

УДК 665.372

UDC 665.372

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ГИДРАТАЦИИ РАСТИТЕЛЬНОГО МАСЛА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЛЕЦИТИНА

IMPROVING THE PROCESS PARAMETERS OF VEGETABLE OIL HYDRATION FOR OBTAINING LECITHIN

Шагеева Адиля Ильсуровна
к.т.н., доцент

Shageeva Adilya Ilsurovna
Cand.Tech.Sci., Associate Professor

Илалова Гузель Фандасовна
к.т.н., доцент
Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

Ilalova Guzel Fandasovna
Cand.Tech.Sci., Associate Professor
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

Глубокая переработка маслосодержащего сырья представляет собой приоритетное направление, согласно Стратегии развития зернового комплекса Российской Федерации на период до 2035 года. Рассматриваемая в работе технология водной гидратации растительного масла, полученного путем СВЧ-вакуумной экстракции 96 % этиловым спиртом, позволяет реализовывать безотходный производственный цикл для выделения ценного фосфолипидного комплекса в виде лецитина, применяемого в различных отраслях промышленности. Статья посвящена оптимизации таких режимных параметров процесса гидратации растительного масла, как температура нагрева, время смешивания и процентное содержание дистиллированной воды в эмульсии для повышения эффективности выхода лецитина и снижения энергетических затрат при его производстве. Экспериментальные исследования проводились с варьированием температуры водно-масляной эмульсии в диапазоне 60-65 °С, времени перемешивания 20-100 мин и доли дистиллированной воды 2,5-8 %. Для анализа адекватности полученных данных в работе использовался центральный композиционный план (ЦКП) и регрессионное моделирование. Представлены кривые изменения выхода рапсового лецитина в процессе гидратации экстрагированного масла, позволяющие определить рациональную продолжительность этапов водной дегуммации для предотвращения эмульгирования масла и денатурации белков. На основе центрального композиционного плана (ЦКП) и регрессионного анализа установлено, что максимальный выход лецитина достигается при температуре гидратации 60 °С, доли дистиллированной воды в эмульсии 5 %,

Deep processing of oil-containing raw materials is a priority area according to the Strategy for Development of the Grain Complex of the Russian Federation until 2035. The technology of aqueous hydration of vegetable oil obtained by microwave vacuum extraction with 96% ethyl alcohol considered in the work allows implementing a waste-free production cycle for isolating a valuable phospholipid complex in the form of lecithin, used in various industries. The article is devoted to the optimization of such process parameters of vegetable oil hydration as heating temperature, mixing time and percentage of distilled water in the emulsion to increase the efficiency of lecithin yield and reduce energy costs in its production. Experimental studies were carried out with varying the temperature of the water-oil emulsion in the range of 60-65 °C, mixing time 20-100 min and the proportion of distilled water 2.5-8%. The central compositional plan (CCP) and regression modeling were used to analyze the adequacy of the obtained data. The curves of the change in the yield of rapeseed lecithin during the hydration of the extracted oil are presented, allowing us to determine the rational duration of the water degumming stages to prevent oil emulsification and protein denaturation. Based on the central compositional plan (CCP) and regression analysis, it was found that the maximum yield of lecithin is achieved at a hydration temperature of 60 °C, a proportion of distilled water in the emulsion of 5%, a duration of the mixing stage of oil and distilled water of 60 min at a rotation speed of the paddle mixer of 150 rpm

продолжительности этапа смешивания масла и дистиллированной воды 60 мин при скорости вращения лопастной мешалки 150 об./мин

Ключевые слова: ГИДРАТАЦИЯ, ВОДНО-ФОСФОЛИПИДНАЯ ФАЗА, ЛЕЦИТИНЫ, СВЧ-АКТИВАЦИЯ

Keywords: HYDRATION, WATER-PHOSPHOLIPID PHASE, LECITHINS, MICROWAVE ACTIVATION

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-213-029>

Введение. Лецитин, представляющий собой комплекс фосфолипидов, играет ключевую роль в различных отраслях промышленности, включая пищевую, фармацевтическую и сельскохозяйственную, благодаря своим эмульгирующим, стабилизирующим и биологически активным свойствам [8,12,15]. Способность лецитина улучшать реологические характеристики продуктов и проявлять антиоксидантную активность делает его незаменимым ингредиентом в производстве широкого спектра продукции. Особую ценность представляют растительные лецитины, которые отличаются высокой биодоступностью и безопасностью применения. В настоящее время большинство работ авторов посвящены поиску различных способов производства лецитина из отходов переработки масложирового производства [1,2,6,7,10,11]. Так, в работе авторов [9] представлена методика обезжиривания концентрата фосфатидов, полученного в процессе экстракции отходов подсолнечного масла изопропиловым спиртом. Показано, что экстракция алифатическими спиртами при повышенных температурах увеличивает выход фосфолипидов при многостадийности процесса, что в свою очередь приводит к повышению энергетических затрат.

Авторы [19] рассматривали процесс экстракции масла сверхкритическим диоксидом углерода из отрубей риса для получения селективных фракций, содержащих меньше свободных жирных кислот. В ходе проведенного анализа, полученных фракций, было установлено, что применение сверхкритического диоксида углерода в качестве

растворителя, сопровождаемого поддержанием высокого давления, наравне с упрощением процессов переработки растительного сырья ускоряет процесс окисления масла.

Способ получения гидратированного растительного масла и лецитина представлен в патенте Е.П. Викторовой и др. [13]. Данный способ включает в себя смешивание и выдержка нерафинированного растительного масла с водным раствором гидратирующего агента в виде лимонной и яблочной кислоты, отделение образовавшейся фосфолипидной эмульсии от масла и сушка полученных фаз. Недостатком данного способа является высокая температура процесса сушки гидратированного масла и лецитина, что может вызвать их термическую деградацию, а также необходимость дополнительной фильтрации масла для удаления остаточного содержания кислот.

Существующие традиционные методы получения растительного лецитина, такие как химическая экстракция с применением органических растворителей или механическое прессование семян, несмотря на свое широкое применение, сталкиваются с рядом проблем. Данные технологии обладают высокими энергозатратами, большой продолжительностью процессов, приводящих к возникновению риска термической деградации целевых компонентов рапсового масла, а также необходимости дополнительной очистки. Вкупе все эти факторы заставляют исследователей находить более эффективные и менее энергозатратные способы получения лецитинов из растительного сырья.

Одним из перспективных и рациональных направлений в данном вопросе является комбинирование технологий СВЧ вакуумной экстракции и водной гидратации. СВЧ вакуумная экстракция обеспечивает быстрый и равномерный нагрев сырья за счет диэлектрического эффекта, а также снижения температуры кипения растворителя, что предотвращает термическое разложение термолабильных веществ, таких как

фосфолипиды. Этап гидратации способствует селективному выделению лецитина из сложных матриц, позволяя увеличить чистоту конечного продукта и оптимизировать его физико-химические характеристики.

В работе [14] проанализированы различные способы получения жидких лецитинов. Особое внимание уделялось рапсовым лецитинам, обладающим более сбалансированным кислотным составом в отличие от соевого и подсолнечного лецитина. Образцы рапсовых семян, подвергнутые воздействию электромагнитного поля, показали рост в составе сырья фосфатидилхолинов и фосфатидилэтаноламинов, что способствует увеличению выхода лецитинов.

В этой связи, в целях определения оптимальных режимных параметров процесса водной гидратации, а также разработки рекомендаций для дальнейшего промышленного применения, были осуществлены экспериментальные исследования с использованием результатов ранее проведенных испытаний [17-18].

Целью данной работы является составление рекомендаций по режимным параметрам процесса получения растительного лецитина методом гидратации экстрагированного рапсового масла для дальнейшего промышленного использования.

Методы и материалы исследования. В качестве исходного сырья для исследования использовалось нерафинированное рапсовое масло, полученное методом СВЧ вакуумной экстракции 96 % этиловым спиртом. Для проведения процесса гидратации рапсовое масло помещали в колбу объемом 500 мл и с помощью лабораторного термостата Термех с применением верхнеприводного перемешивающего устройства Экрос ПЭ-8300 начинали процесс одновременного нагрева масла с дистиллированной водой и отделения дегуммированных фосфолипидов, формирующих лецитин (рис.1). Для чистоты эксперимента также были подготовлены образцы нерафинированного кукурузного масла, которые прошли

предварительную обработку в вакуумной СВЧ камере при мощности излучения 700 Вт, давлении 0,01 бар и температуре 40 °С в течение 5 мин. для деструкции клеточных структур и повышения доступности фосфолипидов.



Рис.1 – Лабораторное оборудование для процесса гидратации фосфолипидов

В результате перемешивания масла объемом 200 мл и дистиллированной воды объемом 10 мл при скорости вращения лопастной мешалки 150 об./мин. и температуре нагрева 62 °С наблюдалось образование двух фаз – масляной и водно-фосфолипидной. Далее для количественного разделения нижнего слоя фосфатидного концентрата от полученной водно-масляной эмульсии использовали лабораторную центрифугу Ulab UC-1412A. Под действием центробежной силы при скорости раскручивания центрифуги 2000 об./мин. и вращении в течение 10 мин. происходит осаждение более тяжелой водно-фосфолипидной фазы на дне, в то время как масло поднимается вверх.

После завершения этапа центрифугирования полученный гидратированный лецитин отделялся пипеткой и промывался в химическом стакане дистиллированной водой для удаления следов масла и водорастворимых примесей. Далее промытый лецитин в чашках Петри направлялся в вакуумный шкаф для сушки до остаточной влажности 3% при температуре 45 °С в течение 8 часов. На этом этапе высушенный

лецитин можно подвергнуть дополнительной очистке для повышения его качества и концентрации фосфолипидных групп [1,4].

Для планирования эксперимента и оптимизации режимных параметров процесса гидратации использовали метод центрального композиционного плана (ЦКП) для трех независимых переменных. Температура гидратации рассматривалась в диапазоне 60-65 °С, время перемешивания – 20-100 мин и доля дистиллированной воды – 2,5-8 %.

Результаты и обсуждение. В результате эксперимента по гидратации нерафинированного рапсового масла при центрифугировании наблюдалось четкое разделение водно-фосфолипидной фазы с хлопьевидными осадками лецитина (рис.2).

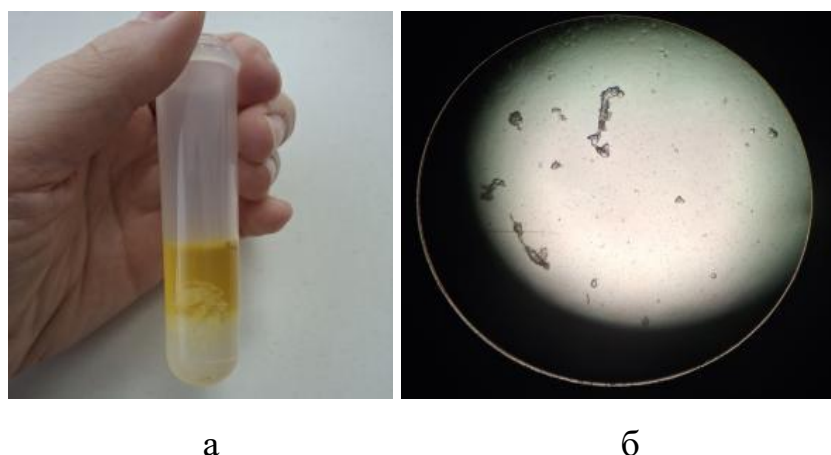


Рис.2 – Результаты оседания фосфолипидов после центрифугирования водно-масляной эмульсии: а – вид в пробирке; б – вид через микроскоп

С целью определения влияния нескольких факторов (температура, время, доля дистиллированной воды) на выход лецитина была проведена статистическая обработка полученных экспериментальных данных процесса гидратации рапсового масла, представленная в таблице 1 в виде матрицы по ЦКП. 1). На основе данных эксперимента, спланированного по ЦКП, было получено уравнение регрессии (1) для трех факторов:

$$Y = 78,6 + 4,2X_1 + 3,8X_2 + 2,5X_3 - 1,1X_1X_2 - 0,9X_1X_3 - 0,7X_2X_3 - 2,3X_1^2 - 1,8X_2^2, \quad (1)$$

где X_1 – температура водно-масляной эмульсии, °С; X_2 – время перемешивания, мин.; X_3 – доля дистиллированной воды, %.

На рис.3 представлены кривые изменения выхода рапсового лецитина, полученные в результате гидратации при серии экспериментов с продолжительностью процесса перемешивания 20, 60 и 100 мин и доли применяемой дистиллированной воды 2,5 и 8 % от объема растительного масла. На графических зависимостях видно, что для полного взаимодействия фосфолипидов с водой для получения максимального выхода лецитина оптимальным временем гидратации является 60 мин при доли дистиллированной воды 5 %. Дальнейшее увеличение времени и концентрации воды в масляной эмульсии вызывает эмульгирование масла и затрудняет разделение фаз.

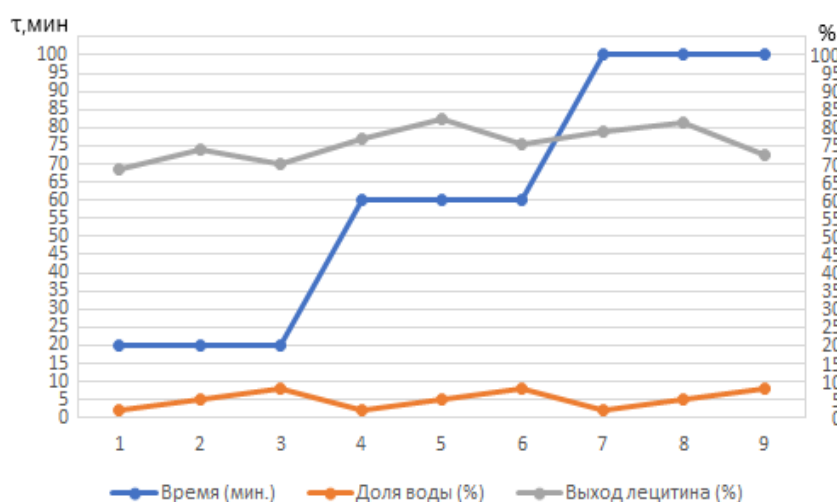


Рис.6 – Зависимость изменения выхода лецитина при разной продолжительности процесса гидратации и доли дистиллированной воды в системе «масло-вода»

Анализ уравнения регрессии показал, что наибольшее положительное влияние на выход лецитина оказывает увеличение доли дистиллированной воды, тогда как квадратичные члены всех факторов оказывают отрицательное воздействие, что свидетельствует о наличии оптимума в исследованной области. Взаимодействие между температурой и долей дистиллированной воды также оказывает значительный отрицательный эффект, что указывает на необходимость тщательного подбора данных параметров.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что предлагаемая в работе технология при водной гидратации экстрагированного рапсового масла подвергнутого СВЧ-активации позволяет повысить выход лецитина на 18-22 % и сократить продолжительность процесса в 1,5 раза, по сравнению с традиционными энергозатратными методами [3,5,16,20].

Таблица 1 – Матрица ЦКП

№	Кодированные значения	Натуральные значения	Тип точки	Источник
	X ₁	X ₂	X ₃	
1	-1	-1	-1	Опыты по плану ПФЭ
2	+1	-1	-1	
3	-1	+1	-1	
4	+1	+1	-1	
5	-1	-1	+1	
6	+1	-1	+1	
7	-1	+1	+1	
8	+1	+1	+1	
9	-1	0	0	Набор звездных точек
10	0	0	0	
11	0	-1	0	
12	0	+1	0	
13	0	0	-1	
14	0	0	+1	
15	0	0	0	Центр плана
16	0	0	0	
17	0	0	0	
18	0	0	0	
19	0	0	0	
20	0	0	0	

Выводы. В ходе работы были сделаны следующие выводы:

1. Получена кинетическая зависимость выхода рапсового лецитина от времени процесса гидратации и процентного соотношения дистиллированной воды в водно-масляной эмульсии.

2. Увеличение скорости вращения лопастной мешалки более 150 об./мин в процессе гидратации растительного масла не оказывает существенного влияния на выход водно-фосфолипидной фазы.

3. Получены оптимальные режимные параметры процесса гидратации рапсового масла для максимизации выхода лецитина с сохранением функциональных свойств белковых фракций:

- температура гидратации составляет 60 °С: дальнейшее повышение температуры до 65 °С приводит к частичной денатурации белков и снижению выхода лецитина на 6-8 %;

- время смешивания масла и дистиллированной воды составляет 60 мин: дальнейшее повышение времени свыше 70 мин незначительно влияет на выход лецитина +1,2 %, но увеличивает энергозатраты;

- доля воды в эмульсии составляет 5 % от объема масла: превышение значения больше 7 % вызывает эмульгирование масла с затруднением разделения фаз.

Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение влияния применения в процессах гидратации различных гидротропных добавок и их концентрации для регулирования рН среды на выход растительного лецитина.

Библиографический список

1. Alwani Hamad, Noni Indriani, Noni Indriani. Production Of Lecithin As An Emulsifier From Vegetable Oil Using Water Degumming Process // Techno. Vol. 23(2), 2022.P.139-143. DOI: 10.30595/techno.v23i2.15189.
2. Alexey Kabalnov, Jeffry Weers, Rebecca Arlauskas, Thomas Tarara. Phospholipids as Emulsion Stabilizers. 1. Interfacial Tensions // Langmuir, 1995, Vol. 11(8), pp.2966–2974. . DOI: 10.1021/la00008a020.

3. Anne Lomascolo. Rapeseed and sunflower meal: a review on biotechnology status and challenges // *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2012, Vol. 95, pp. 1105–1114. . DOI: 10.1007/s00253-012-4250-6.
4. El-Shattory Y. Soybean lecithin: acetone insoluble residue fractionation and their volatile components // *Grasas y Aceites*, 2002, Vol. 53(3), pp. 319–323. DOI: 10.3989/gya.2002.v53.i3.323.
5. Fox Christopher B. Effects of emulsifier concentration, composition, and order of addition in squalene-phosphatidylcholine oil-in-water emulsions // *Pharmaceutical Development and Technology*, 2011, Vol. 16(5), pp. 511–519. . DOI: 10.3109/10837450.2010.495397.
6. Johnson V. J. Simultaneous Extraction of Phosphatidylcholine and Phosphatidylethanolamine from Soybean Lecithin // *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2015, Vol. 117(10), pp. 1647–1654. . DOI: 10.1002/ejlt.201400396.
7. Katherine Preece, Nasim Hooshyar, N.J. Zuidam. Whole soybean protein extraction processes: A review // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, Vol. 43, pp.163–172. . DOI: 10.1016/j.ifset.2017.07.024.
8. Корнен Н. Н. Применение растительных фосфолипидов (лецитинов) в производстве хлебобулочных изделий // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2016. № 116. С. 288–300.
9. Maryna Lutsenko, Mykola Kharytonov, Gregorio Peron. Production of edible lecithin from sunflower-oil refining waste // *International Journal of Environmental Studies*, 2024, Vol. 81(1), pp. 432–445. DOI: 10.1080/00207233.2024.2314845.
10. Michael H. Gordon, Ibrahim Abdul Rahman. Effect of Processing on the Composition and Oxidative Stability of Coconut Oil // *Journal of the American Oil Chemists Society*, 1991, Vol. 68(8), pp.574–576. DOI: 10.1007/bf02660153.
11. Mutya Cruz , Miao Wang, Jessica Frisch-Daiello, Xianlin Han. Improved Butanol-Methanol (BUME) Method by Replacing Acetic Acid for Lipid Extraction of Biological Samples // *Lipids*, 2016, Vol. 51(7), pp.887–896. DOI: 10.1007/s11745-016-4164-7.
12. Parchem K., Sasson Sh., Carla Ferreri & Agnieszka Bartoszek. Qualitative analysis of phospholipids and their oxidised derivatives – used techniques and examples of their applications related to lipidomic research and food analysis // *Free Radical Research*, 2019, Vol. 53(1), pp. 1068–1100. DOI: 10.1080/10715762.2019.1657573.
13. Патент № 2735256 С1 РФ, МПК C11B 3/00. Способ получения гидратированного растительного масла и лецитина: № 2020113808: заявл. 03.04.2020: опубл. 29.10.2020. Бюл. №31 / Е.П. Викторова, С.А. Калманович, Е.А. Вербицкая, Л.А. Марченко, О.С. Воронцова; заявитель ФГБОУ ВО «КубГТУ».
14. Пашенко В. Н. Разработка инновационной технологии получения жидких лецитинов: дис. канд. техн. наук. Краснодар.2013. 130 с.
15. Попов В.Г. Перспективы использования фосфолипидно-растительного пищевого комплекса для производства функциональных продуктов питания // *Пищевая промышленность*.2020. № 7. С. 8–12.
16. Tahreem Riaz, Muhammad Waheed Iqbal, Shahid Mahmood, Iqra Yasmin, Ali Ahmad Leghari, Abdur Rehman, Anam Mushtaq, Khubaib Ali, Muhammad Azam, Muhammad Bilal. Cottonseed oil: A review of extraction techniques, physicochemical, functional, and nutritional properties // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, Vol. 63(9), pp. 1219–1237. DOI: 10.1080/10408398.2021.1963206.
17. Шагеева А.И., Аникеева К.Г., Сафин Р.Р. Комплексная переработка сельскохозяйственных масличных культур: потенциал использования

электромагнитного поля СВЧ-диапазона // Системы. Методы. Технологии.2024. №4(64).С. 151–158.

18. Шагеева А.И., Кайнов П.А., Сафин Р.Р. Математическое моделирование процессов СВЧ сушки пиломатериалов в осциллирующем режиме // Деревообрабатывающая промышленность. 2022. № 2. С. 44–54.

19. Weiqi Zhao, Akihiro Shishkura, Kenshiro Fujimoto, Kunio Arai, Shozaburo Saito. Fractional Extraction of Rice Bran Oil with Supercritical Carbon Dioxide // Agricultural and Biological Chemistry, 1987, Vol. 51(7), pp. 1773–1777. DOI: 10.1080/00021369.1987.10868305.

20. Willem van Nieuwenhuyzen, Mabel C. Tomas. Update on vegetable lecithin and phospholipid technologies // European Journal of Lipid Science and Technology, 2008, Vol. 110(5), pp.472–486. DOI: 10.1002/ejlt.200800041.

References

1. Alwani Hamad, Noni Indriani, Noni Indriani. Production Of Lecithin As An Emulsifier From Vegetable Oil Using Water Degumming Process // Techno. Vol. 23(2), 2022.P.139-143. DOI: 10.30595/techno.v23i2.15189.

2. Alexey Kabalnov, Jeffry Weers, Rebecca Arlauskas, Thomas Tarara. Phospholipids as Emulsion Stabilizers. 1. Interfacial Tensions // Langmuir, 1995, Vol. 11(8), pp.2966–2974. . DOI: 10.1021/la00008a020.

3. Anne Lomascolo. Rapeseed and sunflower meal: a review on biotechnology status and challenges // Applied Microbiology and Biotechnology, 2012, Vol. 95, pp. 1105–1114. . DOI: 10.1007/s00253-012-4250-6.

4. El-Shattory Y. Soybean lecithin: acetone insoluble residue fractionation and their volatile components // Grasas y Aceites, 2002, Vol. 53(3), pp. 319–323. DOI: 10.3989/gya.2002.v53.i3.323.

5. Fox Christopher B. Effects of emulsifier concentration, composition, and order of addition in squalene-phosphatidylcholine oil-in-water emulsions // Pharmaceutical Development and Technology, 2011, Vol. 16(5), pp. 511–519. . DOI: 10.3109/10837450.2010.495397.

6. Johnson V. J. Simultaneous Extraction of Phosphatidylcholine and Phosphatidylethanolamine from Soybean Lecithin // European Journal of Lipid Science and Technology, 2015, Vol. 117(10), pp. 1647–1654. . DOI: 10.1002/ejlt.201400396.

7. Katherine Preece, Nasim Hooshyar, N.J. Zuidam. Whole soybean protein extraction processes: A review // Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, Vol. 43, pp.163–172. . DOI: 10.1016/j.ifset.2017.07.024.

8. Kornen, N. N. Application of plant phospholipids (lecithins) in the production of bakery products / Politematicheskij setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Polythematic online electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University, 2016. no. 116, pp. 288–300. (In Russ.)

9. Maryna Lutsenko, Mykola Kharytonov, Gregorio Peron. Production of edible lecithin from sunflower-oil refining waste // International Journal of Environmental Studies, 2024, Vol. 81(1), pp. 432–445. DOI: 10.1080/00207233.2024.2314845.

10. Michael H. Gordon, Ibrahim Abdul Rahman. Effect of Processing on the Composition and Oxidative Stability of Coconut Oil // Journal of the American Oil Chemists Society, 1991, Vol. 68(8), pp.574–576. DOI: 10.1007/bf02660153.

11. Mutya Cruz, Miao Wang, Jessica Frisch-Daiello, Xianlin Han. Improved Butanol-Methanol (BUME) Method by Replacing Acetic Acid for Lipid Extraction of Biological Samples // Lipids, 2016, Vol. 51(7), pp.887–896. DOI: 10.1007/s11745-016-4164-7.

12. Parchem K., Sasson Sh., Carla Ferreri & Agnieszka Bartoszek. Qualitative analysis of phospholipids and their oxidised derivatives – used techniques and examples of their applications related to lipidomic research and food analysis // *Free Radical Research*, 2019, Vol. 53(1), pp. 1068–1100. DOI: 10.1080/10715762.2019.1657573.

13. E.P. Viktorova, S.A. Kalmanovich, E.A. Verbitskaya, L.A. Marchenko, O.S. Vorontsova. Method for obtaining hydrated vegetable oil and lecithin. Patent RF, no. 2735256 C1, 2020. (In Russ.).

14. Pashchenko V. N. Development of innovative technology for obtaining liquid lecithins: Cand. Techn. Sci. Diss. Krasnodar. 2013. 130 p. (In Russ.)

15. Popov V.G. Prospects for the use of phospholipid-plant food complex for the production of functional foods // *Pishchevaya promyshlennost' = Food industry*, 2020. no. 7, pp. 8–12. (In Russ.)

16. Tahreem Riaz, Muhammad Waheed Iqbal, Shahid Mahmood, Iqra Yasmin, Ali Ahmad Leghari, Abdur Rehman, Anam Mushtaq, Khubaib Ali, Muhammad Azam, Muhammad Bilal. Cottonseed oil: A review of extraction techniques, physicochemical, functional, and nutritional properties // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, Vol. 63(9), pp. 1219–1237. DOI: 10.1080/10408398.2021.1963206.

17. Shageeva A.I., Anikeeva K.G., Safin R.R. Complex processing of agricultural oilseeds: potential of using microwave electromagnetic field // *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2024. no. 4 (64), pp. 151–158. (In Russ.)

18. Shageeva A.I., P.A. Kainov, R.R. Safin, R.R. Khasanshin. Mathematical modeling of the processes of microwave drying of lumber in an oscillating mode // *Derevoobrabatывayushchaya promyshlennost' = Woodworking industry*. 2022. no.2, pp.44–54. (In Russ.)

19. Weiqi Zhao, Akihiro Shishkura, Kenshiro Fujimoto, Kunio Arai, Shozaburo Saito. Fractional Extraction of Rice Bran Oil with Supercritical Carbon Dioxide // *Agricultural and Biological Chemistry*, 1987, Vol. 51(7), pp. 1773–1777. DOI: 10.1080/00021369.1987.10868305.

20. Willem van Nieuwenhuyzen, Mabel C. Tomas. Update on vegetable lecithin and phospholipid technologies // *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2008, Vol. 110(5), pp.472–486. DOI: 10.1002/ejlt.200800041.