

УДК 665.345.4:665.112:665.256.15:615.322

О. И. ШАДЫРО, А. А. СОСНОВСКАЯ,
И. П. ЕДИМЕЧЕВА

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ СТАБИЛИЗАЦИИ ЛЬНЯНОГО МАСЛА И ПРОДУКТОВ НА ЕГО ОСНОВЕ

*НИИ физико-химических проблем
Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь*

Определены состав и устойчивость к окислению льняного масла, полученного из семян различных сортов льна. Изучена эффективность ряда антиоксидантов, витаминов и других биологически активных веществ, лекарственного и пряно-ароматического растительного сырья, семян фасоли и сои в ингибировании окисления льняного масла. Показано, что жирорастворимые эфиры аскорбиновой кислоты, растительные стабилизаторы на основе семян бобовых, а также шалфея и тмина проявляют высокую антиоксидантную активность в льняном масле и позволяют существенно увеличить сроки его хранения. Найдены эффективные и безопасные стабилизаторы льняного масла. На основании полученных данных разработаны технологии производства стабилизированного пищевого льняного масла и новых биологически активных добавок к пище (БАД) на его основе, организовано промышленное производство этих продуктов.

The composition and oxidative stability of flaxseed oil obtained from seeds of different flax varieties have been determined. The inhibitory effectiveness of a number of antioxidants, vitamins and other biologically active substances, medicinal and aromatic herbs, haricot and soy beans with respect to flaxseed oil oxidation has been studied. It has been shown that fat-soluble esters of ascorbic acid, plant stabilizers based on legumes, as well as sage and cumin show a high antioxidant activity in flaxseed oil and significantly increase its shelf life. Effective and safe stabilizers for flaxseed oil were developed. Based on the obtained data, production technologies of stabilized edible flaxseed oil and new biologically active food supplements (BAFS) on the bases of flaxseed oil were developed and their manufacture was organized.

Ключевые слова: масло льняное; липидное окисление; полиненасыщенные жирные кислоты; окислительная стабильность; антиоксиданты; БАД; сроки хранения.

Keywords: flaxseed oil; lipid oxidation; polyunsaturated fatty acids; oxidative stability; antioxidants; BAFS; shelf life.

Льняное масло – самый богатый растительный источник альфа-линоленовой кислоты (АЛК), относящейся к семейству полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК) омега-3. На долю АЛК приходится 49–66 масс. % от суммы жирных кислот льняного масла, благодаря чему оно оказывает благотворное

действие при профилактике и лечении сердечно-сосудистых, онкологических и ряда других заболеваний [1; 2]. При этом наличие трех двойных связей в молекуле АЛК обуславливает высокую склонность льняного масла к окислению, которое приводит к значительному ухудшению его органолептических свойств и пищевой ценности за короткое время хранения.

Для защиты растительных масел, особенно полиненасыщенных, от окислительного старения и увеличения сроков их хранения наиболее эффективным является использование антиоксидантов (АО), в качестве которых, как правило, применяются соединения фенольной природы, способные эффективно взаимодействовать со свободными радикалами, образующимися при окислении [3]. Синтетические АО, такие как бутилгидроксианизол (БОА), бутилгидрокситолуол (БОТ) и трет-бутилгидрохинон (ТБГХ), широко используются в пищевой индустрии, так как они эффективны и менее дороги, чем натуральные АО. Однако их применение в последнее время в ряде стран ограничено из-за возможных токсических последствий [4; 5], что делает актуальной замену синтетических антиоксидантов натуральными, которые более безопасны, не проявляют отрицательного воздействия на организм даже при длительном применении.

Изучению эффективности различных АО в ингибировании окисления льняного масла посвящен ряд исследований. Для повышения этой эффективности использовали синтетические фенольные АО [6] и их композиции с натуральными АО [7], полиамины [8], токоферолы (γ -, δ -, α -) и их смеси [9], аскорбилпальмитат и его композиции с другими синтетическими и природными антиоксидантами и их синергистами [10–12]. Применяли также экстракты розмарина [13], стручкового перца [14], пророщенных соевых бобов [15], имбиря, душистого и черного перца, а также эфирного масла гвоздики [16] и другие растительные экстракты. Литературные данные свидетельствуют о том, что исследованные натуральные и синтетические антиоксиданты не всегда эффективно ингибируют процессы окисления и окислительной деструкции липидов льняного масла. Поэтому поиск эффективных антиоксидантов и композиций, позволяющих существенно повысить окислительную устойчивость и продлить сроки хранения льняного масла и содержащих его продуктов, до сих пор является актуальным.

В данном обзоре представлены основные результаты наших работ по изучению влияния природных и синтетических антиоксидантов на окисление и окислительную деструкцию липидов льняного масла для создания эффективных методов его стабилизации.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА И ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЛЬНЯНОГО МАСЛА

Пероксидное окисление липидов (ПОЛ) – сложный многоступенчатый свободнорадикальный процесс, в результате которого в молекуле липида трансформируются остатки полиненасыщенных жирных кислот с образованием токсических продуктов окисления и окислительной деструкции [17]:



Гидропероксиды – это основные первичные продукты окисления ненасыщенных жирных кислот. Пероксидное число (ПЧ), характеризующее содержание в масле органических гидропероксидов, – один из наиболее важных индикаторов качества масла при контроле степени его окисления. Известно, что первичные продукты окисления растительных и животных жиров нестабильны и легко распадаются, превращаясь во вторичные продукты окисления, которые представляют собой сложную группу соединений, включающую различные альдегиды и кетоны, углеводороды, эпоксисоединения, сравнительно устойчивые спирты, кислоты, оксикислоты и др. [17]. Показатель, характеризующий степень окислительной деструкции липидов пищевых продуктов и суммарное содержание вторичных продуктов окисления (главным образом α - и β -ненасыщенных альдегидов), – анизидиновое число (АЧ).

Окислительная устойчивость льняного масла зависит от многих факторов: жирнокислотного состава масла, содержания витаминов и иных минорных компонентов, условий отжима масла, качества исходных семян, условий хранения, таких как температура, свет, наличие кислорода, – и ряда других. Нами изучены состав и окислительная стабильность более 30 образцов льняного масла из семян разных сортов льна масличного и льна-долгунца [18–21]. Льняное масло для исследований получали от компании ООО «Клуб “Фарм-Эко”» (Беларусь). Масло было получено путем холодного отжима на шнековом прессе (температура масла на выходе из пресса не превышала 40 °С) с последующим отстаиванием в течение суток. В табл. 1 приведены обобщенные экспериментальные данные по составу композиций жирных кислот и биологически активных минорных компонентов, а также значения основных общепринятых показателей качества для изученных образцов масла (пероксидное, кислотное, анизидиновое, иодное числа – ПЧ, КЧ, АЧ и ИЧ соответственно). Кислотное число характеризует содержание в масле свободных жирных кислот, иодное – определяет общую ненасыщенность масла.

Таблица 1

Характеристика изученных образцов льняного масла

Показатель	Значение
Жирные кислоты, % от суммы:	
пальмитиновая С 16 : 0	4,52–5,58
стеариновая С 18 : 0	3,09–5,54
олеиновая С 18 : 1 (ω -9)	13,16–23,73

Окончание табл. 1

Показатель	Значение
линолевая С 18 : 2 (ω -6)	12,32–16,55
α -линоленовая С 18 : 3 (ω -3)	48,99–63,76
другие	0,25–0,79
Сумма ПНЖК	65,53–79,03
Токоферолы, мг/100 г:	
гамма	46,17–69,23
альфа	1,13–5,44
дельта	0,95–2,66
Сумма	50,13–76,32
Каротиноиды, мг/100 г:	
β -каротин	0,21–0,40
лютеин	1,12–2,47
другие	0,34–0,57
Сумма	1,67–3,41
Коэнзимы Q, мг/100 г:	
Q ₁₀	2,14–4,41
Q ₉	1,09–2,10
Фитостеролы, мг/100 г:	
β -ситостерол	159,62–204,39
циклоартенол	129,05–192,12
кампестерол	72,43–97,30
другие	57,64–89,27
Сумма	429,85–567,42
ПЧ, мг-экв O ₂ /кг	0,75–1,28
КЧ, мг КОН/г	0,60–0,90
АЧ, у. е.	0,45–1,14
ИЧ, г I ₂ /100 г	177,4–192,5

Согласно полученным экспериментальным данным содержание ПНЖК в льняном масле изменяется в интервале 65,53–79,03 %, в том числе АЛК – 48,99–63,76 %. Льняное масло содержит комплекс минорных компонентов, обеспечивающих естественную антиоксидантную защиту масла, таких как токоферолы, каротиноиды, коэнзимы Q, фитостеролы, фосфолипиды и ряд других соединений. Среди эндогенных АО льняного масла основные – токоферолы. Это наиболее распространенные АО в растительных маслах, они конкурируют с ненасыщенными жирами и маслами за пероксидные радикалы липидов, которые взаимодействуют с токоферолами намного быстрее (константы скорости реакций от 10^4 до $10^9 \text{ M}^{-1} \cdot \text{c}^{-1}$), чем с липидами (константы скорости реакций от 10 до $60 \text{ M}^{-1} \cdot \text{c}^{-1}$) [22]. Содержание токоферолов в изученных

образцах масла изменялось от 50,13 до 76,32 мг/100 г, при этом доля γ -токоферола составляла 90,7–97,2 масс. % от всех присутствующих в масле гомологов токоферола. Установлено, что при хранении льняного масла содержание токоферолов снижается и накапливаются продукты их превращений [18; 20]. Зависимость суммарного содержания токоферолов в одном из образцов льняного масла от времени хранения в различных условиях приведена на рис. 1. Согласно экспериментальным данным содержание токоферолов в льняном масле при хранении в течение 12 месяцев существенно снижается: на 42,4 % и 75,6 % в темноте и на свету соответственно.

γ -Токоферол, являющийся основным токоферолом льняного масла, в растительных маслах в большинстве случаев ведет себя как более сильный антиоксидант по сравнению с α -токоферолом [22; 23]. Антиоксидантные свойства в растительных маслах проявляют также β -каротин и другие каротиноиды [24], фитостеролы, такие как авенастеролы [25], и ряд иных соединений. Основной каротиноид льняного масла – лютеин. Его содержание составляет 71,9–73,3 % от общего количества каротиноидов, на долю β -каротина приходится 8,2–11,7 % от суммы каротиноидов (табл. 1). Во всех изученных образцах масла основные стеролы – это β -ситостерол, кампестерол и циклоартенол, на их долю приходится 30,3–32,8, 19,4–21,4 и 32,2–37,5 % соответственно от суммарного содержания фитостеролов. Остальные растительные стеролы (брассикастерол, стигмастерол, Δ^5 -авенастерол, Δ^7 -авенастерол и др.) содержатся в льняном масле в значительно меньших количествах. Масло содержит также коэнзимы Q, из которых основным является коэнзим Q₁₀ (2,14–4,41 мг/100 г). Необходимо принимать во внимание возможность взаимодействия различных АО в процессе окисления. Так, согласно [24] токоферол проявляет синергизм с β -каротином в снижении скорости автоокисления соевого масла. Коэнзим Q₁₀ в восстановленной форме (убихинол) участвует в регенерации токоферола, и между ними установлено проявление синергизма [26]. Присутствие в растительных маслах эндогенных минорных компонентов нужно учитывать при подборе антиоксидантов, обеспечивающих эффективную стабилизацию масел.

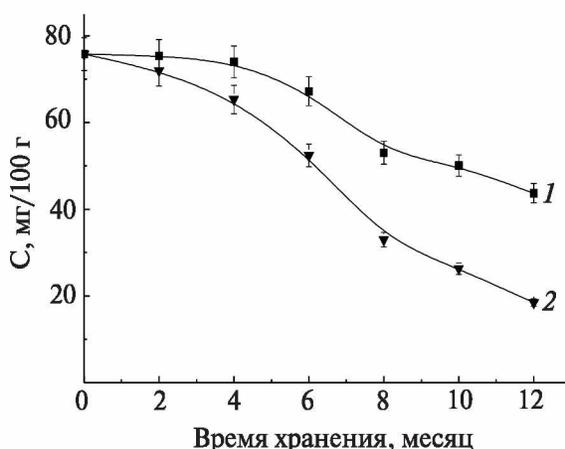


Рис. 1. Зависимость содержания токоферолов в льняном масле от времени хранения при комнатной температуре: 1 – в темноте; 2 – на свету

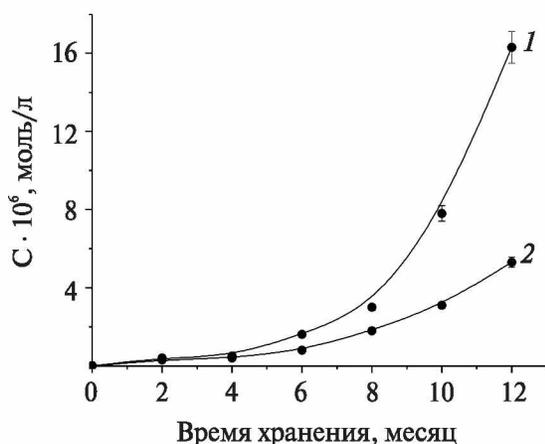


Рис. 2. Накопление 2,4-гептадиенала в процессе хранения льняного масла при комнатной температуре: 1 – на свету; 2 – в темноте

С использованием метода хромато-масс-спектрометрии нами идентифицированы летучие продукты окислительной деструкции липидов льняного масла [18]. Из полученных данных следует, что 2,4-гептадиеналь и 3,5-октадиен-2-он – основные летучие карбонильные продукты, накапливающиеся в льняном масле при хранении. Их концентрация в 10–50 раз превышает концентрацию других альдегидов и кетонов. Образование 2,4-гептадиенала при пероксидном окислении липидов льняного масла может происходить за счет превращений 12-ООН гидропероксида линоленовой кислоты [17], а образование 3,5-октадиен-2-она – за счет накопления эндопероксидов линоленовой кислоты с последующим их распадом с разрывом О–О и С–С-связей. Зависимость концентрации 2,4-гептадиенала от времени хранения льняного масла в различных условиях приведена на рис. 2, из которого видно, что на свету образование 2,4-гептадиенала заметно интенсифицируется. Альдегиды, особенно диенали, обладают высокой реакционной способностью по отношению к биомолекулам (аминокислотам, белкам, основаниям нуклеиновых кислот) и являются цитотоксическими веществами [27], продукты их превращений придают жирам неприятный вкус и/или запах и обладают высокой токсичностью.

Устойчивость масел к окислению может быть выражена как индукционный период (ИП) – время, необходимое для достижения критической точки окисления, соответствующей резкому ускорению этого процесса. Оценку окислительной устойчивости различных образцов льняного масла проводили как в условиях ускоренного окисления с использованием техники *Rancimat*, так и в условиях хранения при комнатной температуре. В табл. 2 приведены полученные методом ускоренного окисления (масса пробы масла 3,0 г, температура 100 °С, продувка воздуха со скоростью 20 дм³/ч) значения индукционного периода для семи образцов льняного масла, различающихся по ЖК-составу и содержанию токоферолов.

Таблица 2

**Содержание ПНЖК, токоферолов и значения периодов индукции окисления
для различных образцов льняного масла**

Образец масла	Содержание жирных кислот, % от суммы		Суммарное содержание токоферолов, мг/100 г	ИП, ч (100 °С)
	АЛК	ПНЖК		
1	63,76 ± 2,87	79,03 ± 4,55	50,13 ± 2,44	3,5 ± 0,07
2	60,45 ± 2,96	72,77 ± 3,00	48,12 ± 2,69	3,2 ± 0,06
3	61,15 ± 2,56	73,18 ± 3,07	62,30 ± 3,12	3,8 ± 0,08
4	58,11 ± 2,42	72,24 ± 3,03	59,42 ± 2,73	4,0 ± 0,08
5	56,93 ± 2,39	72,90 ± 3,76	57,11 ± 2,91	4,2 ± 0,08
6	54,64 ± 2,24	69,13 ± 2,90	60,44 ± 2,96	4,9 ± 0,10
7	48,99 ± 2,34	65,54 ± 4,62	67,40 ± 2,95	7,9 ± 0,16

Из данных табл. 2 просматривается тенденция к снижению окислительной стабильности изученных образцов льняного масла с увеличением содержания АЛК и суммарного содержания ПНЖК. Период индукции окисления для образца с содержанием АЛК 48,99 % в 2,6 раза превышает период индукции для образца с содержанием АЛК 63,76 %. При этом содержание токоферолов в образце масла с самой низкой окислительной стабильностью минимально.

**СТАБИЛИЗАЦИЯ ЛЬНЯНОГО МАСЛА СИНТЕТИЧЕСКИМИ
И НАТУРАЛЬНЫМИ АНТИОКСИДАНТАМИ**

В целях обеспечения эффективной антиокислительной защиты льняного масла нами изучено влияние различных синтетических и природных ингибиторов окисления и их композиций на окислительную устойчивость льняного масла. Изучены синтетические фенольные антиоксиданты (БОТ, ТБГХ, 2,5-ди-трет-бутилгидрохинон (ДТБГХ), пропилгаллат (ПГ), агидол-2), жирорастворимые эфиры аскорбиновой кислоты, α - и δ -токоферолы, «Смесь токоферолов 95», содержащая изомерные токоферолы, %: α – 12, β – 1, δ – 22, γ – 63, а также роноксан А (композиция, включающая 25 % аскорбилпальмитата, 5 % α -токоферола, 70 % лецитина) и природные стабилизирующие композиции на основе растительного сырья. В условиях ускоренного окисления при температуре 100 °С определены значения периодов индукции окисления льняного масла и эффективности ингибирования процесса окисления в присутствии добавок ряда известных антиоксидантов [28; 29]. Эффективность стабилизации (фактор стабилизации, ФС) оценивали отношением: $ФС = ИП_{д} / ИП_{о}$, где $ИП_{д}$ – индукционный период в присутствии добавок, $ИП_{о}$ – индукционный период в контрольной пробе (без добавок). Полученные данные приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Влияние добавок антиоксидантов на окислительную устойчивость
льняного масла**

Антиоксидант	Концентрация АО, %	ИП, ч (при 100 °С)	Фактор стабилизации
Контроль (без добавок)	0	4,25 ± 0,08	1
Трет-бутилгидрохинон (ТБГХ)	0,01	18,96 ± 0,30	3,99
	0,02	23,33 ± 0,35	5,49
	0,04	28,60 ± 0,41	6,73
2,5-ди- трет-Бутилгидрохинон (ДТБГХ)	0,01	11,39 ± 0,20	2,68
	0,02	19,08 ± 0,30	4,49
	0,04	25,67 ± 0,38	6,04
Пропилгаллат (ПГ)	0,02	10,07 ± 0,16	2,37
	0,04	13,43 ± 0,21	3,16
Агидол-2 (2,2'-метилен-бис (4-метил-6-трет-бутилфенол)	0,02	6,08 ± 0,11	1,43
	0,04	7,14 ± 0,12	1,68
2,6-ди-трет-бутил-4-метил- фенол (БОТ)	0,02	4,93 ± 0,10	1,16
	0,04	5,48 ± 0,10	1,29
Аскорбилпальмитат (АП)	0,02	10,03 ± 0,15	2,36
	0,04	14,45 ± 0,22	3,40
Аскорбилстеарат (АС)	0,02	9,86 ± 0,15	2,32
	0,04	14,15 ± 0,22	3,33
α-Токоферол	0,02	4,29 ± 0,08	1,01
	0,05	4,20 ± 0,08	0,99
	0,10	4,15 ± 0,08	0,98
δ-Токоферол	0,02	4,17 ± 0,08	0,98
	0,05	4,17 ± 0,08	0,98
	0,10	4,42 ± 0,09	1,04
«Смесь токоферолов 95»	0,02	4,38 ± 0,09	1,03
	0,05	4,76 ± 0,09	1,12
	0,10	5,27 ± 0,10	1,24
	0,20	5,74 ± 0,11	1,35
α-Токоферол + АП	0,05 + 0,04	14,20 ± 0,17	3,34
δ-Токоферол + АП	0,05 + 0,04	14,58 ± 0,018	3,43
«Смесь токоферолов 95» + АП	0,05 + 0,04	10,46 ± 0,13	2,46
	0,10 + 0,04	10,63 ± 0,14	2,50
	0,20 + 0,04	11,14 ± 0,13	2,62

Согласно полученным данным ингибирующая активность изученных синтетических фенольных антиоксидантов в льняном масле заметно выше для ди- и полифенольных соединений по сравнению с монофенолами – агидолом и БОТ. При этом 2,5-ди-трет-бутилгидрохинон менее эффективен, чем трет-бутилгидрохинон. Добавки α - и δ -токоферолов в интервале концентраций 0,02–0,10 % не изменяют окислительную устойчивость льняного масла. Добавки «Смеси токоферолов 95» проявляют несколько большую эффективность в ингибировании окисления льняного масла, чем добавки α - или δ -токоферолов, но значения фактора стабилизации невелики.

В то же время жирорастворимые эфиры аскорбиновой кислоты (АК) и высших жирных кислот – аскорбилпальмитат и аскорбилстеарат – достаточно эффективно увеличивают устойчивость к окислению льняного масла. С учетом того, что молярная концентрация АП и АС при одинаковой массовой доле ингибиторов примерно вдвое ниже, чем изученных фенольных антиоксидантов, по ингибирующей активности эфиры АК уступают только ТБГХ и ДТБГХ. Так как АП и АС в организме человека медленно расщепляются на аскорбиновую и пальмитиновую либо стеариновую кислоты, их можно рассматривать как натуральные антиоксиданты. Допустимые уровни АП и АС в пищевых жирах и маслах (500 мг/кг) значительно выше, чем для синтетических фенольных АО (75–120 мг/кг) [30].

На рис. 3 приведена зависимость величины $\Phi С$ от концентрации АП в льняном масле в интервале от 0 до 0,10 % для трех образцов льняного масла с различной устойчивостью к окислению; значения ИП и содержание ПНЖК в образцах приведены в табл. 2. Из полученных данных следует, что стабилизирующее действие АП усиливается с увеличением содержания АЛК, а значит, степени ненасыщенности льняного масла, и снижением его окислительной устойчивости. Для изученных образцов льняного масла величины фактора стабилизации при одинаковой концентрации АП обратно пропорциональны значениям индукционного периода окисления, приведенным в табл. 2.

Механизм действия АП в маслах включает регенерацию эндогенных антиоксидантов за счет передачи Н-атома, инактивацию металлов и снижение скорости инициирования липидного окисления, восстановление липидных гидропероксидов до более

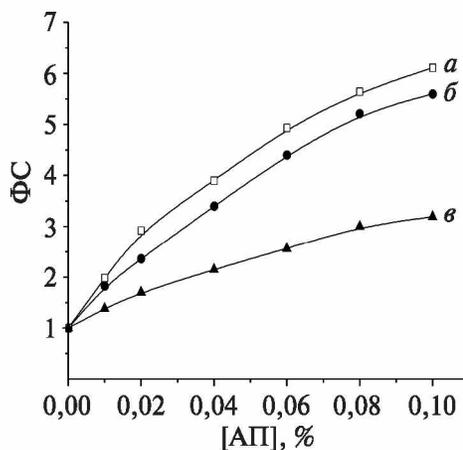


Рис. 3. Зависимость фактора стабилизации от концентрации добавок АП при окислении льняного масла (температура 100 °С): а, б, в – образцы 1, 5 и 7 (см. табл. 2) соответственно

стабильных гидроксисоединений за счет нерадикальных процессов, нейтрализацию кислорода [3]. Известно, что аскорбиновая кислота и АП могут действовать как синергисты токоферолов, восстанавливая их радикалы или продукты окисления до исходных молекул и тем самым пролонгируя их антиоксидантное действие [3; 23]. Для достижения оптимального и наиболее экономичного результата, как правило, используют композиции аскорбилпальмитата с другими антиоксидантами и их синергистами [10; 11; 31]. Согласно полученным нами данным добавки α - или δ -токоферолов к льняному маслу вместе с АП не приводят к усилению стабилизирующего действия АП, а эффективность стабилизирующих композиций АП и смеси токоферолов существенно ниже, чем одного АП (см. табл. 3). Установлено также, что добавки к льняному маслу известной композиции на основе токоферолов, аскорбилпальмитата и лецитина (роноксана А) в концентрациях от 0,05 до 0,20 % не только не обеспечивают усиления антиоксидантного эффекта одного АП, но и снижают его [28]. Таким образом, использование одного АП для стабилизации льняного масла, которое содержит значительное количество нативных АО, в частности до $1,7 \cdot 10^{-3}$ моль/дм³ γ -токоферола, обеспечивает большую эффективность стабилизации, чем некоторые известные композиции на основе АП.

Метод ускоренного окисления при высоких температурах не позволяет с достаточной степенью надежности прогнозировать эффективность АО при комнатной температуре. Поэтому для определения сроков хранения стабилизированного льняного масла важно оценить эффективность АО при хранении масла в нормальных условиях. На рис. 4 приведены кривые, характеризующие накопление пероксидных соединений, а также вторичных продуктов окисления в процессе хранения льняного масла с добавкой АП и без нее при комнатной температуре и свободном доступе воздуха. Полученные данные позволяют в какой-то мере моделировать процесс окислительного «старения» льняного масла, протекающий после вскрытия потребительской тары и поступления кислорода воздуха [18].

Согласно данным рис. 4 АП очень эффективно ингибирует накопление гидропероксидов и вторичных карбонильных продуктов окисления в льняном масле в условиях хранения его при комнатной температуре и свободном доступе кислорода воздуха, что позволяет увеличить срок хранения стабилизированного масла до 18 и более месяцев. На основании данных по изменению ПЧ при хранении найдены значения индукционного периода окисления для льняного масла без добавок и с добавкой АП, рассчитаны значения фактора стабилизации, которые составили 3,7 и более 6,0 при концентрации АП 0,01 % и 0,02 % соответственно. Эти значения ФС существенно выше полученных при той же концентрации АП в условиях ускоренного окисления при 100 °С (1,82 и 2,36 соответственно, см. рис. 3).

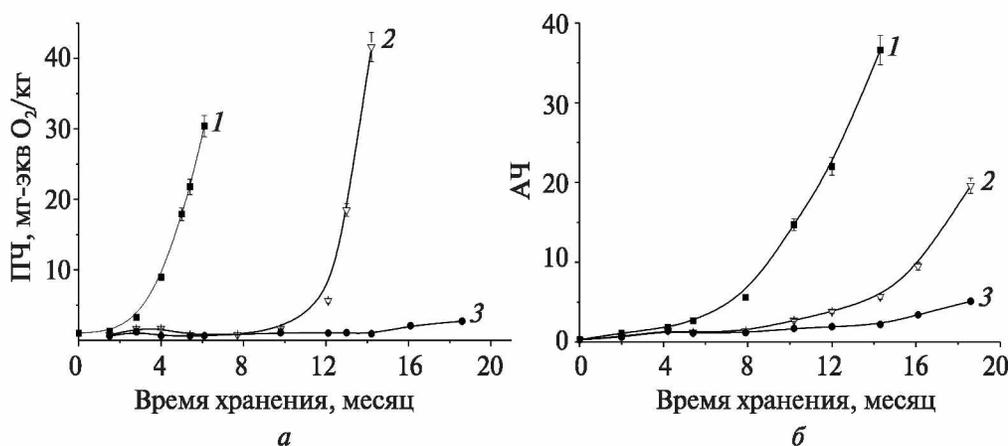


Рис. 4. Изменение пероксидного числа (а) и анизидинового числа (б) льняного масла в процессе хранения при комнатной температуре и свободном доступе воздуха: 1 – контроль (без добавок); 2 – 0,01 % АП; 3 – 0,02 % АП

Таким образом, применение АП без других добавок – эффективный способ защиты льняного масла от окисления и увеличения сроков его хранения, пригодный для производства пищевого льняного масла и продуктов на его основе. Нами разработана технология производства устойчивого к окислению пищевого льняного масла с использованием аскорбилпальмитата в качестве стабилизатора [32].

Для ингибирования процессов окисления и окислительной деструкции ненасыщенных компонентов льняного масла кроме промышленных АО и их композиций мы испытывали также семена бобовых, лекарственное и пряно-ароматическое растительное сырье (шалфей, зверобой, тимьян, шиповник, тмин, имбирь, куркума, гвоздика). Изучены кинетические закономерности накопления пероксидных соединений и вторичных продуктов окисления – альдегидов – в льняном масле и в масляных экстрактах из растительного сырья в процессе их хранения при комнатной температуре [33; 34]. На рис. 5 приведены значения ПЧ льняного масла (контроль) и масляных растительных экстрактов на его основе после 12 месяцев хранения. Видно, что комплекс жирорастворимых биологически активных веществ экстрактов наиболее эффективно ингибирует процесс окислительной порчи масла в случае шалфея и тмина (значения ПЧ экстрактов после 12 месяцев хранения снижаются по сравнению с контролем в 5,4 и 2,1 раза соответственно). Изученное растительное сырье в порядке убывания ингибирующей активности можно расположить в следующей последовательности: шалфей – тмин – куркума – имбирь. Компоненты масляных экстрактов гвоздики, шиповника, тимьяна и зверобоя проявляют в льняном масле прооксидантную активность, которая является максимальной для зверобоя. Масляные экстракты листьев шалфея

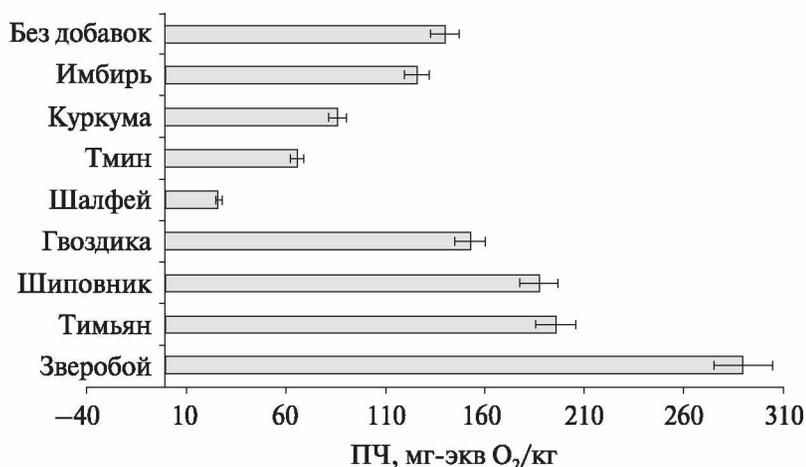


Рис. 5. Значения пероксидных чисел (ПЧ) льняного масла и масляных растительных экстрактов на его основе после 12 месяцев хранения при комнатной температуре и свободном доступе воздуха

и тмина могут быть рекомендованы в качестве антиоксидантов, обеспечивающих эффективную защиту от окисления и продление сроков годности льняного масла и продуктов на его основе.

Проведенный скрининг ряда бобовых культур позволил нам установить, что некоторые сорта бобов фасоли (*Phaseolus vulgaris* L.) обладают способностью тормозить окисление льняного масла. Соевые бобы (*Glycine max* L.) также показали высокую антиоксидантную активность в льняном масле. Сведения об антиоксидантных свойствах фасоли в литературе отсутствуют. В то же время известно, что соевые протеины и их гидролизаты проявляют антиоксидантную активность, ингибируя окисление триглицеридов в модельных эмульсионных системах в большей степени, чем другие пищевые протеины [35]. Метанольные экстракты пророщенных соевых бобов проявляют антиоксидантную активность при окислении липидов льняного масла, однако не позволяют существенно снизить скорость накопления продуктов окисления льняного масла, особенно неэффективно ингибируется накопление гидропероксидов [15]. Для повышения окислительной устойчивости льняного масла нами использованы измельченные сухие бобы фасоли и сои, а также их композиции. На рис. 6 приведены данные по изменению пероксидных и анизидиновых чисел для одного из образцов льняного масла при хранении без добавок и с добавками стабилизаторов на основе семян фасоли (СТФ) и сои (СТС).

Согласно полученным результатам использование растительных стабилизаторов на основе семян фасоли и сои позволяет эффективно ингибировать процессы окисления льняного масла: величины ФС, рассчитанные на основании данных по накоплению гидропероксидов в различных образцах льняного масла, составили для названных стабилизаторов 2,1–2,5 и 3,3–3,7 соот-

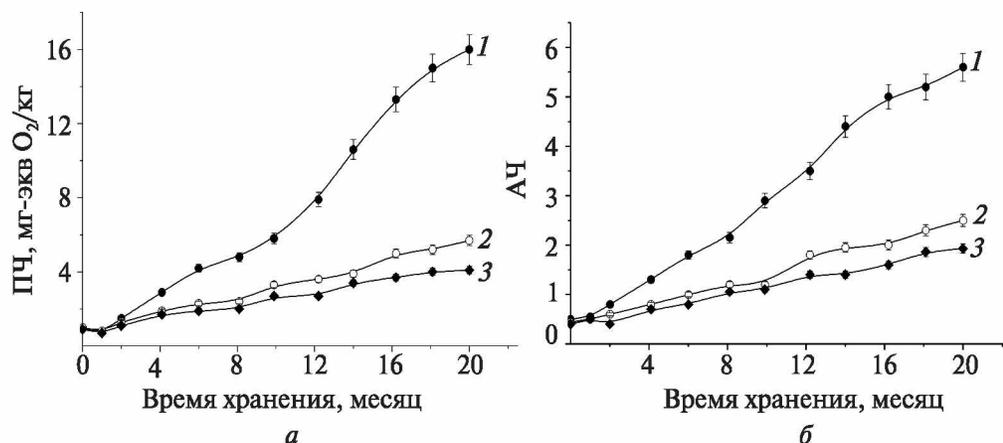


Рис. 6. Накопление гидропероксидов (а) и вторичных продуктов окисления (б) при хранении льняного масла с добавками растительных стабилизаторов в закрытых флаконах при комнатной температуре:
1 – без добавок; 2 – 0,8 % СТФ; 3 – 0,8 % СТС

ветственно при концентрации в масле 0,8 %. Кроме высокой эффективности, разработанные стабилизаторы обладают также и рядом других преимуществ, к которым относятся безопасность, доступность и низкая стоимость, простота приготовления [36; 37].

Разработана технология производства устойчивого к окислению пищевого льняного масла с использованием стабилизирующей растительной композиции (смесь измельченных бобов фасоли и сои в определенном соотношении), позволяющей существенно увеличить устойчивость к окислению и сроки хранения масла [38]. В табл. 4 приведены данные по изменению основных показателей качества и содержания жирорастворимых витаминов при длительном хранении в таре производителя нестабилизированного и стабилизированного с применением композиции на основе бобовых культур льняного масла. Из данных табл. 4 видно, что по качественным параметрам, используемым для оценки окислительной порчи масла при хранении, масло с добавкой стабилизирующей композиции на основе бобовых культур намного превосходит нестабилизированное масло. Содержание эндогенного витамина *E* в стабилизированном масле остается высоким (около 60 мг/100 г) после 18 месяцев хранения, а в нестабилизированном масле – вдвое меньше. Потери каротиноидов в стабилизированном масле при хранении также незначительны.

Оно имеет хорошие органолептические свойства: не изменяет цвет, прозрачное, без запаха рыбьего жира, не горчит. Производство стабилизированного фитокомпозицией на основе семян бобовых культур масла льняного пищевого «Лянок» создано на предприятии ООО «Клуб «Фарм-Эко»» (г. Дрогичин).

Таблица 4

Изменение показателей качества нестабилизированного (н/ст) и стабилизированного композицией бобовых (ст) льняного масла в процессе хранения при комнатной температуре в закрытых флаконах (в таре изготовителя)

Образец масла	Время хранения, месяц							
	0	6	12	18	0	6	12	18
	Пероксидное число, мг-экв O ₂ /кг				Кислотное число, мг КОН/г			
Н/ст	1,18 ± 0,04	3,80 ± 0,15	7,92 ± 0,22	12,4 ± 0,35	0,83 ± 0,03	0,89 ± 0,03	1,07 ± 0,03	1,38 ± 0,04
Ст	1,27 ± 0,05	1,69 ± 0,07	2,25 ± 0,08	2,92 ± 0,10	0,83 ± 0,03	0,83 ± 0,03	0,85 ± 0,03	0,91 ± 0,03
	Иодное число, г I ₂ /100 г				Анизидиновое число			
Н/ст	186,4 ± 8,7	184,3 ± 8,8	175,8 ± 7,8	171,4 ± 7,9	1,65 ± 0,03	2,33 ± 0,04	3,70 ± 0,07	5,16 ± 0,07
Ст	186,4 ± 9,2	186,4 ± 8,9	186,2 ± 8,6	186,0 ± 8,9	1,65 ± 0,03	1,68 ± 0,03	1,70 ± 0,03	2,28 ± 0,03
	Содержание токоферолов, мг %				Содержание каротиноидов, мг %			
Н/ст	59,65 ± 2,10	46,34 ± 1,45	34,52 ± 1,12	28,82 ± 1,15	3,25 ± 0,12	2,87 ± 0,10	2,16 ± 0,08	1,62 ± 0,05
Ст	62,08 ± 2,03	61,98 ± 1,95	60,11 ± 2,04	58,89 ± 2,26	3,34 ± 0,10	3,30 ± 0,12	3,25 ± 0,12	3,12 ± 0,10

РАЗРАБОТКА УСТОЙЧИВЫХ К ОКИСЛЕНИЮ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ДОБАВОК К ПИЦЕ НА ОСНОВЕ ЛЬНЯНОГО МАСЛА

В настоящее время является общепризнанной исключительная важность ПНЖК омега-3 для поддержания физического и психического здоровья, предупреждения ряда заболеваний [39]. В рационе современного человека катастрофически не хватает жирных кислот омега-3 [40]. В ликвидации их дефицита и улучшении рациона питания значительную роль играет потребление льняного масла, которое богато альфа-линоленовой кислотой (омега-3). Благодаря высокому содержанию АЛК льняное масло может изменять продукцию эйкозаноидов, прокоагулянтную активность и другие мембраносвязанные реакции и проявлять гипополипидемическое, гипотензивное, антиаллергическое, антиаритмическое, тромболитическое свойства [1; 2]. Положительное влияние льняного масла на здоровье человека может быть усилено за счет обогащения масла некоторыми биологически активными веществами (БАВ).

Разработка и производство биологически активных добавок (БАД) на основе обогащенного льняного масла преследуют основные цели:

- адекватное обеспечение организма антиоксидантами одновременно с поступлением ПНЖК, что препятствует увеличению содержания потенциальных субстратов пероксидного окисления липидов;
- повышение устойчивости льняного масла к окислительным изменениям и тем самым увеличение допустимого срока его хранения;
- усиление лечебно-профилактического действия льняного масла.

В качестве добавок для обогащения льняного масла в целях создания БАД выбраны соединения, обеспечивающие не только усиление лечебно-профилактического действия льняного масла, но и способные повышать устойчивость к окислению льняного масла и проявлять синергизм с используемыми стабилизаторами в ингибировании окислительных изменений масла и увеличении допустимого срока его хранения. Испытывали такие БАВ, как коэнзим Q_{10} , соединения органического селена, каротиноиды (β -каротин, лютеин, зеаксантин), различные формы витамина E , холекальциферол (витамин D_3). Изучено влияние добавок БАВ на окислительную устойчивость льняного масла в зависимости от концентрации и состава композиций добавок. Для этого выявлены кинетические закономерности накопления в льняном масле первичных и вторичных продуктов окисления липидов, свободных жирных кислот, а также расходования БАВ при хранении масла без добавок и с добавками БАВ [41]. Концентрации БАВ, использованные для обогащения льняного масла, подбирали с учетом рекомендованных величин суточного потребления БАВ.

Кривые зависимости пероксидного и анизидинового чисел, характеризующих содержание гидропероксидов и вторичных карбонильных продуктов окисления соответственно, от времени хранения для одного из образцов льняного масла без добавок и с добавками различных концентраций коэнзима Q_{10} приведены на рис. 7. Согласно полученным данным окислительная устойчивость льняного масла при добавлении к нему коэнзима Q_{10} зависит от концентрации добавки. При концентрации коэнзима 100 мг/100 г устойчивость масла к окислению несколько выше, чем в случае масла без добавок (контроль). С увеличением концентрации коэнзима в масле до 150 и 200 мг/100 г накопление гидропероксидов и вторичных продуктов окисления интенсифицируется, т. е. устойчивость льняного масла к окислению снижается. Прооксидантное действие коэнзима Q_{10} в льняном масле при концентрациях, превышающих 100 мг/100 г ($1,16 \cdot 10^{-3}$ М), может быть связано с возможностью участия коэнзима в процессах ПОЛ льняного масла, в частности за счет взаимодействия молекул коэнзима с остатками ПНЖК липидов льняного масла с образованием первичных радикалов липидов.

Согласно экспериментальным данным добавка к льняному маслу β -каротина в концентрации 5,0 мг/100 г ($9,3 \cdot 10^{-5}$ М) оказывает стабилизирующее действие: процесс накопления продуктов окисления замедляется. При

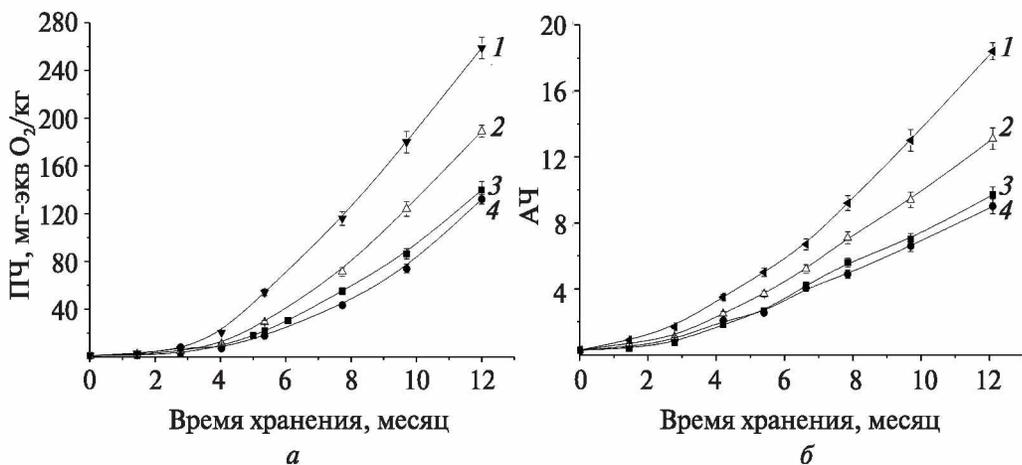


Рис. 7. Накопление гидропероксидов (а) и вторичных продуктов окисления (б) при хранении льняного масла с добавками коэнзима Q₁₀ при комнатной температуре и свободном доступе воздуха: 1 – CoQ₁₀, 200 мг/100 г; 2 – CoQ₁₀, 150 мг/100 г; 3 – без добавок; 4 – CoQ₁₀, 100 мг/100 г

увеличении концентрации добавки до 10,0 мг/100 г окислительная стабильность льняного масла незначительно отличается от контроля. Дальнейшее повышение содержания β-каротина приводит к существенной интенсификации процессов окисления и окислительной деструкции льняного масла. Схожие зависимости получены нами и для льняного масла, обогащенного лютеином и зеаксантином в интервале концентраций 5,0–25,0 мг/100 г.

Содержание каротиноидов при хранении льняного масла снижается за счет протекающих процессов окисления. Потери каротиноидов возрастают с увеличением исходной концентрации добавки, что видно из рис. 8 на примере β-каротина. Согласно экспериментальным данным потери β-каротина после 12 месяцев хранения льняного масла увеличиваются от 39,1 % при исходной концентрации 5,0 мг/100 г до 66,8 % при концентрации 25,0 мг/100 г.

Окислительная устойчивость льняного масла зависит

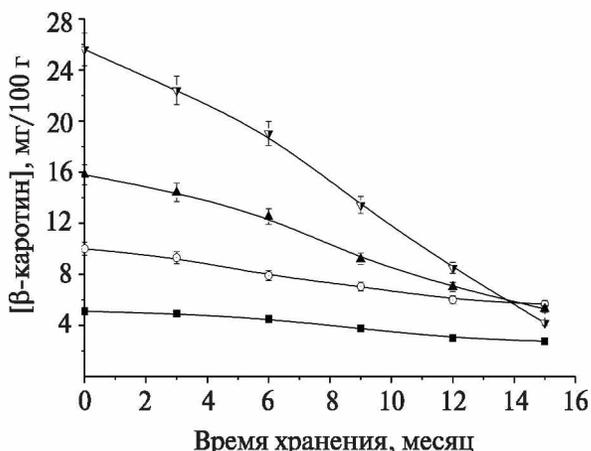


Рис. 8. Изменение концентрации β-каротина в льняном масле в процессе его хранения при комнатной температуре и свободном доступе воздуха

также от концентрации добавки селенометионина: при концентрации добавки свыше 500 мкг/100 г накопление первичных и вторичных продуктов окисления в масле при хранении интенсифицируется, причем с увеличением концентрации селенометионина ее прооксидантный эффект выражен в большей степени. Установлено, что добавки α -токоферола и α -токоферола ацетата при их концентрациях 30–80 мг/100 г, а также витамина D_3 при концентрации 30–100 мкг/100 г не изменяют окислительную устойчивость льняного масла.

Таким образом, проведенные исследования показали, что витамины и другие БАВ, используемые для обогащения льняного масла, могут в зависимости от природы добавки и ее концентрации в масле как ингибировать процессы окисления и окислительной деструкции липидов льняного масла, так и ускорять их.

Для обеспечения эффективной антиокислительной защиты БАД на основе льняного масла нами изучено совместное влияние добавок БАВ и различных синтетических и природных ингибиторов окисления на устойчивость к окислению льняного масла [41]. Согласно экспериментальным данным такие АО, как ТБГХ, ПГ, АП, АС, при концентрациях 0,02–0,04 % и роноксан А при концентрациях 0,15–0,20 %, природные стабилизирующие композиции на основе семян фасоли и сои (0,8–1,0 %) показали достаточно высокую эффективность в ингибировании окислительных изменений льняного масла. На рис. 9 приведены данные по изменению концентрации гидропероксидов и вторичных продуктов окисления от времени хранения льняного масла без добавок, с добавками коэнзима Q_{10} и стабилизирующих композиций на основе семян фасоли, сои, а также АП, композиции АП и СТФ.

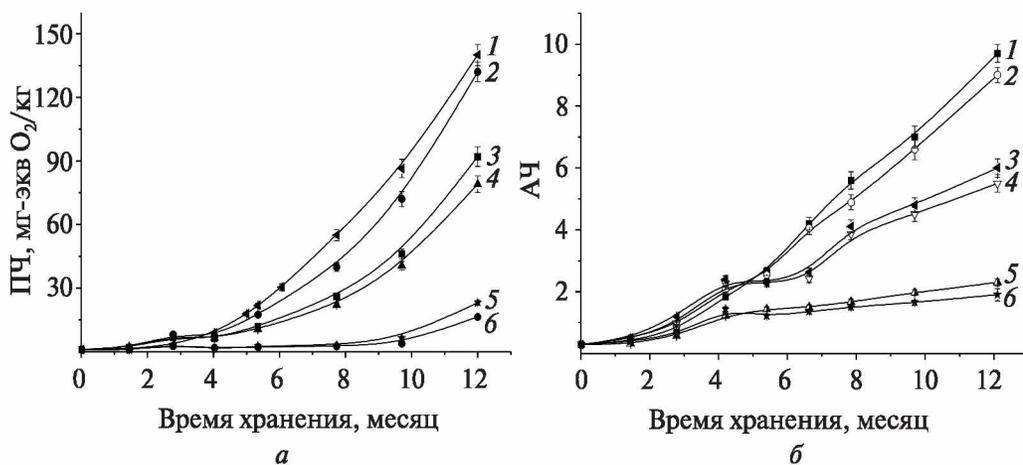


Рис. 9. Накопление гидропероксидов (а) и вторичных продуктов окисления (б) при хранении льняного масла с добавками коэнзима Q_{10} и стабилизаторов при комнатной температуре и свободном доступе воздуха:
1 – без добавок; 2 – CoQ_{10} , 100 мг/100 г; 3 – CoQ_{10} , 100 мг/100 г + СТФ, 1,0 %;
4 – CoQ_{10} , 100 мг/100 г + СТС, 1,0 %; 5 – CoQ_{10} , 100 мг/100 г + АП, 0,02 %;
6 – CoQ_{10} , 100 мг/100 г + СТФ, 1,0 % + АП, 0,02 %

Из данных рис. 9 следует, что даже в условиях ускоренного окисления (свободный доступ кислорода воздуха) при комнатной температуре АП и его композиции с растительными стабилизаторами эффективно тормозят окислительные процессы в льняном масле, обогащенном коэнзимом Q_{10} . Эфиры аскорбиновой кислоты и их композиции со стабилизаторами на основе семян бобовых позволяют эффективно ингибировать также процессы окисления и окислительной деструкции льняного масла, обогащенного добавками каротиноидов, селенометионина и других изученных БАВ. При использовании указанных стабилизаторов существенно снижаются потери как эндогенных БАВ льняного масла, таких как токоферолы, каротиноиды, коэнзимы Q , так и добавок БАВ, используемых для обогащения масла. Так, согласно полученным данным потери БАВ при хранении льняного масла в течение 12 месяцев в присутствии стабилизирующих композиций на основе АП снижаются в 8–10 раз по сравнению с маслом без стабилизаторов и составляют не более 5–8 %. Найдены оптимальные условия стабилизационной обработки для каждой композиции БАВ в льняном масле.

На основании проведенных исследований разработаны рецептуры и технологии получения ряда устойчивых к окислению БАД на основе льняного масла: «Коэнзим Q_{10} – масло льняное плюс»; «Бета-каротин – масло льняное плюс»; «Селен – витамин E – масло льняное плюс»; «Лютетин – масло льняное плюс»; «Витамины D_3 и E – масло льняное плюс»; «Масло расторопши – масло льняное плюс». Срок годности БАД с коэнзимом Q_{10} – 9 месяцев, остальных БАД – 12 месяцев. На предприятии ООО «Клуб “Фарм-Эко”» в 2014–2016 гг. организовано их производство. БАД рекомендованы для применения взрослым и детям старше 12 лет в целях обогащения организма незаменимыми жирными кислотами, в том числе ПНЖК омега-3, витаминами и другими БАВ, а также в качестве средств, способствующих поддержанию нормального обмена веществ, функций иммунной, сердечно-сосудистой и костно-мышечной систем, желудочно-кишечного тракта, повышению энергетического и жизненного тонуса организма человека, замедлению процессов старения, профилактике отдаленных последствий радиации, улучшению остроты зрения, состояния кожи и волос.

Создание новых отечественных БАД позволит расширить ассортимент доступных широкому кругу потребителей ценных продуктов на основе льняного масла и повысить качество питания населения Беларуси за счет увеличения в нем доли ПНЖК омега-3 и ряда других ценных БАВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования состава и устойчивости к окислению льняного масла в различных условиях. Изучено влияние синтетических и натуральных антиоксидантов на окисление и окислительную деструкцию липидов льняного масла. Полученные данные позволили разработать эффективные и безопас-

ные методы стабилизации льняного масла, а также технологии производства устойчивого к окислению пищевого льняного масла и БАД на его основе, организовать промышленное производство этих продуктов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Flaxseed in human nutrition / Eds. L. U. Thompson, S. C. Cunnane, 2nd ed. Illinois, Champaign : AOCs Press, 2003.
2. Pan A., Chen M., Chowdhury R. [et al.]. α -Linolenic acid and risk of cardiovascular disease: a systematic review and meta-analysis // Am. J. Clin. Nutr. 2012. Vol. 96, № 6. P. 1262–1273.
3. Frankel E. N. Antioxidants in lipid foods and their impact on food quality // Food Chem. 1996. Vol. 57. P. 51–55.
4. Mikova K. In: Pokorny J., Yanishlieva N., Gordon M. (Eds.), Antioxidants in food: practical applications. N. Y. : CRC Press, 2000. P. 267–284.
5. Taghvaei M., Jafari S. M. Application and stability of natural antioxidants in edible oils in order to substitute synthetic additives // J. Food Sci. Technol. 2015. Vol. 52. P. 1272–1282.
6. Azeez O. T., Ejeta K. O., Frank E. O., Gerald N. E. Effects of antioxidants on the oxidative stability of vegetable oil at elevated temperature // Int. J. Appl. Sci. Technol. 2013. Vol. 3. P. 107–115.
7. Omar K. I., Shan L., Wang Y. L., Wang X. Stabilizing flaxseed oil with individual antioxidants and their mixtures // Eur. J. Lipid Sci. Technol. 2010. Vol. 112. P. 1003–1011.
8. Marguez M., Akashe A. Method for inhibiting oxidation of polyunsaturated lipids. Patent US № 6428461 B1, 2001.
9. Wagner K.-N., Elmadafa I. Effect of tocopherols and their mixtures on the oxidative stability of olive oil and linseed oil under heating // Eur. J. Lipid Sci. Technol. 2000. Vol. 102. P. 624–629.
10. Michotte D., Rogez H., Chirinos R. [at al.]. Linseed oil stabilisation with pure natural phenolic compounds // Food Chem. 2011. Vol. 129. P. 1228–1231.
11. Masaya M., Noribumi S., Masayuki E., Tadashi I. Fat or oil containing polyunsaturated fatty acid and its production. Patent Japanese № 09263784 A, 1997.
12. Rudnik E., Szczucinska A., Gwardiak H. [et al.]. Comparative studies of oxidative stability of linseed oil // Termochim. Acta. 2001. Vol. 370. P. 135–140.
13. Колар М. Х., Урбанчич С. Натуральный антиоксидант – экстракт розмарина // Масла и жиры. 2008. Т. 3. С. 26–28.
14. Nag A. Stabilization of flaxseed oil with capsicum antioxidant // J. Am. Oil Chem. Soc. 2000. Vol. 77. P. 799–800.
15. Ruth S. M., Shaker E. S., Morrissette P. A. Influence of methanolic extracts of soybean seeds and soybean oil on lipid oxidation in linseed oil // Food Chem. 2001. Vol. 75. P. 177–184.
16. Misharina T. A., Alinkina E. S., Terenina M. B. [et al.]. Inhibition of linseed oil autooxidation by essential oils and extracts from spice plants // Appl. Biochem. Microbiol. 2015. Vol. 51. P. 455–461.
17. Porter N. A., Caldwell S. E., Mills K. A. Mechanisms of free radical oxidation of unsaturated lipids // Lipids. 1995. Vol. 30, № 4. P. 277–290.

18. Шадыро О. И., Сосновская А. А., Едимечева И. П. Химический состав и окислительная стабильность льняного масла // Пищевая пром-сть: наука и технологии. 2013. № 4. С. 99–106.
19. Рошка Г. В., Шанбанович Г. Н., Шадыро О. И. [и др.]. Скрининг различных сортов льна для производства пищевого льняного масла // Вес. НАН Беларусі. Сер. аграр. навук. 2011. № 1. С. 99–105.
20. Шадыро О. И., Сосновская А. А., Едимечева И. П., Островская Н. И. Исследование окислительной устойчивости льняного масла при хранении // Масложировая пром-сть. 2010. № 6. С. 26–28.
21. Рошка Г. В., Ермолович А. Н., Шадыро О. И. [и др.]. Влияние технологических приемов возделывания льна и производства масла на качество семян льна и льняного масла // Пищевая пром-сть: наука и технологии. 2010. № 4 (10). С. 57–64.
22. Kamal-Eldin A., Appelqvist L-A. The chemistry and antioxidant properties of tocopherols and tocotrienols // Lipids. 1996. Vol. 31. P. 671–701.
23. Elisia I., Young J. W., Yuan Y. V., Kitts D. D. Association between tocopherol isoform composition and lipid oxidation in selected multiple edible oils // Food Res. Int. 2013. Vol. 52. P. 508–514.
24. Choe E., Vin D. B. Mechanisms and factors for edible oil oxidation // Compr. Rev. Food Sci. F. 2006. Vol. 5. P. 169–186.
25. Wang T., Hicks K. B., Moreau R. Antioxidant activity of phytosterols, oryzanol and other phytosterol conjugates // J. Am. Oil Chem. Soc. 2002. Vol. 79. P. 1201–1206.
26. Quinn P. J., Fabisiak J. P., Kagan V. E. Expansion of antioxidant function of vitamin E by coenzyme Q // Biofactors. 1999. Vol. 9. P. 149–154.
27. Schultz T. W., Yarbrough J. W. Trends in structure-toxicity relationships for carbonyl-containing, β -unsaturated compounds // SAR and QSAR in Environm. Res. 2004. Vol. 15, № 2. P. 139–146.
28. Edimecheva I., Sosnovskaya A., Shadyro O., Lisovskaya A. Oxidative stability of linseed oil // 105th AOCS Annual Meeting & Expo, May 4–7, 2014, San Antonio, Texas. Abstracts: Lipid Oxidation and Quality Poster Session. P. 20–21.
29. Сосновская А. А., Едимечева И. П., Шадыро О. И. Разработка новых методов стабилизации и технологий производства льняного масла и БАД на его основе // Материалы международной конференции «Свободные радикалы в химии и жизни». Минск : БГУ, 2015. С. 33–34.
30. Codex Standard for Named Vegetable Oils (CODEX-STAN 210-1999).
31. Hamilton R. J., Kalu C., McNeill G. P. [et al.]. Effect of tocopherols, ascorbyl palmitate and lecithin on autoxidation on fish oils // J. Am. Oil Chem. Soc. 1998. Vol. 75. P. 813–822.
32. Шадыро О. И., Сосновская А. А., Едимечева И. П., Потанович М. В. Способ производства льняного масла. Патент Респ. Беларусь № 20201, 2013.
33. Шадыро О. И., Сосновская А. А., Едимечева И. П. Применение растительного сырья для защиты льняного масла от окисления // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. 2015. № 1. С. 12–126.
34. Shadyro O., Sosnovskaya A., Edimecheva I., Lisovskaya A. Plant raw materials against linseed oil oxidation // 106th AOCS Annual Meeting & Expo, May 3–6, 2015, Orlando, Florida, Abstracts: Lipid Oxidation and Quality, Poster Session. P. 21.
35. Hirose A., Miyashita K. Inhibitory effect of proteins and their hydrolisates on the oxidation of triacylglycerols containing docosahexaenoic acids in emulsion. J. Jap. Sos. Food Sci. Technol. 1999. Vol. 46. P. 799–805.

36. *Шадыро О. И., Сосновская А. А., Едимечева И. П.* [и др.]. Способ стабилизации льняного масла. Патент Респ. Беларусь № 10449, 2006.

37. *Шадыро О. И., Сосновская А. А., Едимечева И. П.* [и др.]. Способ стабилизации льняного масла. Патент Респ. Беларусь № 12609, 2008.

38. *Рошка Г. В., Кожановский Г. А., Шадыро О. И., Сосновская А. А.* Технологические аспекты производства семян льна и пищевого льняного масла // Белорус. сел. хоз-во. 2010. № 12. С. 12–15.

39. *Connor W. E.* Importance of n-3 fatty acids in health and disease // *Am. J. Clin. Nutr.* 2000. Vol. 71 (suppl). P. 171S–175S.

40. *Simopoulos A. P.* The importance of the ratio of omega-6/omega-3 essential fatty acids // *Biomed. Pharmacol.* 2002. Vol. 56, № 8. P. 365–379.

41. *Сосновская А. А., Едимечева И. П., Шадыро О. И.* Биологически активные добавки на основе льняного масла // *Материалы XV Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в пищевой промышленности».* Минск : ИВЦ Минфина, 2016. С. 92–95.

Поступила в редакцию 10.04.2017