

УДК 615.322:547.913(571)

ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МАСЛА ЧЕРЕМУХИ МЕТОДОМ СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ФЛЮИДНОЙ ЭКСТРАКЦИИ

© Т.Э. Скребец*, А.Д. Ивахнов, Х.Б. Маматмуродов

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова,
наб. Северной Двины, 17, Архангельск, 163002 (Россия),
e-mail: tskrebets@mail.ru

Жмых ягод черемухи, являющийся отходом ликероводочного производства, содержит в своем составе биологически активные вещества, в том числе липиды, не извлекаемые этанолом в основном производстве. Сверхкритический диоксид углерода является хорошим экстрагентом для подобных соединений. Методом полного факторного эксперимента с использованием ротатбельного униформ-плана второго порядка проведен процесс оптимизации извлечения масла черемухи из переработанных ягод методом сверхкритической флюидной экстракции диоксидом углерода. При планировании в качестве основных уровней выбраны давление 250 атм, температура 60 °С, гидромодуль 25. Для увеличения точности оптимизации проведено последовательное включение дополнительных коэффициентов на основании невозрастания критерия Фишера. Анализ уравнения регрессии позволил установить оптимальные параметры процесса: температура 70 °С, давление 350 атм, гидромодуль 33 при выходе масла 1.4% (степень извлечения 85%). Относительная ошибка модели составила 1%. Для полученного продукта определены кислотное, йодное, эфирное числа, число омыления, а также органолептические показатели. Полученный продукт обогащен триацилглицеридами, свободными жирными кислотами и низкомолекулярными органическими кислотами и содержит незначительное количество непредельных высших карбоновых кислот по сравнению с маслом, выделенным экстракцией в аппарате Сокслета гексаном.

Ключевые слова: черемуха, масло, состав, сверхкритическая флюидная экстракция, диоксид углерода, ротатбельный план, оптимизация.

Введение

В настоящее время большинство биологически активных веществ (БАВ) получают из природного сырья растительного происхождения. Черемуха обыкновенная *Padus avium Mill.* является представителем семейства розоцветных и представляет собой потенциальный источник эфирных масел, флавоноидов, дубильных веществ, липидов и др. БАВ [1]. Плоды черемухи содержат сахара (до 12%), антоцианы (до 8%), дубильные вещества (до 15%), флавоноиды, пектины (до 1.1%), яблочную и лимонную кислоты (до 1.5%), аскорбиновую кислоту (до 19 мг/100 г) [2, 3] и применяются в ликероводочной промышленности для изготовления десертных напитков. Остающийся в качестве отхода жмых содержит в своем составе БАВ (витамины, дубильные вещества, антоцианы, флавоны и др., в том числе липиды) и вполне пригоден для последующей переработки. Липиды практически не извлекаются из сырья при экстракции этанолом в основном производстве и, таким образом, могут быть извлечены при обработке подходящим экстрагентом. Фитотерапевтическая значимость липидов обусловлена тем фактом, что чаще всего липиды не синтезируются в организме человека, а попадают в него с пищей, и недостаток жирных кислот приводит к заболеваниям кожи, почек и т.д. Жирные кислоты активизируют ферменты пищеварительного тракта, поддерживают защитные

силы организма, способствуют выведению излишков холестерина [4].

Извлечение липидов обычно осуществляется экстракцией гидрофобными органическими растворителями [5]. Сверхкритическая флюидная экстракция (СФЭ) диоксидом углерода является конкурентноспособным процессом, поскольку

Скребец Татьяна Эдуардовна – доцент кафедры теоретической и прикладной химии,
e-mail: tskrebets@mail.ru

Ивахнов Артем Дмитриевич – старший научный сотрудник Центра коллективного пользования научным оборудованием «Арктика», e-mail: tskrebets@mail.ru

Маматмуродов Хуршед Бегмахмудович – студент,
e-mail: khurshedjon906@gmail.com

* Автор, с которым следует вести переписку.

позволяет извлекать масла из растительного сырья практически с тем же выходом, что и классическая экстракция [6–9], при этом качественные показатели масла не ухудшаются, а экстрагент легко удаляется при сбросе давления.

В настоящее время для оптимизации технологических процессов, в том числе и для сверхкритической флюидной экстракции, часто используют методы активного планированного многофакторного эксперимента с построением униформ-планов второго порядка, позволяющих получить квадратичную регрессионную модель в виде полинома второй степени, учитывающую влияние на процесс не менее трех факторов [10–15]. Методы основаны на общих подходах в получении и анализе поверхностей отклика [16–18].

Цель работы – оптимизация условий сверхкритической флюидной экстракции жмыха плодов черемухи методом полного факторного эксперимента.

Объект и методы исследования

Жмых плодов черемухи, предоставленный ООО «Архангельский ликероводочный завод», высушен при 105 °С до влажности 5% и размолот в лабораторной мельнице. Обработкам подвергали фракцию размером 0.2–2.0 мм. Сверхкритическую флюидную экстракцию проводили на установке SCFE-5000 производства Waters, (США) при используемой навеске 100 г абсолютно сухого сырья при скорости подачи экстрагента 50 г/мин. Массовую долю масла находили контрольной экстракцией гексаном в аппарате Сокслета с последующей отгонкой растворителя в вакууме. Классическим методом (экстракция н-гексаном) установлено содержание масла 1.65±0.10%. Определение химических показателей (кислотное, йодное, эфирное числа, число омыления) проводили по стандартным методикам [19].

Результаты и обсуждение

Для математического описания СФЭ жмыха черемухи и определения оптимальных параметров проведения процесса проведен планированный эксперимент с построением центрального композиционного ротатального униформ-плана второго порядка [20, 21]. В качестве основных уровней давления (X), температуры (Y) и гидромодуля (Z) обработки выбраны 250 атм, 60 °С и 25. Интервалы варьирования 60 атм, 15 °С и 10. Звездное плечо плана 1.682. Уровни факторов представлены в таблице 1. Матрица планирования в натуральном виде и полученные экспериментальные результаты представлены в таблице 2.

В процессе эксперимента проведено 20 опытов, выход масла изменялся от 0.7 до 1.4%. В центре плана проведено 6 опытов, анализ которых показал высокую сходимость результатов – дисперсия воспроизводимости не превысила 0.1. Максимальный выход был установлен при давлении 351 атм и нулевом уровне факторов температуры и гидромодуля экстракции и составил 1.4%. Сравнение выхода масла при СФЭ диоксидом углерода с выходом, полученным экстракцией по Сокслету, показало, что степень извлечения составляет 85%.

В результате математической обработки результатов с помощью пакета *MS Excel* получено уравнение регрессии, адекватно описывающее зависимость выхода экстракта от условий проведения процесса экстракции (1). Уровень значимости при проверке адекватности по критерию Фишера принят равным 0.05.

$$W = 1.10 + 0.26x - 0.01y + 0.08z + 0.02xy - 0.01xz + 0.03yz - 0.07x^2 - 0.05y^2 - 0.06z^2, \quad (1)$$

где $x = (X-250)/60$; $y = (Y-60)/15$; $z = (Z-25)/10$.

Коэффициент множественной корреляции экспериментальных и расчетных значений выхода R составил 0.964 при относительной ошибке σ 5.4%, данные представлены на рисунке 1а.

Таблица 1. Уровни факторов при оптимизации извлечения масла черемухи методом сверхкритической флюидной экстракции

Переменные факторы	Обозначение фактора	Уровни факторов и интервалы варьирования					
		Шаг варьирования	Интервалы варьирования				
			-1.682 (- α)	-1	0	1	1.682 (α)
Давление, P, атм.	X	60	149	190	250	310	351
Температура, t, °С	Y	15	35	45	60	75	85
Гидромодуль	Z	10	8,2	15	25	35	42

Таблица 2. Матрица планирования эксперимента в натуральном виде

№ опыта	Величина фактора			Выход масла (W), %	Степень извлечения, %
	X (P), атм	Y(t), °C	Z(гидромодуль),		
1	190	45	15	0.7	42
2	310	45	15	1.1	69
3	190	75	15	0.6	35
4	310	75	15	1.1	69
5	190	45	35	0.8	49
6	310	45	35	1.2	74
7	190	75	35	0.9	49
8	310	75	35	1.3	79
9	149	60	25	0.4	23
10	351	60	25	1.4	85
11	250	35	25	1.0	60
12	250	85	25	0.9	57
13	250	60	8,2	0.7	46
14	250	60	42	1.1	65
15	250	60	25	1.1	66
16	250	60	25	1.1	69
17	250	60	25	1.1	67
18	250	60	25	1.3	81
19	250	60	25	1.1	66
20	250	60	25	1.0	59

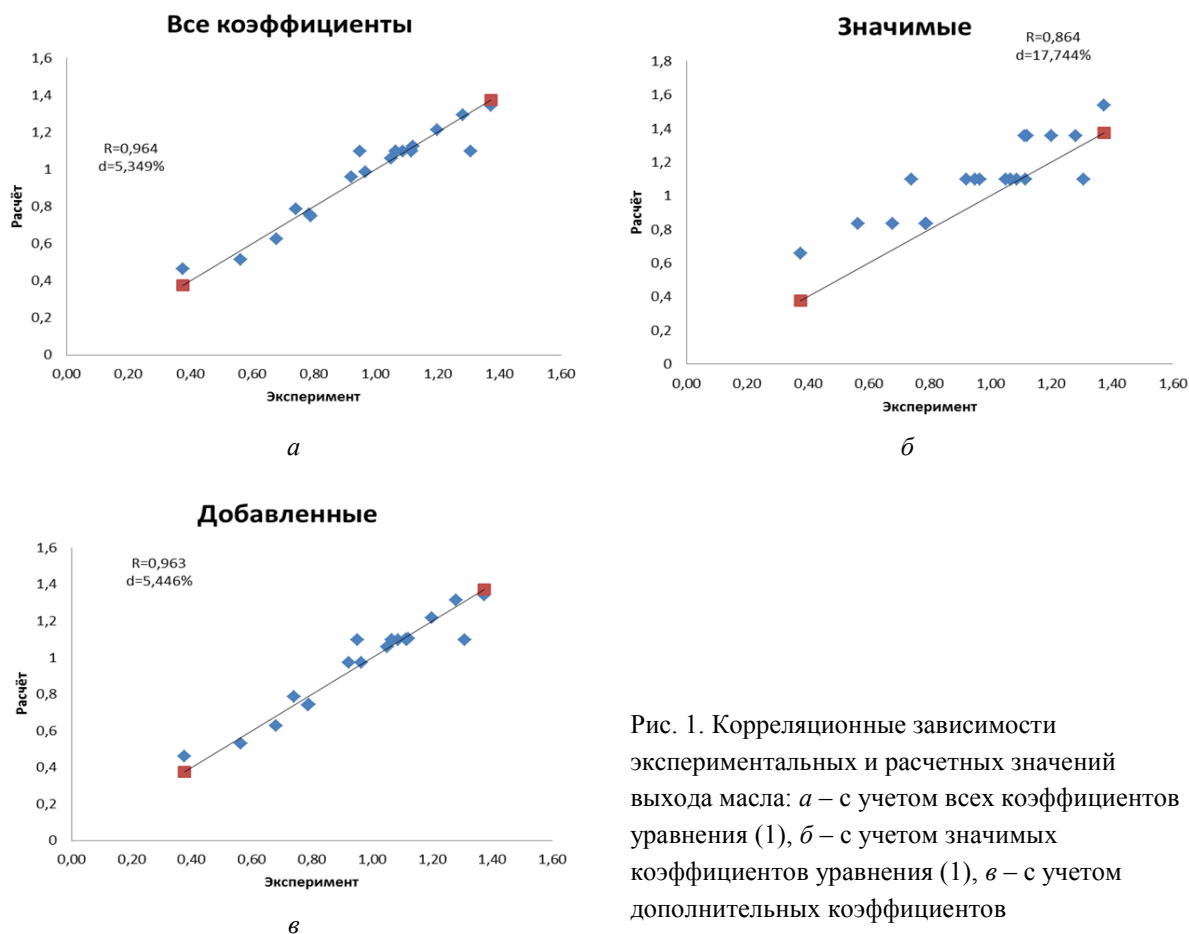


Рис. 1. Корреляционные зависимости экспериментальных и расчетных значений выхода масла: а – с учетом всех коэффициентов уравнения (1), б – с учетом значимых коэффициентов уравнения (1), в – с учетом дополнительных коэффициентов

Проверка уровня значимости входящих в уравнение коэффициентов показала значимость только нулевого коэффициента и коэффициента, отражающего влияние давления на процесс. При учете исключительно значимых коэффициентов коэффициент множественной корреляции экспериментальных и расчетных значений выхода уменьшается до 0.864 при увеличении относительной ошибки до 17.5%, данные представлены на рисунке 1б, что отрицательно сказывается на результатах последующей оптимизации.

Для увеличения точности оптимизации проведено последовательное включение дополнительных коэффициентов на основании невозрастания критерия Фишера. Уравнение регрессии с включенными дополнительными членами, использованное для последующей оптимизации процесса экстракции, имеет вид (2):

$$W = 1.10 + 0.26x + 0.08z + 0.02xy + 0.03yz - 0.07x^2 - 0.05y^2 - 0.06z^2. \quad (2)$$

Уравнение проверено на адекватность по критерию Фишера. Коэффициент множественной корреляции экспериментальных и расчетных значений выхода составил 0.963 при относительной ошибке 5.5%, данные представлены на рисунке 1в. Расчетное значение критерия Фишера снизилось до 0.238 против 0.307, рассчитанного для уравнения, включающего все члены.

При анализе полученного уравнения регрессии (2) определены оптимальные значения факторов процесса соответствующих максимально возможному выходу масла из жмыха плодов черемухи – $1.4 \pm 0.1\%$. Давление, температура и гидромодуль в оптимальном эксперименте составляют 350 атм, 70 °С и 33 соответственно. При проведении подтверждающего эксперимента получен образец масла с выходом 1.38%. Относительная ошибка модели составила 1.5%.

Физико-химические и органолептические показатели масла, полученного сверхкритической экстракцией и экстракцией по Сокслету, приведены в таблице 3.

Полученные масла характеризуются вязкой консистенцией, что может свидетельствовать о высокой доле предельных высших карбоновых кислот, входящих в состав триацилглицеридов. Отсутствие насыщенного запаха у образца, полученного экстракцией гексаном, закономерно ввиду того что экстракт был упарен под вакуумом при удалении растворителя. Слабовыраженный запах у масла, полученного сверхкритической флюидной экстракцией, объясняется одновременной его дезодорацией.

Полученное методом сверхкритической флюидной экстракции черемуховое масло характеризуется значительно более высоким кислотным числом, что указывает на более высокое содержание в нем свободных жирных кислот либо низкомолекулярных органических кислот. Масло, полученное методом СКФЭ, характеризуется также повышенным значением числа омыления, в сравнении с маслом, полученным экстракцией гексаном, что свидетельствует о его обогащении триацилглицеридами. Данный факт также объясняется более высокой растворимостью эфиров алифатических кислот в сверхкритическом диоксиде углерода по сравнению с растворимостью соответствующих кислот [22]. Стоит отметить, что для обоих образцов масел кислотное число составляет 53–55% от числа омыления.

Величины йодных чисел полученных масел различаются незначительно. Низкие их значения свидетельствуют о малой доле непредельных высших карбоновых кислот, входящих в состав триацилглицеридов, что хорошо согласуется с агрегатным состоянием полученных масел.

Изучение динамики процесса извлечения масла из жмыха ягод черемухи при оптимальных давлении и температуре показало, что увеличение гидромодуля (продолжительности при заданной скорости потока экстрагента) процесса выше 33 практически не приводит к увеличению выхода продукта (рис. 2).

Таблица 3. Органолептические и физико-химические показатели масла черемухи

Наименование показателя	Характеристика масла	
	Экстракция по Сокслету	Экстракция диоксидом углерода
Прозрачность	Непрозрачно	Непрозрачно
Консистенция	Твердая паста	Твердая паста
Цвет	Коричневый	Коричневый
Запах	Отсутствует	Слабовыраженный
Вкус	Приятный, не горький, с ярко выраженной кислинкой	Приятный, не горький, с ярко выраженной кислинкой
Кислотное число, мг NaOH/г	86.2	118.9
Число омыления, мг NaOH/г	161.5	217.3
Эфирное число, мг NaOH/г	75.3	98.4
Йодное число, мг I ₂ /100г	42.1	37.5

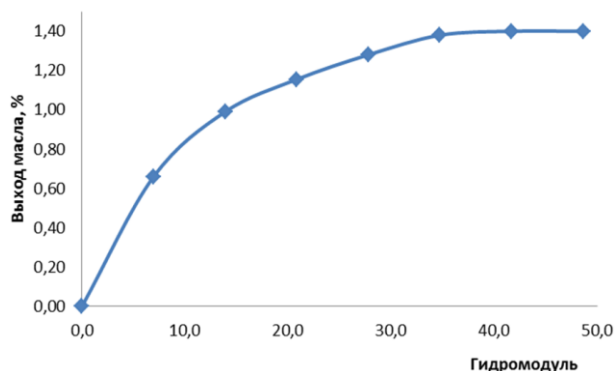


Рис. 2. Зависимость выхода масла от гидромодуля экстракции в оптимальных условиях процесса

Выводы

1. Показана возможность и установлены оптимальные параметры извлечения масла из жмыха ягод черемухи экстракцией сверхкритическим диоксидом углерода (350 атм, 70 °С и гидромодуль 33).
2. Максимальный выход масла в оптимальных условиях составляет $1,4 \pm 0,1\%$.
3. Полученное уравнение регрессии адекватно описывает процесс и позволяет прогнозировать выход продукта (масла) в зависимости от условий экстракции.

Экспериментальная часть работы выполнена на оборудовании ЦКП НО «Арктика» САФУ.

Список литературы

1. Бекетов Е.В., Пахомов В.П., Нестерова О.В. Совершенствование процесса извлечения флавоноидов из плодов черемухи обыкновенной // Химико-фармацевтический журнал. 2005. Т. 36. №6. С. 33–35.
2. Путьский И., Прохоров Н. Универсальная энциклопедия лекарственных растений. Мн.; М., 2000. 656 с.
3. Орлова С.Ю., Юшев А.А., Шеленга Т.В. Химический состав плодов черемухи в условиях Северо-Западного региона России // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2020. Т. 181. №2. С. 65–72. DOI: 10.30901/2227-8834-2020-2-65-72.
4. Маркевич Р.М., Бондаренко Ж.В. Химия жиров. Минск, 2011. 220 с.
5. Вострикова Н.Л., Кузнецова О.А., Куликовский А.В. Методические аспекты извлечения липидов из биологических матриц // Теория и практика переработки мяса. 2018. №3(2). С. 4–21.
6. Залепугин Д.Ю., Тилькунова Н.А., Чернышова И.В., Поляков В.С. Развитие технологий, основанных на сверхкритических флюидах // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2006. Т. 1. №1. С. 27–51.
7. Ивахнов А.Д., Скребец Т.Э., Богданов М.В., Боголицын К.Г. Получение рапсового масла экстракцией сверхкритическим диоксидом углерода // Химия растительного сырья. 2013. №3. С. 137–141. DOI: 10.14258/jcprm.1303137.
8. Ивахнов А.Д., Садкова К.С., Собашникова А.С., Скребец Т.Э., Богданов М.В. Получение масла из ягод морошки экстракцией сверхкритическим диоксидом углерода // Химия растительного сырья. 2019. №2. С. 91–97. DOI: 10.14258/jcprm.2019024555.
9. Ishak I., Hussain N., Coorey R., Ghani M.A. Optimization and characterization of chia seed (*Salvia hispanica* L.) oil extraction using supercritical carbon dioxide // Journal of CO₂ Utilization. 2021. Vol. 45. 101430. DOI: 10.1016/j.jcou.2020.101430.
10. Kassama L.S., Shi J., Mittal G.S. Optimization of supercritical fluid extraction of lycopene from tomato skin with central composite rotatable design model // Separation and Purification Technology. 2008. Vol. 60. Pp. 278–284.
11. Amyrgialaki E., Makris D.P., Mauromoustakos A., Kefalas P. Optimisation of the extraction of pomegranate (*Punica granatum*) husk phenolics using water/ethanol solvent systems and response surface methodology // Industrial Crops and Products. 2014. Vol. 59. Pp. 216–222.
12. Ивахнов А.Д., Садкова К.С., Собашникова А.С., Скребец Т.Э. Оптимизация процесса извлечения масла из отходов ягодного сырья ликероводочного производства на примере рябины обыкновенной // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2018. Т. 13. №3. С. 90–96. DOI: 10.34984/SCFTP.2018.13.3.010.
13. Derrien M., Aghabaramnejad M., Gosselin A., Desjardins Y., Angersac P., Boumghar Y. Optimization of supercritical carbon dioxide extraction of lutein and chlorophyll from spinach by-products using response surface methodology // LWT. 2018. Vol. 93. Pp. 79–87.
14. Белецкая М.Г., Богданович Н.И. Формирование адсорбционных свойств нанопористых материалов методом термохимической активации // Химия растительного сырья. 2013. №3. С. 77–82. DOI: 10.14258/jcprm.1303077.

15. Хвиюзова К.А., Богданович Н.И., Воропаева Н.Л., Карпачев В.В. Активные угли, полученные методом термохимической активации соломы рапса // *Химия растительного сырья*. 2020. №1. С. 337–346. DOI: 10.14258/jcrpm.2020014453.
16. Kokosa J.M., Przyiazny A., Jeanott M. *Solvent Microextraction: Theory and Practice*. New York, 2009. 344 p.
17. Джонсон Н., Лион Ф. *Статистика в планировании эксперимента в технике и науке*. М., 1980. 610 с.
18. Назаров Н.Г. *Практическое руководство по решению измерительных задач на основе оптимальных планов измерений*. М., 2007. 162 с.
19. Арутюнян Н.С., Корнева Е.П., Мартовщук Е.В. *Лабораторный практикум по химии жиров*. СПб., 2004. 264 с.
20. Назаров Н.Г. *Измерение: планирование и обработка результатов*. М.: Издательство стандартов, 2000. 304 с.
21. Богданович Н.И., Кузнецова Л.Н., Третьяков С.И., Жабин В.И. *Планирование эксперимента в примерах и расчетах*. Архангельск, 2010. 126 с.
22. Gupta R., Shim J-J. *Solubility in supercritical carbon dioxide*. NY, CRC Press, 2007. 960 p.

Поступила в редакцию 10 декабря 2021 г.

После переработки 18 января 2022 г.

Принята к публикации 25 января 2022 г.

Для цитирования: Скребец Т.Э., Ивахнов А.Д., Маматмуродов Х.Б. Оптимизация извлечения масла черемухи методом сверхкритической флюидной экстракции // *Химия растительного сырья*. 2022. №2. С. 279–285. DOI: 10.14258/jcrpm.20220210520.

*Skrebets T.E.**, *Ivakhnov A.D.*, *Mamatmurodov H.B.* OPTIMIZATION OF BIRD CHERRY OIL SUPERCRITICAL FLUID EXTRACTION PROCESS

Northern (Arctic) federal university named after M.V.Lomonosov, nab. Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002 (Russia), e-mail: tskrebets@mail.ru

Cherry cake berries, which is a waste of liquor production, contain biologically active substances, including lipids, which are not extracted by ethanol in the main production. Supercritical carbon dioxide is a good extractant for such compounds. By method of full factor experiment using rotatable uniform-plan of the second order, process of optimization of extraction of cherry oil from processed berries by method of supercritical fluid extraction with carbon dioxide was carried out. During planning, the pressure of 250 atm, temperature of 60 °C, hydraulic module 25 are selected as the main levels. To increase the accuracy of optimization, additional coefficients are sequentially included based on the Fisher test not increasing. Analysis of the regression equation made it possible to establish optimal process parameters: temperature 70 °C, pressure 350 atm, hydraulic module 33 at oil yield 1.4% (extraction degree 85%). The relative model error was 1%. Acid, iodine, ether numbers, saponification number, as well as organoleptic indices are determined for the obtained product. The obtained product is enriched with triacylglycerides, free fatty acids and low-molecular organic acids and contains a small amount of unsaturated higher carboxylic acids compared to oil isolated by extraction in a Soxhlet apparatus with hexane.

Keywords: bird cherry, oil, composition, supercritical fluid extraction, carbon dioxide, rotary plan, optimization.

* Corresponding author.

Referenses

1. Beketov Ye.V., Pakhomov V.P., Nesterova O.V. *Khimiko-farmatsevticheskiy zhurnal*, 2005, vol. 36, no. 6, pp. 33–35. (in Russ.).
2. Putyrskiy I., Prokhorov N. *Universal'naya entsiklopediya lekarstvennykh rasteniy*. [Universal encyclopedia of medicinal plants]. Minsk; Moscow, 2000, 656 p. (in Russ.).
3. Orlova S.Yu., Yushev A.A., Shelenga T.V. *Trudy po prikladnoy botanike, genetike i seleksii*, 2020, vol. 181, no. 2, pp. 65–72. DOI: 10.30901/2227-8834-2020-2-65-72. (in Russ.).
4. Markevich R.M., Bondarenko Zh.V. *Khimiya zhirov*. [Chemistry of fats]. Minsk, 2011, 220 p. (in Russ.).
5. Vostrikova N.L., Kuznetsova O.A., Kulikovskiy A.V. *Teoriya i praktika pererabotki myasa*, 2018, no. 3(2), pp. 4–21. (in Russ.).
6. Zalepugin D.Yu., Til'kunova N.A., Chernyshova I.V., Polyakov V.S. *Sverkhkriticheskiye Flyuidy: teoriya i praktika*, 2006, vol. 1, no. 1, pp. 27–51. (in Russ.).
7. Ivakhnov A.D., Skrebets T.E., Bogdanov M.V., Bogolitsyn K.G. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2013, no. 3, pp. 137–141. DOI: 10.14258/jcprm.1303137. (in Russ.).
8. Ivakhnov A.D., Sadkova K.S., Sobashnikova A.S., Skrebets T.E., Bogdanov M.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2019, no. 2, pp. 91–97. DOI: 10.14258/jcprm.2019024555. (in Russ.).
9. Ishak I., Hussain N., Coorey R., Ghani M.A. *Journal of CO₂ Utilization*, 2021, vol. 45, 101430. DOI: 10.1016/j.jcou.2020.101430.
10. Kassama L.S., Shi J., Mittal G.S. *Separation and Purification Technology*, 2008, vol. 60, pp. 278–284.
11. Amyrgialaki E., Makris D.P., Mauromoustakos A., Kefalas P. *Industrial Crops and Products*, 2014, vol. 59, pp. 216–222.
12. Ivakhnov A.D., Sadkova K.S., Sobashnikova A.S., Skrebets T.E. *Sverkhkriticheskiye flyuidy: teoriya i praktika*, 2018, vol. 13, no. 3, pp. 90–96. DOI: 10.34984/SCFTP.2018.13.3.010. (in Russ.).
13. Derrien M., Aghabararnejadd M., Gosselin A., Desjardins Y., Angersac P., Boumghar Y. *LWT*, 2018, vol. 93, pp. 79–87.
14. Beletskaya M.G., Bogdanovich N.I. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2013, no. 3, pp. 77–82. DOI: 10.14258/jcprm.1303077. (in Russ.).
15. Khviyuzova K.A., Bogdanovich N.I., Voropayeva N.L., Karpachev V.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2020, no. 1, pp. 337–346. DOI: 10.14258/jcprm.2020014453. (in Russ.).
16. Kokosa J.M., Przyiazny A., Jeanott M. *Solvent Microextraction: Theory and Practice*. New York, 2009, 344 p.
17. Dzhonson N., Lion F. *Statistika v planirovanii eksperimenta v tekhnike i nauke*. [Statistics in experimental design in engineering and science]. Moscow, 1980, 610 p. (in Russ.).
18. Nazarov N.G. *Prakticheskoye rukovodstvo po resheniyu izmeritel'nykh zadach na osnove optimal'nykh planov izmereniy*. [A practical guide to solving measurement problems based on optimal measurement plans]. Moscow, 2007, 162 p. (in Russ.).
19. Arutyunyan N.S., Korneva Ye.P., Martovshchuk Ye.V. *Laboratornyy praktikum po khimii zhirov*. [Laboratory workshop on the chemistry of fats]. St. Petersburg, 2004, 264 p. (in Russ.).
20. Nazarov N.G. *Izmereniye: planirovaniye i obrabotka rezul'tatov*. [Measurement: planning and processing results]. Moscow, 2000, 304 p. (in Russ.).
21. Bogdanovich N.I., Kuznetsova L.N., Tret'yakov S.I., Zhabin V.I. *Planirovaniye eksperimenta v primerakh i raschetakh*. [Experiment planning in examples and calculations]. Arkhangel'sk, 2010, 126 p. (in Russ.).
22. Gupta R., Shim J-J. *Solubility in supercritical carbon dioxide*. NY, CRC Press, 2007, 960 p.

Received December 10, 2021

Revised January 18, 2022

Accepted January 25, 2022

For citing: Skrebets T.E., Ivakhnov A.D., Mamatmurodov H.B. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2022, no. 2, pp. 279–285. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20220210520.

