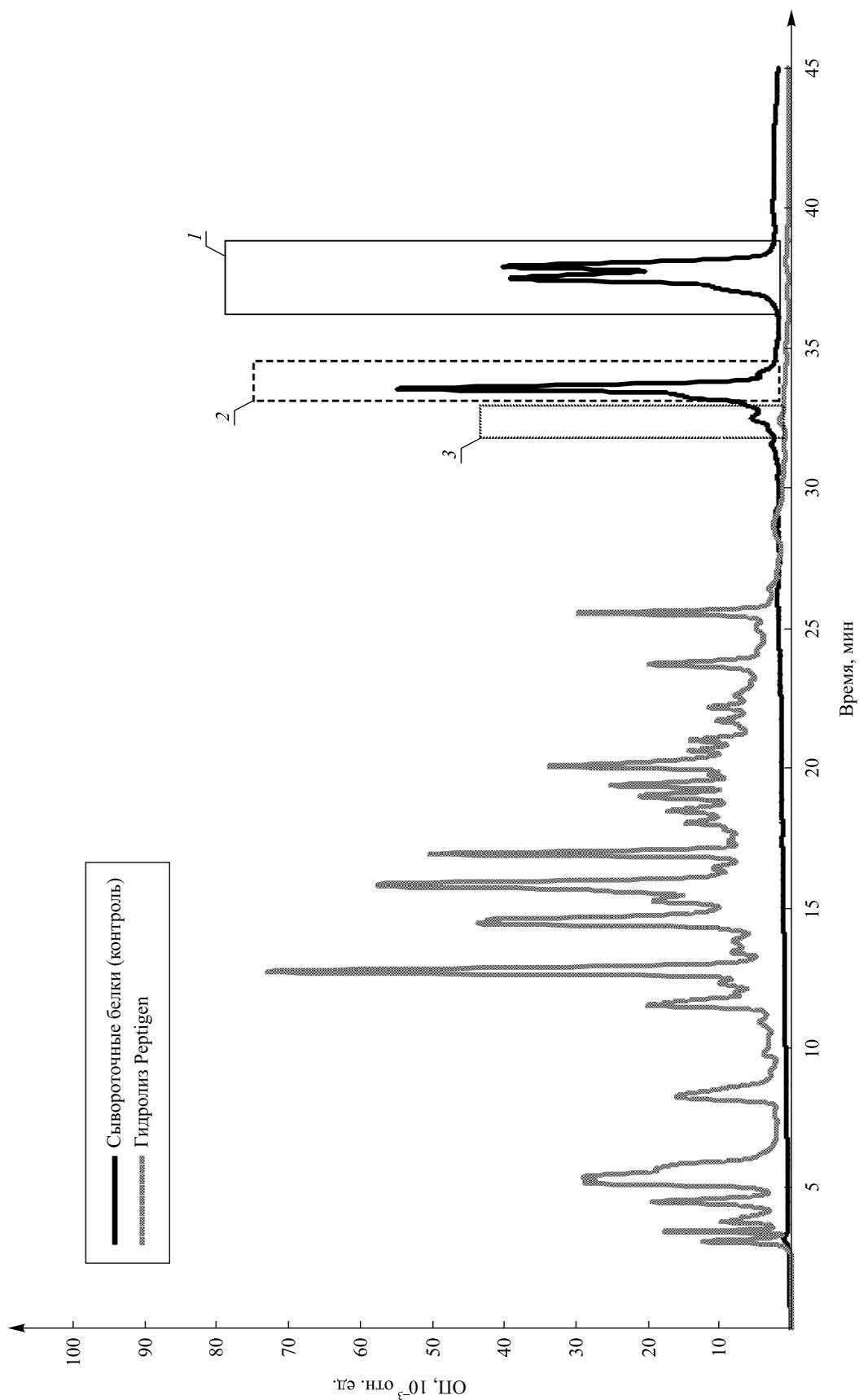


Рис. 1. ВЭЖХ-профиль гидролизата Рертиген IF 3080 WPH.

1 – генетические варианты β-лактоглобулина (А и В); 2 – α-лактальбумин; 3 – бычий сывороточный альбумин

Fig. 1. HPLC-profile of hydrolysate Рerтиген IF 3080 WPH.

1 – genetic variants of β-lactoglobulin (A and B); 2 – α-lactalbumin; 3 – bovine serum albumin

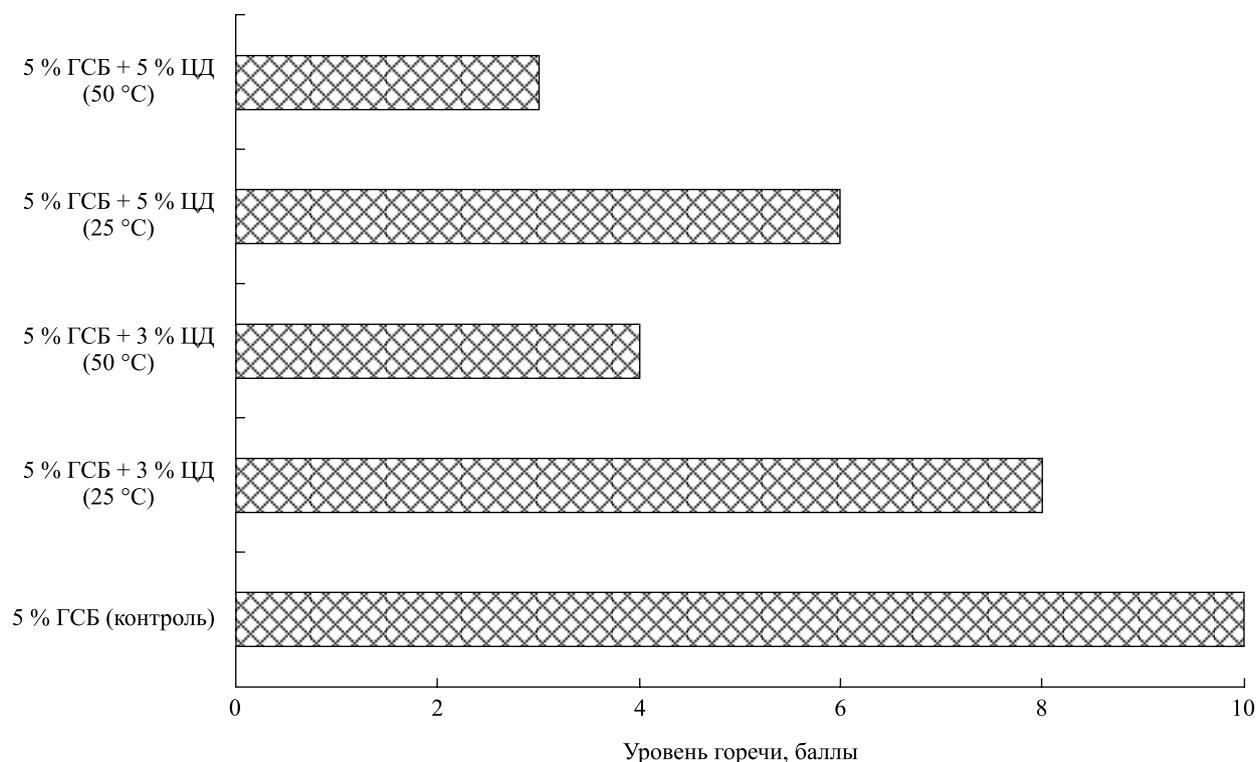


Рис. 2. Органолептические свойства водных растворов опытных образцов клатратов β -ЦД с пептидами сывороточных белков молока
Fig. 2. Organoleptic properties of aqueous solutions containing experimental samples of β -CD clathrates with peptides of whey proteins

ДТГ-профили механических смесей гидролизата с β -ЦД (1 : 1 и 5 : 3) представляют собой наложение пиков потери массы индивидуальных соединений (рис. 3). Установлено смещение пика термодеструкции циклического олигосахарида с 304,6 до 315,6 и 321,3 °C при соотношении между гидролизатом и β -ЦД, равном 1 : 1 и 5 : 3 соответственно.

В образцах клатратов сохраняется доминирующий пик термодеструкции β -ЦД со смещением и изменением его конфигурации, тогда как практически не выявляются пики разложения, характерные для смеси пептидов, что подтверждает образование комплексов включения. Кроме того, на ДСК-профилях образцов клатратов обнаружены экзотермические пики в температурном диапазоне 310,0–322,2 °C, не свойственные для механических смесей.

В случае клатратов, полученных при смешивании компонентов в соотношении 1 : 1, с увеличением температуры образования комплексов включения с 25 до 50 °C показано уширение пика термодеструкции β -ЦД и снижение скорости потери массы образца с 0,24 до 0,17 мг/°C (см. рис. 3, а), а следовательно, возрастание устойчивости соответствующего образца к термодеструкции.

ДТГ/ТГ/ДСК-профили клатратов, изготовленных в результате смешивания компонентов в соотношении 5 : 3 при температуре 25 и 50 °C, были сопоставимы. Вместе с тем для данных образцов комплексов по сравнению с соответствующей механической смесью (соотношение 5 : 3) установлено уменьшение температуры максимальной скорости плавления с 321,3 до 309,0–310,4 °C и снижение скорости термодеструкции с 0,17 до 0,12–0,13 мг/°C (см. рис. 3, б).

Следует отметить уменьшение потери массы комплексов на 5,6–5,7 и 2,2–3,8 % для образцов, полученных при соотношении компонентов 5 : 3 и 1 : 1 соответственно, по сравнению с механическими смесями (см. табл. 1). Это обусловлено как снижением количества воды в образцах, так и защитным эффектом комплексообразования, который более выражен в образцах, содержащих пептиды и β -ЦД в соотношении 5 : 3.

Энергия активации E_a гидролизата и β -ЦД составила 47 и 357 кДж/моль соответственно, тогда как для механических смесей она была равна 80–82 кДж/моль. В то же время E_a образцов клатратов, полученных при соотношении компонентов 5 : 3, достигала 70–72 кДж/моль, а клатратов с содержанием компонентов 1 : 1 составляла 85–94 кДж/моль. В целом для механических смесей и клатратов показано увеличение E_a по сравнению с образцом гидролизата, а следовательно, наблюдается стабилизация смеси пептидов в составе механических смесей и комплексов включения с β -ЦД.

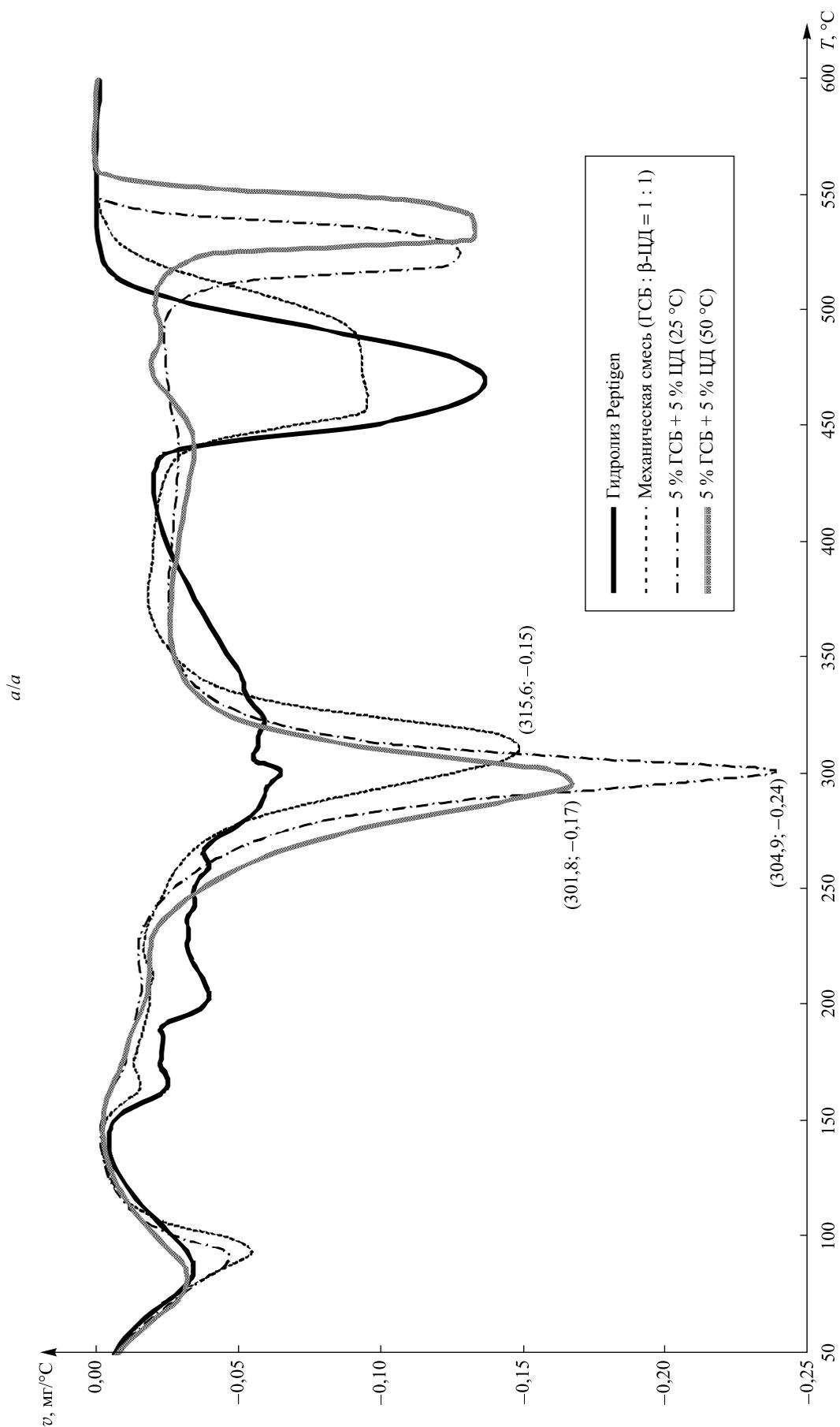


Рис. 3. ДТТ-профили контрольных и опытных образцов, полученных при соотношении ГСБ и β -ЦД, равном 1 : 1 (а) (начало)

Fig. 3. DTG-profiles of control and test samples obtained with the ratio of WPH and β -CD equal to 1 : 1 (a) (beginning)

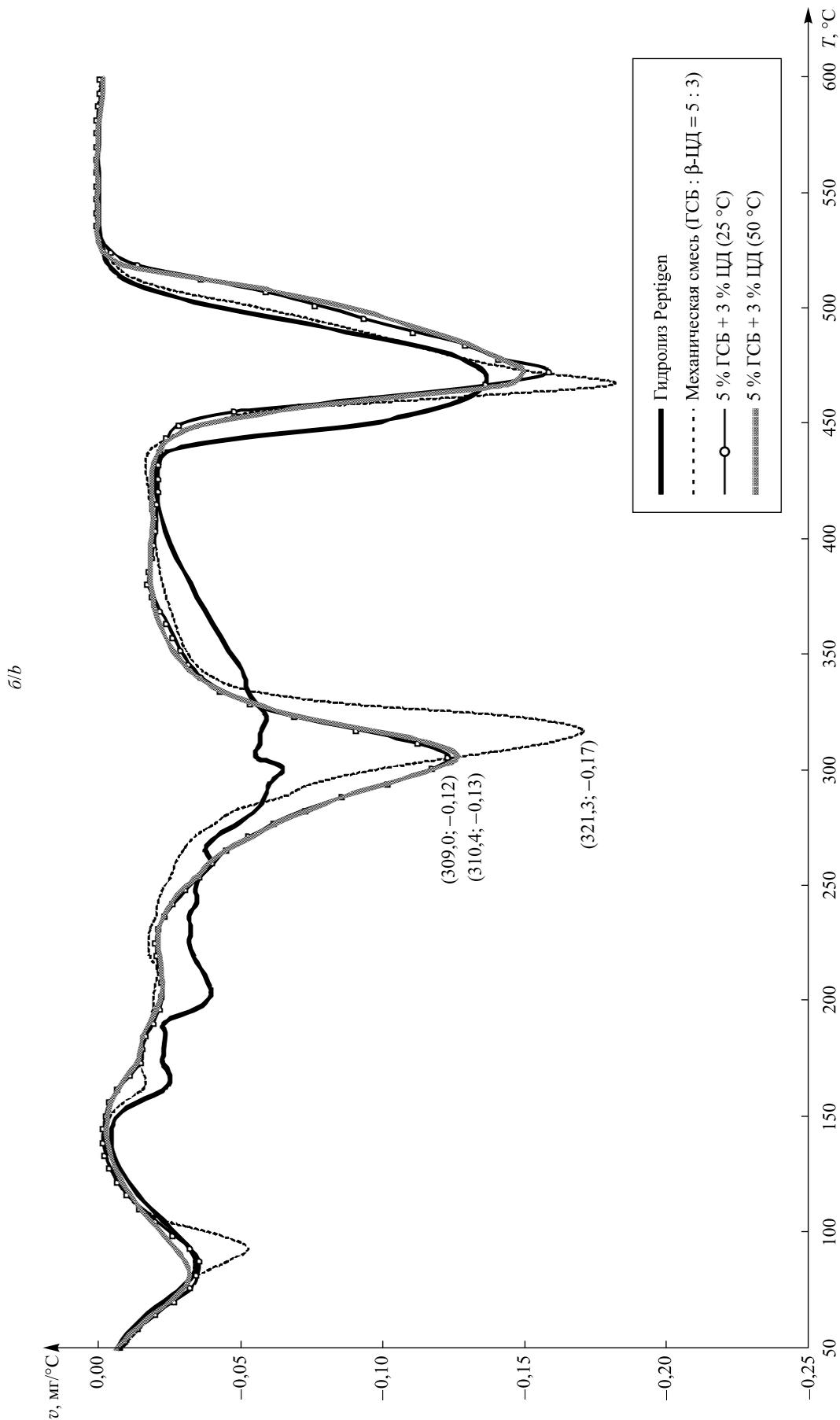


Рис. 3. ДТТ-профили контрольных и опытных образцов, полученных при соотношении ГСБ и β -ЦД, равном 5 : 3 (б) (окончание)

Fig. 3. DTG-profiles of control and test samples obtained with the ratio of WPH and β -CD equal to 5 : 3 (b) (ending)

На следующем этапе определена антиоксидантная активность клатратов β -ЦД с пептидами сывороточных белков и исходного гидролизата Peptigen IF 3080 WPH. Получены зависимости интенсивности флуоресценции ФЛ от концентрации комплексов включения, пептидов и циклического олигосахаридов. Исследования проведены в широком диапазоне содержания изучаемых соединений (0,01–10,0 мг/мл). Экспериментальные образцы восстанавливали флуоресценцию ФЛ до 86–92 %. Графически определены показатели IC_{50} – концентрации образцов, соответствующие 50 % ингибированию активных форм кислорода. Расчет IC_{50} осуществляли на содержание сухого вещества и количество белковой фракции в составе клатратов (табл. 2).

Значение IC_{50} для образца гидролизата сывороточных белков составило $51,9 \pm 3,5$ мкг/мл, тогда как для циклического олигосахаридов равнялось $66,0 \pm 3,0$ мкг/мл. В случае расчета IC_{50} на содержание сухого вещества сравнение комплексов, полученных при различном соотношении компонентов, позволило установить снижение АОА при уменьшении количества пептидной фракции. Вместе с тем показано увеличение антирадикального потенциала с возрастанием температуры образования комплексов. При расчете величин IC_{50} на содержание белкового компонента в клатратах не установлено достоверное влияние количества вносимого циклического олигосахаридов на способность восстанавливать уровень флуоресценции в тест-системе. Кроме того, выявлено возрастание антиоксидантных свойств комплексов включения, полученных при 25 и 50 °С, в 1,3 и 1,6 раза соответственно. Наиболее показательным является расчет значений IC_{50} на количество пептидной фракции в комплексах.

Таблица 2

Показатели антиоксидантной активности гидролизата Peptigen IF 3080 WPH, β -ЦД и их клатратов

Table 2

Parameters of antioxidant activity of hydrolysate Peptigen IF 3080 WPH, β -CD and their clathrates

Образец	IC_{50} , мкг(сухого вещества)/мл	IC_{50} , мкг(белка)/мл
5 % ГСБ + 3 % ЦД (25 °С)*	$68,0 \pm 2,4$	$42,5 \pm 1,5$
5 % ГСБ + 5 % ЦД (25 °С)*	$80,1 \pm 5,7$	$40,1 \pm 2,9$
5 % ГСБ + 3 % ЦД (50 °С)*	$50,3 \pm 1,2$	$31,5 \pm 0,7$
5 % ГСБ + 5 % ЦД (50 °С)*	$66,2 \pm 4,8$	$33,1 \pm 2,4$
Гидролизат Peptigen	$51,9 \pm 3,5$	$51,9 \pm 3,5$
β -Циклодекстрин	$66,0 \pm 3,0$	–

*Температура образования комплекса.

По данным литературы, образование клатратов с β -ЦД приводит к улучшению органолептических свойств аминокислот и пептидов [13–16]. В настоящей работе установлено влияние комплексообразования как на вкусовые качества, так и на антирадикальную активность пептидов молочной сыворотки. Так, для клатратов β -ЦД с пептидами сывороточных белков показано увеличение антиоксидантного потенциала. Максимальная ингибирующая активность по отношению к активированным формам кислорода установлена для комплексов включения, полученных при температуре 50 °С, что в 1,6 раза превышает показатели гидролизата белков молочной сыворотки.

Заключение

Получены экспериментальные образцы клатратов β -ЦД с пептидами сывороточных белков молока, оценены их органолептические свойства и антиоксидантный потенциал. По данным ТГА подтверждено образование клатратов β -ЦД с гидролизатом. Установлено возрастание термостабильности смеси пептидов в составе механической смеси и клатратов с циклическим олигосахаридом. С применением флуориметрического метода для клатратов β -ЦД с гидролизатом, изготовленных при 50 °С, выявлено существенное снижение горечи (на 60–70 %) и увеличение антирадикальных свойств в 1,6 раза по сравнению с исходными пептидами.

Библиографические ссылки

1. Sánchez A, Vázquez A. Bioactive peptides: a review. *Food Quality and Safety*. 2017;1(1):29–46. DOI: 10.1093/fqs/fyx006.
2. Cho MJ, Unklesbay N, Hsieh FH, Clarke AD. Hydrophobicity of bitter peptides from soy protein hydrolysates. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2004;52(19):5895–5501. DOI: 10.1021/jf0495035.
3. Raksakulthai R, Haard NF. Exopeptidases and their application to reduce bitterness in food: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2003;43(4):401–445. DOI: 10.1080/10408690390826572.
4. Saha BC, Hayashi K. Debittering of protein hydrolyzates. *Biotechnology Advances*. 2001;19(5):355–370. DOI: 10.1016/S0734-9750(01)00070-2.
5. Helbig NB, Ho L, Christy GE, Nakai S. Debittering of skim milk hydrolysates by adsorption for into acidic beverages. *Journal of Food Science*. 1980;45(2):331–335. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1980.tb02608.x.
6. Murray TK, Baker BE. Studies on protein hydrolysis: I. Preliminary observations on the taste of enzymic protein hydrolyzates. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1952;3(10):470–475. DOI: 10.1002/jsfa.2740031006.
7. Kanekanian A, Gallagher J, Evans EP. Casein hydrolysis and peptide mapping. *International Journal of Dairy Technology*. 2000;53(1):1–5. DOI: 10.1111/j.1471-0307.2000.tb02648.x.
8. Ge SJ, Zhang LX. The immobilized porcine pancreatic exopeptidases and its application in casein hydrolysates debittering. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 1996;59(2):159–165. DOI: 10.1007/BF02787817.
9. Adler-Nissen J. Control of proteolytic reaction and of the level of bitterness in protein hydrolysis process. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 1984;34(3):215–222. DOI: 10.1002/jctb.280340311.
10. Sente L, Szejtli J. Cyclodextrins as food ingredients. *Trends in Food Science & Technology*. 2004;15(3–4):137–142. DOI: 10.1016/j.tifs.2003.09.019.
11. Yuliani S, Torley PJ, D'Arcy B, Nicholson T, Bhandari B. Extrusion of mixtures of starch and D-limonene encapsulated with β -cyclodextrin: flavour retention and physical properties. *Food Research International*. 2006;39(3):318–331. DOI: 10.1016/j.foodres.2005.08.005.
12. Martin Del Valle EM. Cyclodextrins and their uses: a review. *Process Biochemistry*. 2004;39(9):1033–1046. DOI: 10.1016/S0032-9592(03)00258-9.
13. Tamura M, Mori N, Miyoshi T, Koyama S, Kohri H, Oka H. Practical debittering using model peptides and related compounds. *Agricultural and Biological Chemistry*. 1990;54(1):41–51. DOI: 10.1080/00021369.1990.10869906.
14. Nishijo J, Tsuchitani M. Interaction of L-tryptophan with α -cyclodextrin: studies with calorimetry and proton nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2001;90(2):134–140. DOI: 10.1002/1520-6017(200102)90:2<134::AID-JPSA>3.0.CO;2-T.
15. Linde GA, Junior AL, deFaria EV, Zanin GM. Taste modification of amino acids and protein hydrolysate by α -cyclodextrin. *Food Research International*. 2009;42:814–818. DOI: 10.1016/j.foodres.2009.03.016.
16. Linde GA, Junior AL, deFaria EV, Zanin GM. The use of 2D NMR to study β -cyclodextrin complexation and debittering of amino acids and peptides. *Food Research International*. 2010;43:187–192. DOI: 10.1016/j.foodres.2009.09.025.
17. Rattan SI. Theories of biological aging: genes, proteins, and free radicals. *Free Radical Research*. 2006;40(12):1230–1238. DOI: 10.1080/10715760600911303.
18. Nguyen TA, Liu B, Zhao J, Thomas DS, Hook JM. An investigation into the supramolecular structure, solubility, stability and antioxidant activity of rutin/cyclodextrin inclusion complex. *Food Chemistry*. 2013;136:186–192. DOI: 10.1016/j.foodchem.2012.07.104.
19. Lu Z, Cheng B, Hu Y, Zhang Y, Zou G. Complexation of resveratrol with cyclodextrins: Solubility and antioxidant activity. *Food Chemistry*. 2009;113:17–20. DOI: 10.1016/j.foodchem.2008.04.04.2.
20. Naksuriya O, Okonogi S, Schiffelers RM, Hennink WE. Curcumin nanoformulations: a review of pharmaceutical properties and preclinical studies and clinical data related to cancer treatment. *Biomaterials*. 2014;35:3365–3383. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2013.12.090.
21. Valarini O, Dantas JH, Barao CE, Zanoelo EF, Cardozo L, de Moraes FF. Formation of inclusion compounds of (+)catechin with β -cyclodextrin in different complexation media: spectral, thermal and antioxidant properties. *Journal of Supercritical Fluids*. 2017;121:10–18. DOI: 10.1016/j.supflu.2016.06.005.
22. Shiozawa R, Inoue Y, Murata I, Kanamoto I. Effect of antioxidant activity of caffeic acid with cyclodextrins using ground mixture method. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2018;13(1):24–33. DOI: 10.1016/j.ajps.2017.08.006.
23. Stražišar M, Andrenšek S, Šmidovnik A. Effect of β -cyclodextrin on antioxidant activity of coumaric. *Food Chemistry*. 2008;110:636–642. DOI: 10.1016/j.foodchem.2008.02.051.
24. Hernández-Ledesma B, Dávalos A, Bartolomé B, Amigo L. Preparation of antioxidant enzymatic hydrolysates from alpha-lactalbumin and beta-lactoglobulin. Identification of active peptides by HPLC-MS/MS. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2005;53(3):588–593. DOI: 10.1021/jf048626m.
25. Zulueta A, Maurizi A, Frígola A, Esteve MJ, Coli R, Burini G. Antioxidant capacity of cow milk, whey and deproteinized milk. *International Dairy Journal*. 2009;19(6–7):380–385. DOI: 10.1016/j.idairyj.2009.02.003.
26. Kim SB, Seo IS, Khan MA, Ki KS, Lee WS, Lee HJ, et al. Enzymatic hydrolysis of heated whey: iron-binding ability of peptides and antigenic protein fractions. *Journal of Dairy Science*. 2007;90(9):4033–4042. DOI: 10.3168/jds.2007-0228.
27. Broido A. A simple, sensitive graphical method of treating thermogravimetric analysis data. *Journal of Polymer Science. Part B: Polymer Physics*. 1969;7(10):1761–1773. DOI: 10.1002/pol.1969.160071012.
28. Тарун ЕИ. Сравнение антиоксидантных активностей галловой, кофейной и хлорогеновой кислот. *Труды Белорусского государственного университета. Физиологические, биохимические и молекулярные основы функционирования биосистем [Интернет]*. [Процитировано 4 января 2018];2014;9(1):186–191. URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/121910>.

References

1. Sánchez A, Vázquez A. Bioactive peptides: a review. *Food Quality and Safety*. 2017;1(1):29–46. DOI: 10.1093/fqs/fyx006.
2. Cho MJ, Unklesbay N, Hsieh FH, Clarke AD. Hydrophobicity of bitter peptides from soy protein hydrolysates. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2004;52(19):5895–5501. DOI: 10.1021/jf0495035.
3. Raksakulthai R, Haard NF. Exopeptidases and their application to reduce bitterness in food: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2003;43(4):401–445. DOI: 10.1080/10408690390826572.
4. Saha BC, Hayashi K. Debittering of protein hydrolyzates. *Biotechnology Advances*. 2001;19(5):355–370. DOI: 10.1016/S0734-9750(01)00070-2.
5. Helbig NB, Ho L, Christy GE, Nakai S. Debittering of skim milk hydrolysates by adsorption for into acidic beverages. *Journal of Food Science*. 1980;45(2):331–335. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1980.tb02608.x.
6. Murray TK, Baker BE. Studies on protein hydrolysis: I. Preliminary observations on the taste of enzymic protein hydrolyzates. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1952;3(10):470–475. DOI: 10.1002/jsfa.2740031006.
7. Kanekanian A, Gallagher J, Evans EP. Casein hydrolysis and peptide mapping. *International Journal of Dairy Technology*. 2000;53(1):1–5. DOI: 10.1111/j.1471-0307.2000.tb02648.x.
8. Ge SJ, Zhang LX. The immobilized porcine pancreatic exopeptidases and its application in casein hydrolysates debittering. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 1996;59(2):159–165. DOI: 10.1007/BF02787817.
9. Adler-Nissen J. Control of proteolytic reaction and of the level of bitterness in protein hydrolysis process. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 1984;34(3):215–222. DOI: 10.1002/jctb.280340311.
10. Szente L, Szejtli J. Cyclodextrins as food ingredients. *Trends in Food Science & Technology*. 2004;15(3–4):137–142. DOI: 10.1016/j.tifs.2003.09.019.
11. Yuliani S, Torley PJ, D'Arcy B, Nicholson T, Bhandari B. Extrusion of mixtures of starch and D-limonene encapsulated with β -cyclodextrin: flavour retention and physical properties. *Food Research International*. 2006;39(3):318–331. DOI: 10.1016/j.foodres.2005.08.005.
12. Martin Del Valle EM. Cyclodextrins and their uses: a review. *Process Biochemistry*. 2004;39(9):1033–1046. DOI: 10.1016/S0032-9592(03)00258-9.
13. Tamura M, Mori N, Miyoshi T, Koyama S, Kohri H, Oka H. Practical debittering using model peptides and related compounds. *Agricultural and Biological Chemistry*. 1990;54(1):41–51. DOI: 10.1080/00021369.1990.10869906.
14. Nishijo J, Tsuchitani M. Interaction of L-tryptophan with α -cyclodextrin: studies with calorimetry and proton nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2001;90(2):134–140. DOI: 10.1002/1520-6017(200102)90:2<134::AID-JPS4>3.0.CO;2-T.
15. Linde GA, Junior AL, deFaria EV, Zanin GM. Taste modification of amino acids and protein hydrolysate by α -cyclodextrin. *Food Research International*. 2009;42:814–818. DOI: 10.1016/j.foodres.2009.03.016.
16. Linde GA, Junior AL, deFaria EV, Zanin GM. The use of 2D NMR to study β -cyclodextrin complexation and debittering of amino acids and peptides. *Food Research International*. 2010;43:187–192. DOI: 10.1016/j.foodres.2009.09.025.
17. Rattan SI. Theories of biological aging: genes, proteins, and free radicals. *Free Radical Research*. 2006;40(12):1230–1238. DOI: 10.1080/10715760600911303.
18. Nguyen TA, Liu B, Zhao J, Thomas DS, Hook JM. An investigation into the supramolecular structure, solubility, stability and antioxidant activity of rutin/cyclodextrin inclusion complex. *Food Chemistry*. 2013;136:186–192. DOI: 10.1016/j.foodchem.2012.07.104.
19. Lu Z, Cheng B, Hu Y, Zhang Y, Zou G. Complexation of resveratrol with cyclodextrins: Solubility and antioxidant activity. *Food Chemistry*. 2009;113:17–20. DOI: 10.1016/j.foodchem.2008.04.04.2.
20. Naksuriya O, Okonogi S, Schifflers RM, Hennink WE. Curcumin nanoformulations: a review of pharmaceutical properties and preclinical studies and clinical data related to cancer treatment. *Biomaterials*. 2014;35:3365–3383. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2013.12.090.
21. Valarini O, Dantas JH, Barao CE, Zanoelo EF, Cardozo L, de Moraes FF. Formation of inclusion compounds of (+)-catechin with β -cyclodextrin in different complexation media: spectral, thermal and antioxidant properties. *Journal of Supercritical Fluids*. 2017;121:10–18. DOI: 10.1016/j.supflu.2016.06.005.
22. Shiozawa R, Inoue Y, Murata I, Kanamoto I. Effect of antioxidant activity of caffeic acid with cyclodextrins using ground mixture method. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2018;13(1):24–33. DOI: 10.1016/j.ajps.2017.08.006.
23. Stražičar M, Andrenšek S, Šmidovnik A. Effect of β -cyclodextrin on antioxidant activity of coumaric. *Food Chemistry*. 2008;110:636–642. DOI: 10.1016/j.foodchem.2008.02.051.
24. Hernández-Ledesma B, Dávalos A, Bartolomé B, Amigo L. Preparation of antioxidant enzymatic hydrolysates from alpha-lactalbumin and beta-lactoglobulin. Identification of active peptides by HPLC-MS/MS. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2005;53(3):588–593. DOI: 10.1021/jf048626m.
25. Zulueta A, Maurizi A, Frígola A, Esteve MJ, Coli R, Burini G. Antioxidant capacity of cow milk, whey and deproteinized milk. *International Dairy Journal*. 2009;19(6–7):380–385. DOI: 10.1016/j.idairyj.2009.02.003.
26. Kim SB, Seo IS, Khan MA, Ki KS, Lee WS, Lee HJ, et al. Enzymatic hydrolysis of heated whey: iron-binding ability of peptides and antigenic protein fractions. *Journal of Dairy Science*. 2007;90(9):4033–4042. DOI: 10.3168/jds.2007-0228.
27. Broido A. A simple, sensitive graphical method of treating thermogravimetric analysis data. *Journal of Polymer Science. Part B: Polymer Physics*. 1969;7(10):1761–1773. DOI: 10.1002/pol.1969.160071012.
28. Tarun EI. [Comparison of antioxidant activities of gallic, coffee and chlorogenic acids]. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziologicheskie, biokhimicheskie i molekulyarnye osnovy funkcionirovaniya biosistem* [Proceedings of the Belarusian State University. Physiological, biochemical and molecular basis of functioning of biosystems] [Internet]. [Cited 2018 January 4];2014;9(1):186–191. Available from: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/121910>. Russian.

Статья поступила в редколлегию 22.04.2018.
Received by editorial board 22.04.2018.