

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2447>
<https://elibrary.ru/NLQENQ>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Влияние ультразвукового воздействия на эффективность процесса обезжиривания жидких лецитинов



Е. В. Лисовая*^{ORCID}, **Е. П. Викторова**^{ORCID},
А. В. Свердличенко^{ORCID}, **М. Р. Жане**^{ORCID}

Краснодарский научно-исследовательский институт хранения и переработки сельскохозяйственной продукции – филиал ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия»^{ORCID}, Краснодар, Россия

Поступила в редакцию: 28.02.2023
Принята после рецензирования: 22.03.2023
Принята к публикации: 04.04.2023

*Е. В. Лисовая: e.kabalina@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-7296-6582>
Е. П. Викторова: <https://orcid.org/0000-0001-7517-3684>
А. В. Свердличенко: <https://orcid.org/0000-0002-4837-1447>
М. Р. Жане: <https://orcid.org/0000-0003-1822-0805>

© Е. В. Лисовая, Е. П. Викторова, А. В. Свердличенко,
М. Р. Жане, 2023



Аннотация.

Получение фосфолипидного изолята с высоким содержанием фосфолипидов путем обезжиривания жидкого лецитина является ресурс- и энергозатратным процессом. Исследование эффективности применения различных методов интенсификации этого процесса актуально. Метод ультразвукового воздействия – один из наиболее эффективных и простых в реализации физических методов интенсификации химико-технологических процессов. Цель работы – исследование влияния ультразвукового воздействия на эффективность процесса обезжиривания жидких лецитинов.

Объектами являлись образцы соевого лецитина (жидкий, частично обезжиренный, фосфолипидный изолят). Обезжиривание жидкого соевого лецитина с применением в качестве растворителя ацетона осуществляли в три стадии при температуре 40 °С. Продолжительность каждой стадии составила 10 мин. Соотношение лецитин:ацетон (по массе) на I стадии обезжиривания составило 1:7, на II стадии – 1:6, на III – 1:5. Системы «жидкий лецитин – ацетон» и «частично обезжиренный лецитин – ацетон» в процессе обезжиривания подвергали ультразвуковому воздействию при различной удельной мощности и продолжительности воздействия. Разделение фаз на раствор нейтральных липидов в ацетоне и фосфолипиды осуществляли фильтрованием. Фосфолипидный изолят высушивали в вакуум-сушильном шкафу под вакуумом 5 кПа при температуре 40 °С. После каждой стадии обезжиривания определяли содержание фосфолипидов в частично обезжиренных лецитинах и фосфолипидном изоляте, а также степень извлечения нейтральных липидов после отгонки растворителя из ацетоновой мисцеллы.

Установили эффективность ультразвукового воздействия при обработке систем «лецитин – ацетон» на I стадии обезжиривания с удельной мощностью 0,28 Вт/см³, на II и III стадиях – 0,36 Вт/см³. Применение ультразвукового воздействия на I и II стадиях обезжиривания в течение 3 мин, а на III стадии в течение 2 мин позволяет сократить расход ацетона в 1,2 раза и получить фосфолипидный изолят с содержанием фосфолипидов на 3,3 % выше по сравнению с обезжириванием контрольного образца (без обработки ультразвуковым воздействием).

В работе была показана эффективность применения ультразвукового воздействия для интенсификации процесса обезжиривания жидкого соевого лецитина в три стадии со снижением расхода растворителя. Разработали технологические режимы получения фосфолипидного изолята с высоким содержанием целевого компонента – собственно фосфолипидов (98,6 %), который может быть рекомендован в качестве пищевой добавки в технологиях продуктов питания.

Ключевые слова. Соевый лецитин, фосфолипиды, обезжиривание, ультразвук, интенсификация, фосфолипидный изолят

Финансирование. Исследование выполнено за счет средств гранта № 22-26-20122 Российского научного фонда (РНФ)^{ORCID} и Кубанского научного фонда.

Для цитирования: Влияние ультразвукового воздействия на эффективность процесса обезжиривания жидких лецитинов / Е. В. Лисовая [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 3. С. 445–454. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2447>

Effect of Ultrasonic Exposure on the Efficiency of De-Oiling Fluid Lecithins



Ekaterina V. Lisovaya*^{ORCID}, Elena P. Viktorova^{ORCID},
Anastasia V. Sverdlichenko^{ORCID}, Mariet R. Zhane^{ORCID}

Krasnodar Research Institute of Storage and Processing of Agricultural Products, – branch of the North-Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture and Winemaking^{ORCID}, Krasnodar, Russia

Received: 28.02.2023
Revised: 22.03.2023
Accepted: 04.04.2023

*Ekaterina V. Lisovaya: e.kabalina@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-7296-6582>
Elena P. Viktorova: <https://orcid.org/0000-0001-7517-3684>
Anastasia V. Sverdlichenko: <https://orcid.org/0000-0002-4837-1447>
Mariet R. Zhane: <https://orcid.org/0000-0003-1822-0805>

© E.V. Lisovaya, E.P. Viktorova, A.V. Sverdlichenko, M.R. Zhane, 2023



Abstract.

De-oiling fluid lecithin is a resource- and energy-intensive process that provides a phospholipid isolate with a high content of phospholipids. Ultrasonic exposure is one of the most effective and easy-to-implement physical methods that intensify this chemical-technological procedure. This article describes the effect of ultrasonic exposure on the efficiency of de-oiling fluid lecithins.

The research featured soy lecithin (fluid, partially de-oiled, phospholipid isolate). The de-oiling process involved acetone as a solvent and included three 10-min stages at a temperature of 40°C. The ratio of lecithin:acetone (by weight) was as follows: stage I – 1:7, stage II – 1:6, stage III – 1:5. The systems of fluid lecithin – acetone and partially de-oiled lecithin – acetone underwent ultrasonic treatment during the de-oiling process at different specific power and exposure time. As a result of filtration, phases separated into an acetone solution of neutral lipids and phospholipids. The phospholipid isolate was dried in a vacuum oven at 5 kPa and 40°C. Each stage ended with the following measurements: the content of phospholipids in partially de-oiled lecithins, the content of phospholipids in the phospholipid isolate, and the extraction degree of neutral lipids after distilling the solvent from the acetone miscella.

The specific power in the lecithin – acetone system was 0.28 W/cm³ at de-oiling stage I and 0.36 W/cm³ at stages II and III. Three minutes of ultrasonic exposure at stages I and II and two minutes at stage III reduced the acetone consumption by 1.2 times. The resulting phospholipid isolate yielded by 3.3% more phospholipids than the control sample, which presupposed no ultrasonic treatment.

Ultrasonic exposure proved to be an effective and solvent-saving three-stage method that intensified the process of de-oiling fluid soy lecithin. The study specified the optimal technological modes for obtaining a phospholipid isolate with a high content of phospholipids (98.6%), which can be recommended as a food additive.

Keywords. Fluid soy lecithin, phospholipids, de-oiling, ultrasound, intensification, phospholipid isolate

Funding. The research was supported by the Russian Science Foundation (RSF)^{ORCID} and the Kuban Science Foundation, grant No. 22-26-20122.

For citation: Lisovaya EV, Viktorova EP, Sverdlichenko AV, Zhane MR. Effect of Ultrasonic Exposure on the Efficiency of De-Oiling Fluid Lecithins. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(3):445–454. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2447>

Введение

Пищевая добавка лецитин (E322) в технологиях продуктов питания выполняет большое количество технологических функций, а именно функции эмульгатора, пенообразователя, смачивающего агента, диспергатора, ингибитора кристаллизации и др., которые обеспечивают высокую эффективность производственных процессов и высокое качество готового продукта [1–4]. Помимо технологических

функций, лецитины обладают биоактивным действием – антиоксидантным, гипохолестеринемическим, гиполипидемическим и гепатопротекторным. Это объясняет их широкое применение в технологиях лекарственных препаратов и косметических средств [5–7].

Уникальные свойства лецитинов обусловлены входящими в их состав природными биологически активными соединениями – фосфолипидами.

Эффективность проявления указанных выше свойств зависит от состава и содержания фосфолипидов в лецитине [8, 9].

Стандартные жидкие лецитины, получаемые в результате гидратации из нерафинированных растительных масел, содержат, помимо фосфолипидов, до 40 % нейтральных липидов – триацилглицеринов и свободных жирных кислот [10]. Присутствие нейтральных липидов в жидком лецитине в большом количестве, следовательно, более низкая концентрация целевого компонента – фосфолипидов – ограничивает область их применения.

В результате обезжиривания путем экстракции нейтральных липидов с использованием селективного растворителя получают очищенный продукт, т. н. фосфолипидный изолят, с содержанием не менее 96 % фосфолипидов в виде порошка или гранул [11, 12].

Обезжиренные лецитины за счет удаления нейтральных липидов, некоторого количества гликолипидов, красящих и ароматических веществ характеризуются повышением эмульгирующей способности и диспергируемости в воде, а также более нейтральным вкусом по сравнению с жидким лецитином [12, 13]. Преимуществом использования обезжиренных лецитинов в различных отраслях пищевой промышленности, помимо высокой технологической функциональности, является удобство и точность их дозирования [14].

Для получения фосфолипидного изолята с высокой концентрацией целевого компонента в процессе обезжиривания жидких лецитинов значение имеет выбор растворителя, в котором полностью растворяются триацилглицерины и свободные жирные кислоты, а фосфолипиды при определенных условиях нет [15].

В качестве растворителя для проведения процесса обезжиривания наиболее широко применяют ацетон, т. к. практически все индивидуальные группы фосфолипидов не растворяются в нем, в отличие от других органических растворителей (табл. 1), а нейтральные липиды растворяются полностью [12, 15, 16].

Процесс обезжиривания фосфолипидных продуктов (жидких лецитинов и фосфолипидных концентратов) осуществляют с использованием больших объемов растворителя, что приводит к увеличению энергозатрат на его регенерацию [17, 18]. Снижение расхода ацетона не позволяет получить высокий выход целевого продукта, т. е. фосфолипидного изолята.

Актуальными являются исследования, направленные на изучение влияния различных методов интенсификации процессов в пищевой промышленности, позволяющих, во-первых, снизить энерго- и ресурсозатратность (высокие потери и расходы селективного растворителя) известных технологий, во-

Таблица 1. Растворимость некоторых индивидуальных групп фосфолипидов в органических растворителях

Table 1. Solubility of some phospholipids in organic solvents

Наименование индивидуальной группы фосфолипидов	Растворимость в органическом растворителе		
	Гексан	Этанол	Ацетон
Фосфатидилхолины	+	+	–
Фосфатидилэтаноламины	+	+/-	–
Фосфатидилинозитолы	+	–	–
Лизофосфолипиды	+/-	+	–
Фосфатидные кислоты	+	–	+/-

вторых, получить продукт с высокой концентрацией целевого компонента и заданными свойствами.

Наиболее эффективным и простым в реализации физическим методом интенсификации процесса обезжиривания жидких лецитинов является метод ультразвукового (УЗ) воздействия. Эффективность применения УЗ-воздействия в химико-технологических процессах обусловлена интенсификацией перемешивания, в том числе на границе раздела фаз, и массо- и энергопереноса [19–22]. Целесообразность использования УЗ-воздействия в процессе обезжиривания жидких лецитинов обусловлена не только возможностью сокращения расхода экстрагента – ацетона, но и возможностью получения высококачественного продукта с высоким содержанием целевого компонента, т. е. фосфолипидов.

Целью работы являлось исследование влияния УЗ-воздействия на эффективность процесса обезжиривания жидких лецитинов.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись жидкий лецитин, который получили из нерафинированного соевого масла, выработанного из семян сои современной отечественной селекции в условиях ООО «Центр Соя» (Краснодарский край, ст. Тбилисская), частично обезжиренные лецитины, полученные на I и II стадиях обезжиривания, и фосфолипидный изолят, полученный после III стадии обезжиривания жидкого соевого лецитина.

Исходное содержание в жидком соевом лецитине веществ, нерастворимых в ацетоне и характеризующих содержание полярных липидов, т. е. фосфолипидов, составило 62,5 %; содержание веществ, растворимых в ацетоне и характеризующих содержание нейтральных липидов, т. е. триацилглицеринов и свободных жирных кислот, – 37,0 %; содержание веществ, нерастворимых в толуоле, – 0,16 %; содержание влаги и летучих веществ – 0,34 %. Кислотное число жидкого соевого лецитина равно 25,8 мгКОН/г, а перекисное число – 3,5 ммоль активного кислорода/кг.

Для осуществления процесса обезжиривания жидкого соевого лецитина использовали лабораторную реакторную систему LR-2.ST Package 3 Laboratory (IKA, Германия), оснащенную верхнеприводной мешалкой Eurostar 200 Control P4 с повышенным крутящим моментом, вакуумным насосом и термостатом для точного поддержания заданной температуры. Разделение фаз на раствор нейтральных липидов в ацетоне (ацетоновую мисцеллу) и фосфолипиды осуществляли фильтрованием. Сушку фосфолипидного изолята проводили в вакуум-сушильном шкафу VD 56 (Binder, Германия) под вакуумом 5 кПа при температуре 40 °С. Отгонку растворителя из ацетоновой мисцеллы осуществляли с помощью роторного испарителя IKA RV 10 Digital (IKA, Германия).

Обезжиривание жидкого соевого лецитина с применением в качестве растворителя ацетона осуществляли в три стадии. На каждой стадии одинаковыми были температура (40 °С) и продолжительность процесса обезжиривания (10 мин с интенсивностью перемешивания, характеризующейся частотой вращения мешалки 20 с⁻¹), а соотношение лецитин:ацетон (по массе) различными: 1:7 – на I стадии процесса обезжиривания, 1:6 – на II стадии, 1:5 – на III стадии.

Обработку УЗ-воздействием систем «жидкий лецитин – ацетон» и «частично обезжиренный лецитин – ацетон» в процессе обезжиривания осуществляли с помощью ультразвукового аппарата Волна (модель УЗТА-0,4/22-ОМ, ООО «Центр ультразвуковых технологий», Россия).

В качестве критерия эффективности процесса обезжиривания выбрали степень извлечения нейтральных липидов из жидкого лецитина ($C_{\text{НЛ}}$, %), которую определяли на каждой стадии обезжиривания по формуле (1):

$$C_{\text{НЛ}} = \frac{m_2}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

где m_1 – масса нейтральных липидов в лецитине, подаваемом на стадию обезжиривания, г; m_2 – масса нейтральных липидов в ацетоновой мисцелле после отгонки ацетона, г.

Определение содержания веществ, нерастворимых в ацетоне (фосфолипидов), в частично обезжиренных лецитинах осуществляли следующим образом. После окончания процесса обезжиривания на I и II стадиях осадок, полученный в результате фильтрования, сушили под вакуумом (5 кПа) при температуре 40 °С. Высушенный осадок измельчали с помощью лабораторной мельницы до получения однородного продукта. Отбирали пробу частично обезжиренного лецитина массой 5 г и многократно промывали предварительно охлажденным до 0 °С ацетоном до полного обезжиривания с последующим высушиванием и взвешиванием полученного

осадка. Расчет содержания веществ, нерастворимых в ацетоне (фосфолипидов), в частично обезжиренных лецитинах, которые получили на I и II стадиях, проводили по ГОСТ 35052-2013.

Содержание веществ, нерастворимых в ацетоне (фосфолипидов), веществ, нерастворимых в толуоле, влаги и летучих веществ, кислотного и перекисного чисел в фосфолипидном изоляте определяли по методикам согласно ГОСТ 35052-2013.

Содержание в фосфолипидном изоляте веществ, растворимых в ацетоне, т. е. нейтральных липидов (НЛ, %), определяли по формуле:

$$\text{НЛ} = 100 - (C_{\text{ф}} + C_{\text{т}} + C_{\text{в}}) \quad (2)$$

где $C_{\text{ф}}$ – содержание веществ, нерастворимых в ацетоне (фосфолипидов), %; $C_{\text{т}}$ – содержание веществ, нерастворимых в толуоле, %; $C_{\text{в}}$ – содержание влаги и летучих веществ, %.

Экспериментальные данные обрабатывали статистически с использованием пакета программ Statistica 12.0. Для проверки статистической значимости различий сравниваемых показателей использовали t-критерий Стьюдента. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение

Эффективность обработки УЗ-воздействием системы «лецитин – ацетон» в процессе обезжиривания жидкого лецитина будет зависеть от мощности, отнесенной к объему обрабатываемой системы (удельной мощности), и продолжительности обработки.

На первом этапе исследовали влияние обработки УЗ-воздействием системы «лецитин – ацетон» с различной удельной мощностью на степень извлечения нейтральных липидов ($C_{\text{НЛ}}$) на I, II и III стадиях обезжиривания жидкого лецитина по сравнению с $C_{\text{НЛ}}$ на указанных стадиях обезжиривания контрольного образца без УЗ-воздействия (рис. 1). Продолжительность УЗ-воздействия была постоянной и составляла 1 мин. Каждую стадию процесса обезжиривания жидкого лецитина проводили по разработанному ранее технологическому режиму. Общая продолжительность процесса обезжиривания составила 10 мин: 9 мин – интенсивное перемешивание с частотой вращения мешалки 20 с⁻¹, 1 мин – обработка УЗ-воздействием. Обезжиривание контрольного образца проводили без обработки УЗ-воздействием.

Из данных рисунка 1а видно, что на I стадии обезжиривания при увеличении удельной мощности УЗ-воздействия на систему «жидкий лецитин – ацетон» до 0,28 Вт/см³ $C_{\text{НЛ}}$ из жидкого лецитина повышается на 2,0 %, по сравнению с $C_{\text{НЛ}}$ из контрольного образца, – 46,1 против 44,1 %. При

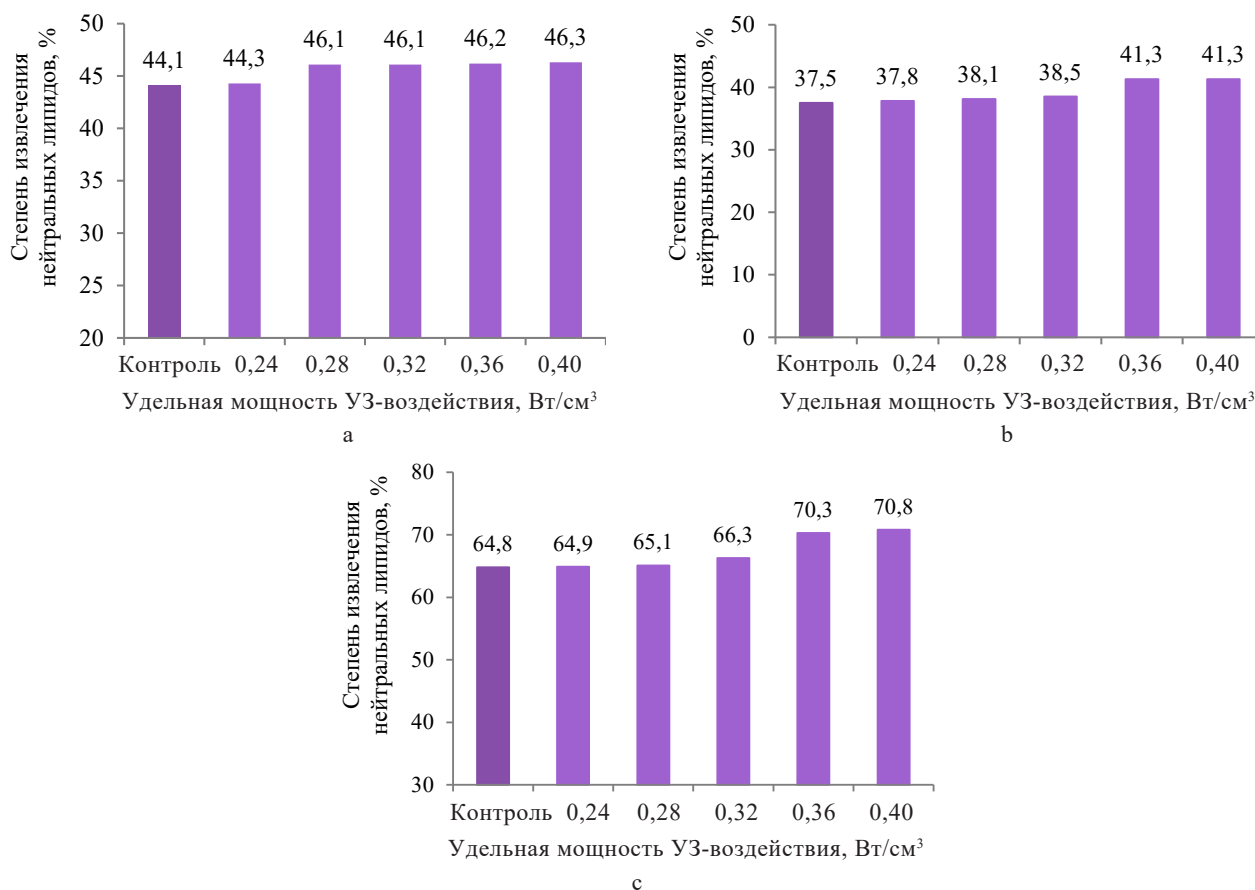


Рисунок 1. Влияние обработки УЗ-воздействием системы «лецитин – ацетон» с различной удельной мощностью на степень извлечения нейтральных $C_{\text{нл}}$ липидов на I стадии (а), II стадии (b) и III стадии (c) в процессе обезжиривания лецитина

Figure 1. Effect of ultrasonic exposure on lecithin – acetone system at different specific powers: extraction degree of neutral lipids at stage I (a), stage II (b), and stage III (c)

дальнейшем увеличении удельной мощности УЗ-воздействия $C_{\text{нл}}$ из жидкого лецитина изменяется незначительно.

Для повышения $C_{\text{нл}}$ из частично обезжиренного лецитина на II и III стадиях обезжиривания, по сравнению с $C_{\text{нл}}$ из контрольного образца, необходимо увеличение удельной мощности УЗ-воздействия при обработке систем «частично обезжиренный лецитин – ацетон» на указанных стадиях до 0,36 Вт/см³ (рис. 1b и 1c). Это связано с тем, что процесс извлечения нейтральных липидов из жидкого лецитина на I стадии происходит в системе «жидкость – жидкость», а на II и III стадиях в системе «твердое тело – жидкость», в которой при образовании твердой фазы снижается диффузия растворителя и эффективность извлечения нейтральных липидов.

Таким образом, установлена эффективность УЗ-воздействия при обработке систем «лецитин – ацетон» на I стадии обезжиривания с удельной мощностью 0,28 Вт/см³, на II и III стадиях – 0,36 Вт/см³.

В результате обработки системы «лецитин – ацетон» на каждой стадии процесса обезжиривания жидкого лецитина УЗ-воздействием при установленных эффективных значениях удельной мощности получили фосфолипидный изолят с содержанием целевого компонента (фосфолипидов) 96,2 %. Содержание фосфолипидов в контрольном образце фосфолипидного изолята, полученного без обработки УЗ-воздействия в процессе обезжиривания, составило 95,3 %.

На следующем этапе с целью сокращения количества экстрагента (ацетона) без отрицательного влияния на содержание целевого компонента в получаемом фосфолипидном изоляте проводили оптимизацию следующих факторов процесса обезжиривания: соотношение лецитин:ацетон (X_a) и продолжительность УЗ-воздействия (X_b) на каждой стадии процесса обезжиривания с применением методологии поверхности отклика (RSM). Влияние указанных факторов оценивали с помощью двухфакторного эксперимента. В качестве функций

отклика использовали степень извлечения нейтральных липидов на каждой стадии процесса обезжиривания лецитина, а также содержание целевого компонента – фосфолипидов (C_{ϕ}) – в частично обезжиренных лецитинах, полученных на I и II стадиях, и в фосфолипидном изоляте, полученном на III стадии.

В таблице 2 приведены данные, характеризующие влияние переменных факторов на функции отклика, а на рисунках 2–4 – их графическая интерпретация.

Обработку УЗ-воздействием системы «жидкий лецитин – ацетон» на I стадии обезжиривания проводили с удельной мощностью $0,28 \text{ Вт/см}^3$, на II и III стадиях – $0,36 \text{ Вт/см}^3$. Учитывая, что УЗ-воздействие является высокоэнергетическим методом, в результате которого повышается температура системы, то УЗ-воздействие осуществляли дискретно с перерывом в 10 с через каждую минуту обработки.

Из данных рисунков 2а, 3а и 4а видно, что при увеличении продолжительности УЗ-воздействия на

Таблица 2. Влияние переменных факторов на функции отклика на стадиях процесса обезжиривания жидкого лецитина

Table 2. Effect of variable factors on response functions at different de-oiling stages

№ опыта	Переменные факторы						Функции отклика ($C_{\text{нл}}$ и C_{ϕ} , %) на стадии обезжиривания					
	X_a	X_b	X_{a1}	X_{aII}	X_{aIII}	X_b	I		II		III	
							$C_{\text{нл}}$	C_{ϕ}	$C_{\text{нл}}$	C_{ϕ}	$C_{\text{нл}}$	C_{ϕ}
1	-1	-2	1:5	1:4	1:3	1	$30,8 \pm 0,2$	$73,9 \pm 0,2$	$20,8 \pm 0,1$	$85,1 \pm 0,2$	$23,6 \pm 0,2$	$91,6 \pm 0,1$
2	0	-2	1:6	1:5	1:4	1	$41,4 \pm 0,1$	$77,8 \pm 0,1$	$28,6 \pm 0,3$	$86,6 \pm 0,1$	$68,8 \pm 0,1$	$96,5 \pm 0,2$
3	+1	-2	1:7	1:6	1:5	1	$46,0 \pm 0,2$	$79,5 \pm 0,3$	$34,0 \pm 0,2$	$87,6 \pm 0,2$	$69,1 \pm 0,2$	$96,5 \pm 0,1$
4	-1	-1	1:5	1:4	1:3	2	$38,4 \pm 0,1$	$76,7 \pm 0,2$	$25,1 \pm 0,3$	$85,9 \pm 0,3$	$40,6 \pm 0,1$	$93,4 \pm 0,2$
5	0	-1	1:6	1:5	1:4	2	$44,9 \pm 0,2$	$79,1 \pm 0,1$	$32,0 \pm 0,2$	$87,2 \pm 0,1$	$88,5 \pm 0,1$	$98,6 \pm 0,1$
6	+1	-1	1:7	1:6	1:5	2	$48,6 \pm 0,2$	$80,5 \pm 0,2$	$36,2 \pm 0,3$	$87,9 \pm 0,1$	$88,8 \pm 0,2$	$98,6 \pm 0,2$
7	-1	0	1:5	1:4	1:3	3	$41,4 \pm 0,3$	$77,8 \pm 0,1$	$34,1 \pm 0,1$	$87,6 \pm 0,2$	$41,2 \pm 0,3$	$93,5 \pm 0,2$
8	0	0	1:6	1:5	1:4	3	$49,7 \pm 0,2$	$80,9 \pm 0,3$	$42,3 \pm 0,2$	$89,1 \pm 0,1$	$88,6 \pm 0,1$	$98,6 \pm 0,2$
9	+1	0	1:7	1:6	1:5	3	$50,5 \pm 0,1$	$81,2 \pm 0,2$	$45,5 \pm 0,1$	$89,7 \pm 0,2$	$89,1 \pm 0,2$	$98,6 \pm 0,1$
10	-1	+1	1:5	1:4	1:3	4	$43,8 \pm 0,2$	$77,7 \pm 0,2$	$36,2 \pm 0,1$	$86,8 \pm 0,2$	$41,3 \pm 0,2$	$93,2 \pm 0,1$
11	0	+1	1:6	1:5	1:4	4	$50,8 \pm 0,1$	$80,3 \pm 0,1$	$44,2 \pm 0,3$	$88,2 \pm 0,3$	$89,0 \pm 0,2$	$97,6 \pm 0,2$
12	+1	+1	1:7	1:6	1:5	4	$51,2 \pm 0,2$	$80,9 \pm 0,1$	$47,1 \pm 0,1$	$89,0 \pm 0,2$	$89,4 \pm 0,1$	$98,0 \pm 0,1$

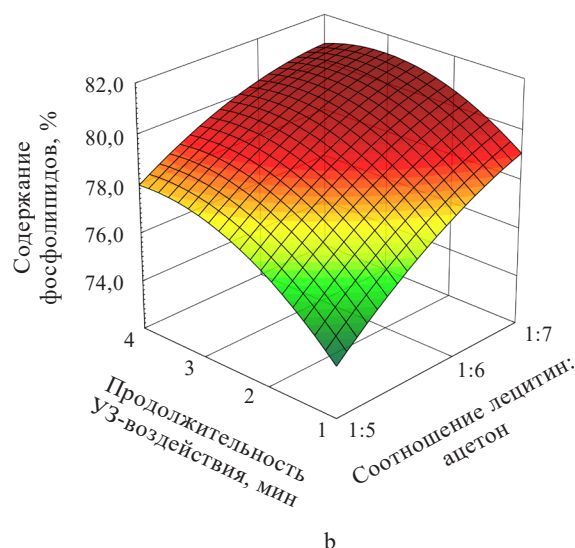
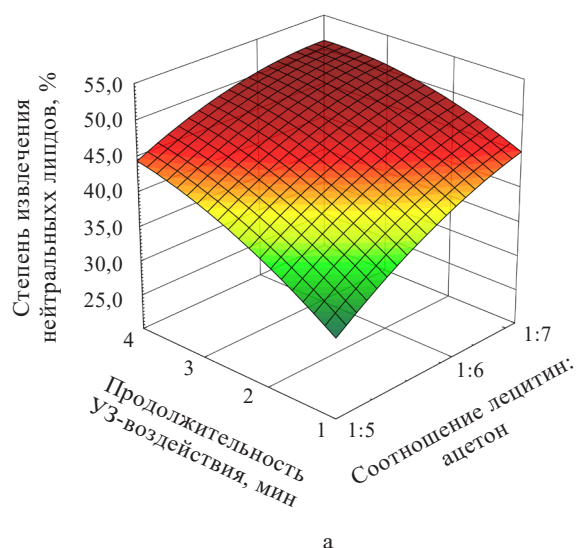


Рисунок 2. Влияние продолжительности УЗ-воздействия и соотношения лецитин:ацетон (по массе) на степень извлечения нейтральных липидов (а) в процессе обезжиривания жидкого лецитина на I стадии и на содержание фосфолипидов (б) в полученном частично обезжиренном лецитине

Figure 2. Effect of ultrasonic exposure time and lecithin:acetone ratio (by weight) on extraction degree of neutral lipids (a) and on content of phospholipids (b) in partially de-oiled lecithin: stage I

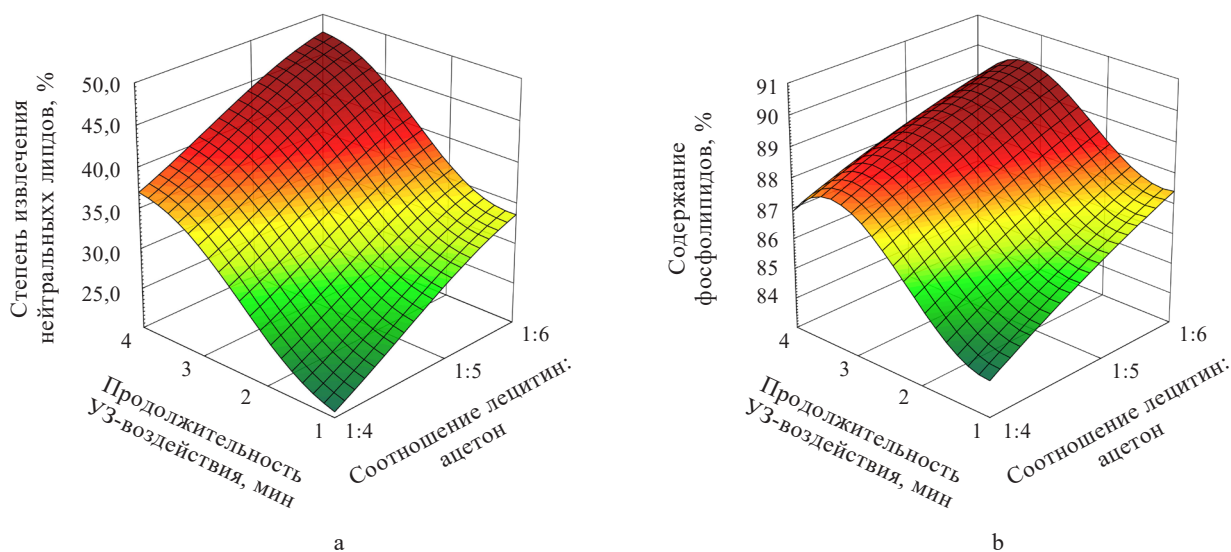


Рисунок 3. Влияние продолжительности УЗ-воздействия и соотношения лецитин:ацетон (по массе) на степень извлечения нейтральных липидов (а) в процессе обезжиривания жидкого лецитина на II стадии и на содержание фосфолипидов (б) в полученном частично обезжиренном лецитине

Figure 3. Effect of ultrasonic exposure time and lecithin:acetone ratio (by weight) on extraction degree of neutral lipids (a) and on content of phospholipids (b) in partially de-oiled lecithin: stage II

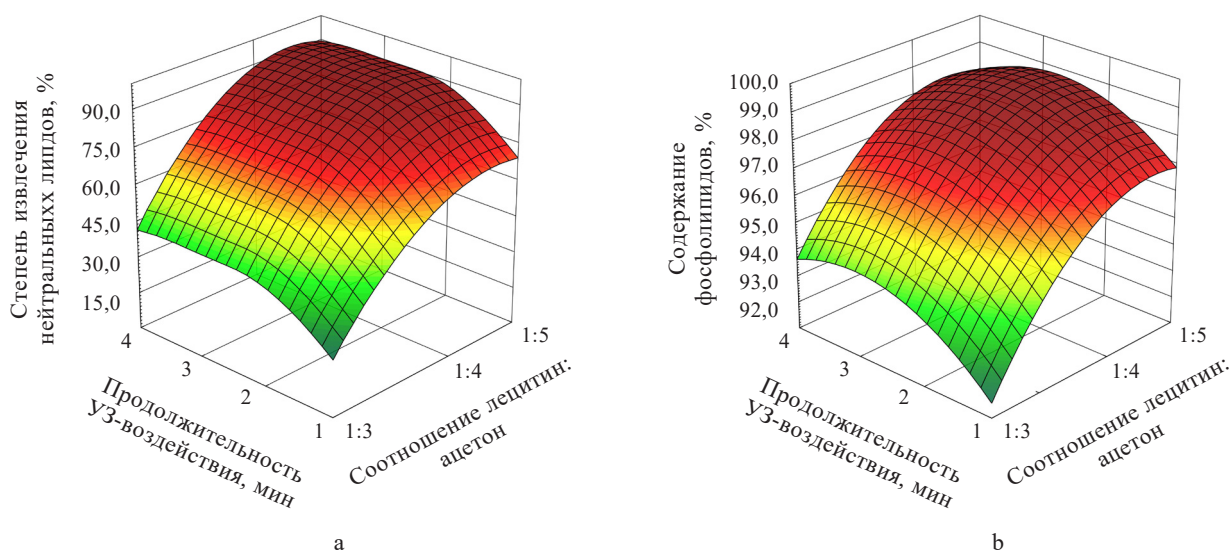


Рисунок 4. Влияние продолжительности УЗ-воздействия и соотношения лецитин:ацетон (по массе) на степень извлечения нейтральных липидов (а) в процессе обезжиривания жидкого лецитина на III стадии и на содержание фосфолипидов (б) в полученном фосфолипидном изоляте

Figure 4. Effect of ultrasonic exposure time and lecithin:acetone ratio (by weight) on extraction degree of neutral lipids (a) and on content of phospholipids (b) in phospholipid isolate: stage III

системы «лецитин – ацетон» при всех соотношениях компонентов степень извлечения нейтральных липидов на каждой стадии обезжиривания жидкого лецитина повышается. Однако из данных рисунков 2b и 3b видно, что на I и II стадиях при увеличении продолжительности УЗ-воздействия более 3 мин содержание фосфолипидов в полученных частично

обезжиренных лецитинах незначительно снижается, а на III стадии (рис. 4b) уменьшение содержания фосфолипидов в полученном фосфолипидном изоляте наблюдается при повышении продолжительности УЗ-воздействия более 2 мин. Это обусловлено частичным переходом некоторых групп фосфолипидов в ацетоновую мисцеллу.

В результате математической обработки экспериментальных данных получили уравнения, адекватно описывающие процесс обезжиривания лецитина на I, II и III стадиях с обработкой систем «лецитин – ацетон» УЗ-воздействием:

$$C_{\text{фI}} = 67,57 + 1,17X_b + 182,95X_a - 0,51X_b^2 + 13,2X_aX_b - 834,49X_a^2 \quad (3)$$

$$C_{\text{фII}} = 93,5 + 3,85X_b^2 - 0,57X_b^3 - 6,18X_a - X_b - 53,4X_a^2 + 0,76X_aX_b \quad (4)$$

$$C_{\text{фIII}} = 75,9 + 2,84X_b + 170,64X_a - 0,6X_b^2 + 2,5X_bX_a - 399X_a^2 \quad (5)$$

где $C_{\text{фI}}$ – содержание фосфолипидов в частично обезжиренном лецитине, полученном после I стадии процесса обезжиривания, %; $C_{\text{фII}}$ – содержание фосфолипидов в частично обезжиренном лецитине, полученном после II стадии процесса обезжиривания, %; $C_{\text{фIII}}$ – содержание фосфолипидов в фосфолипидном изоляте, полученном после III стадии процесса обезжиривания, %; X_a – соотношение лецитин:ацетон (по массе); X_b – продолжительность УЗ-воздействия, мин.

Коэффициент детерминации, характеризующий надежность уравнения регрессии R^2 , для уравнения (3) равен 0,9830, для уравнения (4) – 0,9752, для уравнения (5) – 0,9839.

В результате оптимизации параметров по максимизации функции отклика – содержанию фосфолипидов в частично обезжиренных лецитинах, полученных после I и II стадий, и в фосфолипидном изоляте, полученном после III стадии обезжиривания, – были установлены следующие режимы обезжиривания:

– на I стадии: продолжительность УЗ-воздействия с удельной мощностью 0,28 Вт/см³ в течение 3 мин и соотношением жидкий лецитин:ацетон (по массе) 1:6;

– на II стадии: продолжительность УЗ-воздействия с удельной мощностью 0,36 Вт/см³ в течение 3 мин и соотношением частично обезжиренный лецитин:ацетон (по массе) 1:5;

– на III стадии: продолжительность УЗ-воздействия с удельной мощностью 0,36 Вт/см³ в течение 2 мин

и соотношением частично обезжиренный лецитин:ацетон (по массе) 1:4.

Реализация указанных режимов обезжиривания на I стадии позволяет увеличить $C_{\text{нл}}$ на 5,6 %, по сравнению с $C_{\text{нл}}$ на I стадии обезжиривания контрольного образца лецитина без УЗ-воздействия, – 49,7 против 44,1 %. Соотношение жидкий лецитин:ацетон (по массе) снижается с 1:7 до 1:6.

На II стадии обезжиривания $C_{\text{нл}}$ на 4,8 % выше, по сравнению с $C_{\text{нл}}$ на III стадии обезжиривания контрольного образца лецитина без УЗ-воздействия, – 42,3 против 37,5 %. Соотношение частично обезжиренный лецитин:ацетон (по массе) снижается с 1:6 до 1:5.

На III стадии обезжиривания $C_{\text{нл}}$ на 23,6 % выше, по сравнению с $C_{\text{нл}}$ на III стадии обезжиривания контрольного образца лецитина без УЗ-воздействия, – 88,5 против 64,9 %. Соотношение частично обезжиренный лецитин:ацетон (по массе) снижается с 1:5 до 1:4.

В таблице 3 приведена сравнительная характеристика качества фосфолипидного изолята, полученного с УЗ-воздействием на системы «жидкий лецитин – ацетон» и «частично обезжиренный лецитин – ацетон», и фосфолипидного изолята, полученного без УЗ-воздействия на указанные системы (контрольный образец).

Данные, приведенные в таблице 3, позволяют сделать вывод о том, что содержание фосфолипидов в фосфолипидном изоляте, полученном по разработанным технологическим режимам процесса обезжиривания с обработкой УЗ-воздействием системы на каждой стадии, выше на 3,3 %, по сравнению с содержанием фосфолипидов в фосфолипидном изоляте, полученном в процессе обезжиривания без обработки УЗ-воздействием системы, – 98,6 против 95,3 %.

Выводы

Установили эффективность применения УЗ-воздействия для интенсификации процесса обезжиривания жидкого соевого лецитина. Определили эффективные технологические режимы процесса обезжиривания на каждой стадии:

Таблица 3. Сравнительная характеристика качества фосфолипидных изолятов

Table 3. Phospholipid isolates: comparative quality analysis

Образец фосфолипидного изолята	Содержание, %				Кислотное число, мг КОН/г	Перекисное число, ммоль О/кг
	Влаги и летучих веществ	Нерастворимых веществ		Растворимых веществ в ацетоне (нейтральных липидов)		
		в толуоле	в ацетоне (фосфолипидов)			
Контрольный (без УЗ-воздействия)	0,15 ± 0,05	0,15 ± 0,03	95,3 ± 0,1	4,4 ± 0,1	21,8 ± 0,5	3,3 ± 0,2
С УЗ-воздействием	0,15 ± 0,05	0,15 ± 0,03	98,6 ± 0,1	1,1 ± 0,1	20,5 ± 0,5	3,2 ± 0,2

– на I стадии: температура 40 °С, соотношение жидкий лецитин:ацетон (по массе) 1:6, общая продолжительность процесса обезжиривания 10 мин: 7 мин – интенсивное перемешивание с частотой вращения мешалки 20 с⁻¹, 3 мин – обработка УЗ-воздействием с удельной мощностью 0,28 Вт/см³ с дискретностью 10 с через каждую минуту обработки;

– на II стадии: температура 40 °С, соотношение частично обезжиренный лецитин:ацетон (по массе) 1:5, общая продолжительность процесса обезжиривания 10 мин: 7 мин – интенсивное перемешивание с частотой вращения мешалки 20 с⁻¹, 3 мин – обработка УЗ-воздействием с удельной мощностью 0,36 Вт/см³ с дискретностью 10 с через каждую минуту обработки;

– на III стадии: температура 40 °С, соотношение частично обезжиренный лецитин:ацетон (по массе) 1:4, общая продолжительность процесса обезжиривания 10 мин: 8 мин – интенсивное перемешивание с частотой вращения мешалки 20 с⁻¹, 2 мин – обработка УЗ-воздействием с удельной мощностью 0,36 Вт/см³ с дискретностью 10 с через каждую минуту обработки.

Таким образом, применение УЗ-воздействия в процессе обезжиривания жидкого соевого лецитина обеспечивает получение фосфолипидного изолята с более высоким содержанием целевого компонента (фосфолипидов) на 3,3 %, а также снижение расхода растворителя (ацетона) в 1,2 раза по сравнению с осуществлением процесса обезжиривания жидкого

соевого лецитина без применения УЗ-воздействия. Полученный фосфолипидный изолят может быть рекомендован в качестве пищевой добавки в технологиях продуктов питания.

Критерии авторства

Е. В. Лисовая – проведение литературного обзора по теме исследования, получение экспериментальных данных и их математическая обработка. Е. П. Викторова – разработка плана и методологии исследования, общая редакция рукописи. А. В. Свердличенко – получение экспериментальных данных. М. Р. Жане – получение экспериментальных данных.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

E.V. Lisovaya was responsible for the review, obtaining experimental data, and their mathematical processing. E.P. Viktorova developed the research plan, designed the methodology, and drafted the manuscript. A.V. Sverdlichenko and M.R. Zhane performed the experimental research.

Conflict of interest

The authors declared no conflict of interest regarding the publication of this article.

References/Список литературы

1. Alhajj MJ, Montero N, Yarcе CJ, Salamanca CH. Lecithins from vegetable, land, and marine animal sources and their potential applications for cosmetic, food, and pharmaceutical sectors. *Cosmetics*. 2020;7(4). <https://doi.org/10.3390/cosmetics7040087>
2. Gutiérrez-Méndez N, Chavez-Garay DR, Leal-Ramos MY. Lecithins: A comprehensive review of their properties and their use in formulating microemulsions. *Journal of Food Biochemistry*. 2022;46(7). <https://doi.org/10.1111/jfbc.14157>
3. Arepally D, Reddy RS, Goswami TK, Datta AK. Biscuit baking: A review. *LWT*. 2020;131. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109726>
4. Wang M, Yan W, Zhou Y, Fan L, Liu Y, Li J. Progress in the application of lecithins in water-in-oil emulsions. *Trends in Food Science and Technology*. 2021;118:388–398. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.10.019>
5. Robert C, Couëdelo L, Vaysse C, Michalski MC. Vegetable lecithins: A review of their compositional diversity, impact on lipid metabolism and potential in cardiometabolic disease prevention. *Biochimie*. 2020;169:121–132. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2019.11.017>
6. Küllenberg D, Taylor LA, Schneider M, Massing U. Health effects of dietary phospholipids. *Lipids in Health and Disease*. 2012;11. <https://doi.org/10.1186/1476-511X-11-3>
7. Robert C, Vaysse C, Michalski M-C. Vegetable lecithins: Their metabolic impacts as food-grade ingredients. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*. 2021;56(6):360–367. <https://doi.org/10.1016/j.cnd.2021.06.002>
8. Bot F, Cossuta D, O'Mahony JA. Inter-relationships between composition, physicochemical properties and functionality of lecithin ingredients. *Trends in Food Science and Technology*. 2021;111:261–270. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.028>
9. Lehri D, Kumari N, Singh RP, Sharma V. Composition, production, physicochemical properties and applications of lecithin obtained from rice (*Oryza sativa* L.) – A review. *Plant Science Today*. 2019;6(sp1):613–622. <https://doi.org/10.14719/pst.2019.6.sp1.682>

10. Lisovaya E, Viktorova E, Zhane M, Vorobyova O, Velikanova E. Research of the chemical composition peculiarities of food additives – vegetable lecithins for the development of methods for assessing their quality. *BIO Web of Conferences*. 2021;34. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213406009>
11. Lisovaya EV, Viktorova EP, Lisovoy VV. Analysis of the range of lecithins represented on the Russian market. *Technologies of the Food and Processing Industry of the Agro-Industrial Complex-Healthy Food Products*. 2019;28(2):51–55. (In Russ.). [Лисовая Е. В., Викторова Е. П., Лисовой В. В. Анализ ассортимента лецитинов, представленных на российском рынке // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2019. Т. 28. № 2. С. 51–55.]. <https://www.elibrary.ru/OHKTF5>
12. van Nieuwenhuizen W, Tomás MC. Update on vegetable lecithin and phospholipid technologies. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 2008;110(5):472–486. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200800041>
13. Cabezas DM, Madoery R, Diehl BWK, Tomás MC. Emulsifying properties of different modified sunflower lecithins. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 2012;89(2):355–361. <https://doi.org/10.1007/s11746-011-1915-8>
14. Miyasaki EK, Luccas V, Kieckbusch TG. Modified soybean lecithins as inducers of the acceleration of cocoa butter crystallization. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 2016;118(10):1539–1549. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201500093>
15. Bueschelberger HG, Tirok S, Stoffels I, Schoeppe A. Lecithins. In: Norn V, editor. *Emulsifiers in food technology*. John Wiley and Sons, Ltd; 2014. pp. 21–60. <https://doi.org/10.1002/9781118921265.ch2>
16. Joshi A, Paratkar SG, Thorat BN. Modification of lecithin by physical, chemical and enzymatic methods. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 2006;108(4):363–373. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200600016>
17. Sipki RR, Naumenko YuYu, Kitainov BV. Method of preparing phospholipid food product. Russia patent RU 2184459C1. 2002. [Способ получения фосфолипидного пищевого продукта: пат. 2184459C1 Рос. Федерация. № 2001120615/13 / Сипки Р. Р., Науменко Ю. Ю., Китаинов Б. В.; заявл. 23.07.2001; опубл. 10.07.2002. 5 с.].
18. Shul'ga SM, Glukh AI, Glukh IS. Method for isolating phospholipids from a phosphatide concentrate. Ukraine patent 54922. 2010. [Способ выделения фосфолипидов из фосфатидного концентрата: пат. 54922 Украина. № u201007237 / Шульга С. М., Глух А. И., Глух И. С.; заявл. 11.06.2010; опубл. 25.11.2010.].
19. Glotova IA, Vysockaya EA, Makarkina EN, Galochkina NA, Konstantinov VE, Shahov SV. Complex processing of phospholipide fractions of unrefined vegetable oils: Analysis of innovative technical approaches. *Food Industry*. 2019;(1):32–36. (In Russ.). [Комплексная переработка фосфолипидных фракций нерафинированных растительных масел: анализ инновационных технических подходов / И. А. Глотова [и др.] // Пищевая промышленность. 2019. № 1. С. 32–36.]. <https://www.elibrary.ru/YXHNEVN>
20. Roselló-Soto E, Galanakis CM, Brnčić M, Orlien V, Trujillo FJ, Mawson R, et al. Clean recovery of antioxidant compounds from plant foods, by-products and algae assisted by ultrasounds processing. Modeling approaches to optimize processing conditions. *Trends in Food Science and Technology*. 2015;42(2):134–149. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.01.002>
21. Bredihin SA, Andreev VN, Martekha AN, Schenzle MG, Korotkiy IA. Erosion potential of ultrasonic food processing. *Foods and Raw Materials*. 2021;9(2):335–344. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-335-344>
22. Paymulina AV, Potoroko IYu, Naumenko NV, Motovilov OK. Sonochemical microstructuring of sodium alginate to increase its effectiveness in bakery. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2023;53(1):13–24. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-1-2411>