

УДК 661.728.855

## МОДИФИКАЦИЯ ДРЕВЕСИНЫ ЖИРНЫМИ КИСЛОТАМИ, ПОЛУЧЕННЫМИ ИЗ СОАПСТОКА\*

© *А.В. Протопопов*

*Алтайский государственный технический университет имени  
И.И. Ползунова, пр. Ленина, 46, Барнаул, 656038 (Россия),  
e-mail: a\_protoporov@mail.ru*

В работе рассмотрено исследование получения жирных кислот из мыльных отходов. Предлагаемый метод химической переработки мыльных отходов применен впервые и в ранее опубликованной литературе по проблемам химической переработки отходов растительных масел не встречается. Изучен состав выделенных жирных кислот мыльного стока методом масс-спектрометрии и определены основные химические характеристики полученных жирных кислот. Выделенные жирные кислоты представляют ценность не только как кормовая добавка для домашнего скота, но и как сырье для химической промышленности, в частности для получения сложных эфиров целлюлозы. Полученные жирные кислоты были использованы при ацилировании древесины для получения сложных эфиров целлюлозы. В работе рассмотрены кинетические закономерности реакции ацилирования древесины жирными кислотами мыльного стока и изучены оптимальные условия синтеза сложных эфиров целлюлозы из древесины в зависимости от температуры и времени синтеза. Полученные продукты исследованы методом ИК-спектроскопии, который доказал образование сложноэфирной связи в полученных продуктах. При изучении кинетических закономерностей реакции ацилирования древесины жирными кислотами рассчитаны энергетические параметры в соответствии с кинетикой гетерогенных процессов, к которым относится реакция ацилирования древесины.

*Ключевые слова:* сложные эфиры целлюлозы, мыльный сток, отходы маслоэкстракционного производства, переработка отходов растительных масел, сложные эфиры жирных кислот, переработка растительных масел.

### *Введение*

В современном мире производство нуждается в вовлечении в хозяйственный оборот больших объемов сырья и энергии. Поэтому необходимо внедрение технологических процессов, которые дают минимальные выбросы и при которых способность природы к самоочищению будет достаточна к препятствию возникновения необратимых экологических изменений [1].

Отходы производства – это остатки материалов, сырья и полупродуктов, которые образуются при получении продукции, утратившие частично или полностью свои качества и не соответствующие стандартам [2]. Идея безотходной технологии состоит в том, что неиспользуемые отходы являются не полностью использованным природным ресурсом и источником загрязнения окружающей среды. Уменьшение выхода неиспользуемых отходов в расчете на товарный продукт технологии позволит производить больше продукции из такого же количества сырья и является действенной мерой по охране окружающей среды [3, 4].

Одним из крупнотоннажных отходов производства растительных масел является мыльный сток [5]. Он образуется на стадии щелочной рафинации и ценен тем, что в составе содержит до 40% различных жирных компонентов – глицеридов, мыл, высокомолекулярных карбоновых кислот, фосфолипидов [6]. Подкисление этого сырья дает продукт, который содержит свободные жирные кислоты, ацилглицериды и другие компоненты [7].

Цель данной работы заключается в выделении жирных кислот из отхода растительного масла и получение сложного эфира целлюлозы из полученных кислот. Синтез сложного эфира целлюлозы из древесины позволит переработать отходы деревопереработки и производить ценные продукты. Эта технология

---

*Протопопов Андрей Валентинович* – доцент кафедры химической технологии, e-mail: a\_protoporov@mail.ru

потребуется меньших затрат на производство и позволит уменьшить загрязнение окружающей среды.

\*Данная статья имеет электронный дополнительный материал (приложение), который доступен читателям на сайте журнала. DOI: 10.14258/jcprm.2022029571s

Состав соапстока зависит от содержащихся в нем примесей, природы рафинируемого жира, методов нейтрализации и концентрации раствора щелочи [8]. Основными компонентами соапстока являются жиры и жирные кислоты. В частности, образующиеся в результате омыления жиров свободные жирные кислоты и их натриевые соли, нейтральный жир, фосфолипиды, воскоподобные и неомыляемые вещества, красящие вещества (хлорофилл, каротин, каротиноиды и др.) [9]. В зависимости от жирнокислотного состава сырья, а также применяемой в технологической схеме рафинирования сырья концентрации раствора щелочи изменяются состав и свойства соапстока, его вязкость и структура [10]. Например, подсолнечный соапсток характеризуется показателями, определенными в массовые доли, %: общий жир – 46, в том числе нейтральный жир – 31 и натриевые соли жирных кислот – 15; влага – 42; мыла – 7; фосфолипиды – 2; неомыляемые и воскоподобные вещества – 3 [11]. Перечисленные характеристики отходов маслоэкстракционного производства позволяют сделать вывод о высокой значимости данных отходов в качестве сырья для получения как кормовых добавок на основе жирных кислот растительного происхождения, так и сырьевой базы для химической промышленности.

Новое направление в «зеленой химии» – разработка малостадийных технологических процессов с использованием возобновляемого растительного сырья, являющегося многотоннажным отходом сельского хозяйства [12]. Актуальность в том, что необходимы новые методы модификации растительного сырья, для того чтобы получать композиты и полимерные материалы, которые будут востребованы при производстве современных материалов [13–15]. Переработка отходов маслоэкстракционного производства – соапстоков и вовлечение полученных продуктов, жирных кислот в процесс синтеза сложных эфиров целлюлозы из отходов переработки древесины входят в данное направление и направлены на вторичную переработку отходов [16–17].

### *Экспериментальная часть*

Для получения жирных кислот соапсток подсолнечного масла в количестве 100 г добавляли в круглодонную колбу на 250 мл и приливали 10%-ный раствор соляной кислоты до  $\text{pH} < 7$ . Для выделения жирных кислот подкисленный соапсток перемешивали при температурах 80 °С, 90 °С в течение 30–90 мин.

После перемешивания с помощью делительной воронки был отделен водный нижний слой от жирных кислот. Полученные жирные кислоты были проанализированы на кислотное число и йодное число по ГОСТовским методикам (ГОСТ 31933). С помощью метода хроматомасс-спектрологии проанализирован качественный состав жирных кислот, выделенных из соапстока. Исследование проводилось на газовом хроматографе МАЭСТРО ГХ 7820 с масс-селективным детектором модели Agilent Technologies 5975 при следующих условиях: колонка кварцевая капиллярная со стационарной фазой HP-5MS (30 м × 0.25 мм, толщина пленки фазы – 0.25 мкм); температура инжектора – 250 °С, интерфейса детектора – 200 °С; начальная и конечная температура термостата колонки – 60 и 250 °С соответственно; температура термостата колонки изменялась со скоростью 15 °С/мин до 130 °С и 30 °С/мин до 250 °С; газ-носитель – гелий; объем вводимой пробы – 1 мкл; деление потока – 1 : 40; ионизация электронным ударом (энергия 70 эВ), запись спектра – по полному ионному току.

Для проведения анализа ИК-спектроскопии использовали метод раздавленной капли для образцов выделенных жирных кислот и метод твердофазного суспензирования в бромиде калия для полученных сложных эфиров целлюлозы. Исследование выполнялось на спектрофотометре ИКС-40 в интервале волновых чисел 4000–400  $\text{см}^{-1}$ .

Ацилирование древесины осины проводилось в химическом реакторе, представляющем собой круглодонную колбу, снабженную механической мешалкой, форштосом и обратным холодильником. В колбу помещали подготовленную древесную муку осины и заливали предварительно приготовленными жирными кислотами, выделенными из соапстока, в мольном соотношении 1 : 3, позже добавляя тионилхлорид в мольном соотношении 1 : 1 по отношению к жирным кислотам. Ацилирование древесины осины проводили в пределах 1–5 ч при температурах 35–65 °С. Чтобы избавиться от непрореагировавших кислот, продукты промывали на фильтре Шотта и сушили до постоянной массы на воздухе. Определение количества связанных жирных кислот в сложном эфире целлюлозы происходило методом потенциометрического титрования. В коническую колбу емкостью 100 мл помещали  $0.35 \pm 0.01$  г (с точностью до 0.0002 г) навеску исследуемого вещества и смачивали 10 мл этанола. Колбу закрывали пробкой и для лучшего набухания образца ставили на 15 мин в термостат, имеющий температуру 56–60 °С. По истечении этого времени в колбу добавляли 10

мл раствора KOH (0.5 моль·л<sup>-1</sup>) и оставляли до полного омыления на 1 сутки при температуре 55–60 °С. Затем содержимое колбы потенциометрически титровали раствором HCl (0.5 моль·л<sup>-1</sup>); электрод сравнения – хлорсеребряный, индикаторный электрод – стеклянный.

Содержание связанной оксикислоты вычисляется по формуле

$$C, \% = \frac{(N_{\text{ш}} \cdot V_{\text{ш}} - N_{\text{к}} \cdot V_{\text{к}})}{1000 \cdot q} \cdot \mathcal{E} \cdot 100\%,$$

где С – содержание связанной кислоты, %; N<sub>ш</sub> – нормальность раствора NaOH; V<sub>ш</sub> – объем раствора NaOH; V<sub>к</sub> – объем соляной кислоты, пошедшей на титрование; N<sub>к</sub> – нормальность соляной кислоты; Э – эквивалентная масса кислоты; q – масса навески.

### Обсуждение результатов

Выделение жирных кислот производилось при 80 °С и 90 °С при различной продолжительности синтеза. Первоначально были проведены опыты при 90 °С, впоследствии проведено сравнение при 80 °С, однако в отличие от предыдущей серии опытов продолжительность выбрана 90 и 120 мин как наиболее оптимальная по выходу жирных кислот. Полученную коричневую смесь снимали с установки и переливали в делительную воронку, где происходило расслоение на два слоя: содержащий жирные кислоты и водный слой. Последний удалялся, а полученные жирные кислоты взвешивались и анализировались. Результаты извлечения жирных кислот представлены в таблице 1.

Полученные образцы с жирными кислотами были проанализированы на кислотное и йодное число. Как следует из полученных данных, наибольшее содержание жирных кислот в продуктах ацидолиза соапстока наблюдается при 90 °С и продолжительности обработки 120 мин. Выделенные жирные кислоты были исследованы на качественный состав с помощью метода хромато-масс-спектрологии. В ходе исследования была снята хроматограмма, которая обрабатывалась с помощью программного обеспечения ChemStation и NIST MS Search. При проведении хроматографии выделенных жирных кислот соапстока подсолнечного масла были получены данные о составе (табл. 2).

Анализ состава показал, что полученный продукт состоит из жирных кислот: пальмитиновой, олеиновой и линолевой. Триглицериды и сложные эфиры практически отсутствуют.

С помощью ИК-спектроскопии был проведен анализ выделенных жирных кислот (рис. 1). Анализ ИК-спектров показал наличие полос поглощения в области 3600 см<sup>-1</sup>, ответственных за поглощение гидроксильных групп. Полосы поглощения в области 3100 см<sup>-1</sup>, ответственные за колебания СН при непредельных связях, свидетельствуют о проходящем окислении. Наличие полос поглощения в области 2500–2600 и 1700 см<sup>-1</sup> свидетельствует об образовании жирных карбоновых кислот. Отсутствие полосы поглощения в области 1740 см<sup>-1</sup> говорит о практически полном разложении сложноэфирных связей триглицеридов жирных кислот.

Идея создания биоразлагаемых материалов находится в центре внимания ученых всего мира уже более 30 лет, однако наиболее интенсивные исследования в этой области начали проводиться в последнее десятилетие. Это связано с огромным производством полимерных материалов во всем мире, и при их использовании образуются миллионы тонн отходов, которые начинают оказывать отрицательное влияние на окружающую среду [18]. Под биоразлагаемостью полимеров мы понимаем способность материала разрушаться в естественных условиях на составные, безвредные для окружающей среды вещества под действием микроорганизмов, УФ-облучения, света, солнечной радиации и других природных факторов. Несмотря на то, что многие производные целлюлозы освоены и выпускаются в промышленном масштабе, исследования по оптимизации технологии их получения проводятся постоянно [19–20].

В ходе проведенной работы нами было проведено ацилирование древесины осины жирными кислотами, выделенными из соапстока, с применением тионилхлорида. Полученные продукты промывали от непрореагировавших жирных кислот и высушивали до воздушно-сухого состояния. Впоследствии методом потенциометрического титрования определяли количество связанных жирных кислот в расчете на сложный эфир целлюлозы в полученном продукте и рассчитывали степень замещения (табл. 3).

Таблица 1. Образцы жирных кислот

Образец	Время перемешивания, мин	Температура, °С	Выход жирных кислот, %	Кислотное число	Йодное число
1	90	80	72.21	237	28
2	120	80	77.82	254	48
3	30	90	55.14	250	28
4	60	90	62.06	466	49
5	90	90	81.80	485	53
6	120	90	93.71	730	57

Таблица 2. Качественный и количественный состав выделенных жирных кислот из мыльного подсолнечного масла

Наименование жирной кислоты	Формула	Содержание кислоты, %
Пальмитиновая (гексадекановая)	$C_{16}H_{32}O_2$	5
Олеиновая (9-октадеценовая)	$C_{18}H_{34}O_2$	3
Линолевая (9,12-октадекадиеновая)	$C_{18}H_{32}O_2$	90

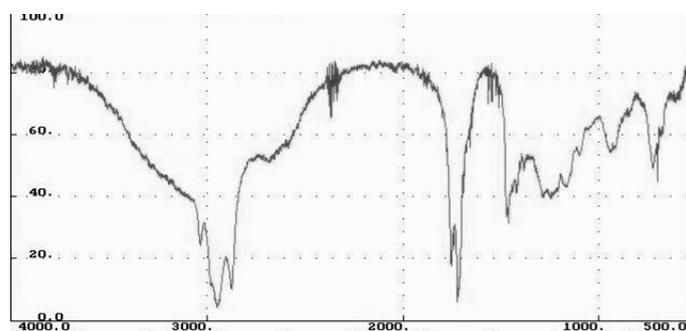


Рис. 1. ИК-спектр выделенных жирных кислот

Таблица 3. Степень замещения в расчете на сложный эфир целлюлозы в полученном продукте

Продолжительность синтеза, ч	Температура синтеза, °С			
	35	45	55	65
1	0.44	0.47	0.42	0.42
2	0.68	0.79	0.83	0.98
3	0.97	1.16	1.28	1.34
5	1.52	1.70	1.79	1.88

Как следует из таблицы 3, максимальная степень замещения наблюдается при продолжительности синтеза 5 ч и температуре 65 °С и составляет примерно 2.

Обработку кинетических данных реакции ацилирования древесины осины проводили по уравнению Ерофеева-Колмогорова в соответствии с кинетикой гетерогенных процессов.

Термодинамические параметры реакции ацилирования вычисляли на основании уравнения Эйринга при построении графика в координатах  $\ln(Kh/Tk_b)$  от  $1/T$ . А также рассчитывали энергию активации процесса ацилирования в соответствии с уравнением Аррениуса.

Кинетика процесса растворившейся древесины позволяет получить эффективные кинетические параметры. Анализ кинетических параметров процесса ацилирования жирных кислот мыльного позволяет определить вероятность образования сложного эфира целлюлозы.

Значение энергетических параметров для реакции ацилирования: энтальпия активации – 18.9 кДж/моль, энтропия активации – 21.6 Дж/(моль·К), энергия активации – -269.4 кДж/моль. По данным можно наблюдать, что значение энтальпии активации указывает на быстрое достижение переходного комплекса, а низкое значение энтальпии активации обуславливает наиболее быстрое прохождение реакции, поэтому требуется не так много времени.

Анализ сложного эфира, который был получен из жирных кислот мыльного и древесины в присутствии тионилхлорида, был проведен при помощи ИК-спектроскопии (рис. 2).

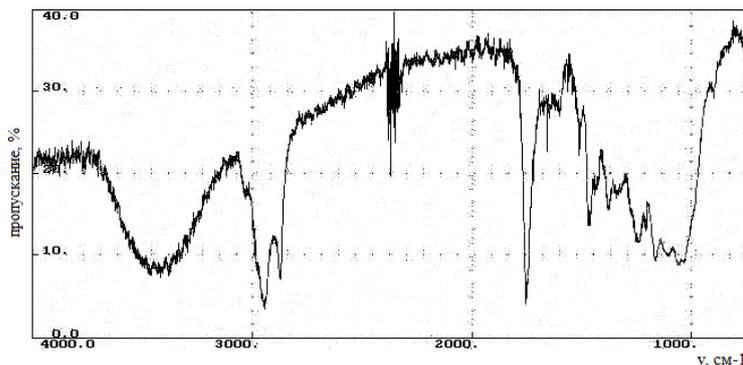


Рис. 2. ИК-спектр продуктов ацилирования при температуре 65 °С и продолжительности синтеза 5 ч

Анализируя ИК-спектры продуктов ацилирования древесины жирными кислотами, можно отметить появление полосы поглощения в области 1740 см<sup>-1</sup>, ответственной за колебание сложноэфирной связи и увеличение ее интенсивности с ростом продолжительности синтеза.

### Выводы

Предложен метод выделения жирных кислот из мыльных отходов с применением соляной кислоты. Подобраны оптимальные условия для наибольшего выхода жирных кислот. Анализ полученных ЖК на кислотное и йодное число показал высокое содержание кислот и незначительное содержание непредельных групп. Наибольшие показатели кислотного числа при выделении ЖК при 90 °С и 90 мин при отсутствии окисления и разложения полученных кислот, что свидетельствует о высоком содержании кислот и наиболее продуктивных условиях выделения продукта. Синтез сложных эфиров целлюлозы из жирных кислот в присутствии тионилхлорида показал возможность использования выделенных жирных кислот для дальнейшей химической переработки. Исследования полученного продукта выявили, что наиболее оптимальные условия для получения сложного эфира целлюлозы с наибольшим выходом и степенью замещения достигаются при температуре равной 65 °С в течение 5 ч. Методом ИК-спектроскопии было доказано образование сложного эфира, это подтверждается появлением полосы поглощения в области 1740 см<sup>-1</sup>, ответственной за колебание сложноэфирной связи. Рассчитана кинетика сложного эфира целлюлозы, а также рассчитаны термодинамические показатели переходного комплекса: энтальпия активации  $\Delta H=18.9$  кДж/моль, энтропия активации  $\Delta S=-269.4$  Дж/моль·К и энергия активации реакции  $E_A=21.6$  кДж/моль.

### Список литературы

1. Friedman M., Wolf R. Chemistry of soaps and detergents: Various types of commercial products and their ingredients // Clinics in Dermatology. 1996. Vol. 14. N1. Pp. 7–13. DOI: 10.1016/0738-081X(95)00102-L.
2. Шнып И.А., Слепнева Л.М., Краецкая О.Ф. Способы утилизации мыльного стока – техногенного отхода жироперерабатывающей промышленности // Вестник БНТУ. 2011. №2. С. 68–71.
3. Подденежный Е.Н., Бойко А.А., Алексеенко А.А., Дробышевская Н.Е., Урецкая О.В. Прогресс в получении биоразлагаемых композиционных материалов на основе крахмала (обзор) // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2015. №2 (61). С. 31–41.
4. Poyarkova T.N., Prokof'ev Yu.I., Kudrina G.V., Tarasova A.V., Sotnikova E.V. Influence of temperature, pH, and time of base hydrolysis on variation of the fatty acid composition of soapstock // JAOCS. 2012. Vol. 85. Pp. 1399–1403.
5. Has N.J., Seckott L.M. Combined Nonenzymatic-Enzymatic Method for the Synthesis of Simple Alkyl Fatty Acid Esters from Soapstock // J. Am. Oil Chem. 1996. Vol. 73. Pp. 1393–1401.
6. Watson K.S., Meierhoff C.H. Alternatives for processing of soapstock // American Oil Chemists' Society. 1983. Vol. 2. Pp. 310–313.
7. Asilbekova D.T., Gusakova S.D., Nazarova I.P., Mukhamedova Kh.S., Tyshchenko A.A., Glushenkova A.I. Composition of cottonseed soapstock fats // Chemistry of Natural Compounds. 1988. Vol. 24. Pp. 424–429.
8. Mag T.K., Green D.H., Kwong A.T. Continuous acidulation of soapstock and recovery of acid oil // Journal of the American Oil Chemists' Society. 1983. Vol. 5. Pp. 1008–1011.
9. Parck Y., Kim D.-K., Wang Z.-M., Lee J.-P., Parck S.-C., Lee J.-S. Production of biodiesel from soapstock using an ion-exchange resin catalyst // Korean Journal of Chemical Engineering. 2008. Vol. 24. Pp. 1351–1355.

10. Mustafa I., Tart Jon L., Van Gerpen. The specific gravity of biodiesel and its blends with diesel fuel // JAOCS. 2001. Vol. 78. Pp. 115–118.
11. Schlik L.L., Hana A.A., Schistock J.L. Sobeian and Sunflower Oil Performances in a Diesel Engine, Trans // ASAE. 1987. Vol. 33. Pp. 1346–1348.
12. Протопопов А.В., Шумилова Е.Ю., Нещадимова Е.А., Лазукина К.Г. Способ переработки соапстоков // Приднепровский научный вестник «Наука и образование». 2019. Т. 2. №1. С. 46–50.
13. Протопопов А.В., Шумилова Е.Ю., Нещадимова Е.А., Лазукина К.Г. Исследование возможности переработки соапстоков подсолнечного масла // Химия и технология растительных веществ: тезисы докладов XI Всероссийской научной конференции с международным участием и школой молодых ученых. Сыктывкар, 2019. С. 185.
14. Протопопов А.В., Ворошилова А.В., Бобровская С.А. Химическая модификация подсолнечного масла // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. №12 (66). С. 152–155.
15. Бобровская С.А., Шлеина А.Н., Курис Ю.Е., Шумилова Е.Ю., Протопопов А.В. Окисление триглицеридов жирных кислот // Проблемы научной мысли. 2018. Т. 3. №5. С. 59–62.
16. Протопопов А.В., Голод А.В., Бовина А.Е., Вагина Д.С. Исследование очистки соапстоков // Проблемы научной мысли. 2018. Т. 3. №5. С. 63–66.
17. Протопопов А.В., Бобровская С.А., Шумилова Е.Ю. Полимеризация масляничных отходов // Materiały XIV Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji, «Wykształcenie i nauka bez granic – 2018». Przemysł, 2018. Vol. 3. Pp. 25–29.
18. Протопопов А.В., Курис Ю.Е., Голод А.В., Бовина А.Е. Химическая переработка растительных масел и их отходов маслоэкстракционных производств // Биотехнология и общество в XXI веке. Барнаул, 2018. С. 241–247.
19. Курис Ю.Е., Шлеина А.Н., Вагина Д.С., Протопопов А.В. Получение новых продуктов из отходов растительного происхождения // Биотехнология и общество в XXI веке. Барнаул, 2018. С. 247–254.
20. Протопопов А.В., Бобровская С.А., Шумилова Е.Ю. Полимеризация подсолнечного масла, выделенного из отходов маслоэкстракционного производства // Биотехнология и общество в XXI веке. Барнаул, 2018. С. 161–169.

*Поступила в редакцию 16 мая 2021 г.*

*После переработки 9 февраля 2022 г.*

*Принята к публикации 10 февраля 2022 г.*

**Для цитирования:** Протопопов А.В. Модификация древесины жирными кислотами, полученными из соапстока // Химия растительного сырья. 2022. №2. С. 315–321. DOI: 10.14258/jcrpm.2022029571.

Protopopov A.V. MODIFICATION OF WOOD WITH FATTY ACIDS OBTAINED FROM SOAP STOCK

Altai State Technical University named after I.I. Polzunova, pr. Lenina, 46, Barnaul, 656038 (Russia),

e-mail: a\_protopopov@mail.ru

The paper considers the study of obtaining fatty acids from soap stocks. The proposed method of chemical processing of soap stock was applied for the first time and is not found in the previously published literature on the problems of chemical processing of vegetable oil waste. The composition of the isolated fatty acids of soap stock was studied by mass spectroscopy and the main chemical characteristics of the obtained fatty acids were determined. The isolated fatty acids are valuable not only as a feed additive for livestock, but also as a raw material for the chemical industry, in particular for the production of cellulose esters. The resulting fatty acids were used in the acylation of wood to obtain cellulose esters. The paper considers the kinetic regularities of the reaction of wood acylation with fatty acids of soap stock and studies the optimal conditions for the synthesis of cellulose esters from wood depending on the temperature and time of synthesis. The resulting products were investigated by IR spectroscopy, which proved the formation of an ester bond in the products obtained. When studying the kinetic regularities of the acylation of wood with fatty acids, the energy parameters were calculated in accordance with the kinetics of heterogeneous processes, which include the acylation of wood.

**Keywords:** cellulose esters, soap stock, oil extraction waste, vegetable oil waste processing, fatty acid esters, vegetable oil processing.

### Referenses

1. Friedman M., Wolf R. *Clinics in Dermatology*, 1996, vol. 14, no. 1, pp. 7–13. DOI: 10.1016/0738-081X(95)00102-L.
2. Shnyp I.A., Slepneva L.M., Krayetskaya O.F. *Vestnik BNTU*, 2011, no. 2, pp. 68–71. (in Russ.).
3. Poddenezhnyy Ye.N., Boyko A.A., Alekseyenko A.A., Drobyshevskaya N.Ye., Uretskaya O.V. *Vestnik GGTU im. P.O. Sukhogo*, 2015, no. 2 (61), pp. 31–41. (in Russ.).
4. Poyarkova T.N., Prokof'ev Yu.I., Kudrina G.V., Tarasova A.V., Sotnikova E.V. *JAOCS*, 2012, vol. 85, pp. 1399–1403.
5. Has N.J., Sckott L.M. *J. Am. Oil Chem.*, 1996, vol. 73, pp. 1393–1401.
6. Watson K.S., Meierhoff C.H. *American Oil Chemists' Society*, 1983, vol. 2, pp. 310–313.
7. Asilbekova D.T., Gusakova S.D., Nazarova I.P., Mukhamedova Kh.S., Tyshchenko A.A., Glushenkova A.I. *Chemistry of Natural Compounds*, 1988, vol. 24, pp. 424–429.
8. Mag T.K., Green D.H., Kwong A.T. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1983, vol. 5, pp. 1008–1011.
9. Parck Y., Kim D.-K., Wang Z.-M., Lee J.-P., Parck S.-C., Lee J.-S. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2008, vol. 24, pp. 1351–1355.
10. Mustafa I., Tart Jon L., Van Gerpen. *JAOCS*, 2001, vol. 78, pp. 115–118.
11. Schlik L.L., Hana A.A., Schistock J.L. *ASAE*, 1987, vol. 33, pp. 1346–1348.
12. Protopopov A.V., Shumilova Ye.Yu., Neshchadimova Ye.A., Lazukina K.G. *Pridneprovskiy nauchnyy vestnik «Nauka i obrazovaniye»*, 2019, vol. 2, no. 1, pp. 46–50. (in Russ.).
13. Protopopov A.V., Shumilova Ye.Yu., Neshchadimova Ye.A., Lazukina K.G. *Khimiya i tekhnologiya rastitel'nykh veshchestv: Tezisy dokladov XI Vseros-siyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem i shkoly molodykh uchenykh*. [Chemistry and technology of plant substances: Abstracts of the XI All-Russian scientific conference with international participation and a school of young scientists]. Syktyvkar, 2019, p. 185. (in Russ.).
14. Protopopov A.V., Voroshilova A.V., Bobrovskaya S.A. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2017, no. 12 (66), pp. 152–155. (in Russ.).
15. Bobrovskaya S.A., Shleina A.N., Kuris Yu.Ye., Shumilova Ye.Yu., Protopopov A.V. *Problemy nauchnoy mysli*, 2018, vol. 3, no. 5, pp. 59–62. (in Russ.).
16. Protopopov A.V., Golod A.V., Bovina A.Ye., Vagina D.S. *Problemy nauchnoy mysli*, 2018, vol. 3, no. 5, pp. 63–66. (in Russ.).
17. Protopopov A.V., Bobrovskaya S.A., Shumilova Ye.Yu. *Materialy XIV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Obrazovaniye i nauka bez granits – 2018»*. [Materials of the XIV International Scientific-Practical Conference, "Education and Science Without Borders - 2018"]. Przemysl, 2018, vol. 3, pp. 25–29 (in Russ.).
18. Protopopov A.V., Kuris Yu.Ye., Golod A.V., Bovina A.Ye. *Biotekhnologiya i obshchestvo v XXI veke*. [Biotechnology and society in the XXI century]. Barnaul, 2018, pp. 241–247. (in Russ.).
19. Kuris Yu.Ye., Shleina A.N., Vagina D.S., Protopopov A.V. *Biotekhnologiya i obshchestvo v XXI veke*. [Biotechnology and society in the XXI century]. Barnaul, 2018, pp. 247–254. (in Russ.).
20. Protopopov A.V., Bobrovskaya S.A., Shumilova Ye.Yu. *Biotekhnologiya i obshchestvo v XXI veke*. [Biotechnology and society in the XXI century]. Barnaul, 2018, pp. 161–169. (in Russ.).

Received May 16, 2021

Revised February 9, 2022

Accepted February 10, 2022

**For citing:** Protopopov A.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2022, no. 2, pp. 315–321. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprn.2022029571.

