

УДК 665.347.8:620.181.4

Ж. В. Кадолич, С. В. Зотов

ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРЕТНО-ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПОЛИСАХАРИДОВ И ПИЩЕВЫХ ЖИРОВ

Ключевые слова: электретно-термический анализ, термостимулированные токи, полисахариды, растительные масла.

В работе продемонстрирована возможность оценить физико-химические изменения в диэлектрических образцах по электрофизическому отклику на них. Метод электретно-термического анализа позволяет изучать поляризационные эффекты, которые свойственны любой сложноорганизованной физико-химической системе, содержащей электрически заряженные функциональные группы или молекулярные фрагменты. Представлены экспериментальные результаты, свидетельствующие об информативности метода электретно-термического анализа в отношении полисахаридов и натуральных пищевых жиров. В частности, получен и охарактеризован специфический токовый отклик (спектр термостимулированных токов) на нагрев образцов хитозана и жидких растительных масел. Показано, что в исследуемых объектах наблюдается явление, схожее с электретным эффектом в диэлектриках. Электретное состояние хитозана обусловлено координационной природой его надмолекулярной структуры и возможностью реализации нескольких конформационных вариаций макромолекул, причем каждая из этих вариаций характеризуется особым взаимным расположением связанных диполей. Именно с этими вариациями могут быть соотнесены токовые экстремумы, зафиксированные в конкретных температурных диапазонах. Интерпретация процессов, происходящих при нагреве растительных масел, может быть основана на выдвинутой гипотезе о том, что за счет межмолекулярных взаимодействий молекулы триглицеридов жирных кислот связаны между собой координационными связями, формируя своеобразные надмолекулярные образования – ассоциаты, объединяющие несколько молекул таких триглицеридов. Нагрев образца масла стимулирует разрушение этой сложно-организованной системы, которое сопровождается нарушением электрической нейтральности и формированием ионизированных фрагментов молекул. Именно эти фрагменты являются объектами, ответственными за токовый отклик, также регистрируемый в определенном температурном диапазоне. Токовые отклики на вышеуказанные процессы не распределены равномерно по всему спектру, а являются согласованными, формируя четко обрисованные экстремальные области. Это дает основание сделать вывод о последовательном характере распада различающихся по термической стабильности ассоциатов, объединяющих триглицериды насыщенных, мононенасыщенных и полиненасыщенных жирных кислот. Различия в токовых спектрах масел обусловлены их специфическим жирнокислотным составом. Очевидно, индивидуальный спектр полисахаридов и пищевых жиров является характеристическим параметром и позволяет судить о химическом составе этих объектов исследования, который может служить индикатором качества.

Zh. V. Kadolich, S. V. Zotov

CAPABILITIES OF ELECTRET-THERMAL ANALYSIS IN POLYSACCHARIDES AND DIETARY FATS STUDY

Keywords: electret-thermal analysis, thermally stimulated currents, polysaccharides, vegetable oils.

The paper demonstrates the possibility to estimate physicochemical changes in dielectric samples by electrophysical responses to them. The method of electret-thermal analysis allows studying the polarization effects that are characteristic of any complex physicochemical system containing electrically charged functional groups or molecular fragments. The paper presents experimental results indicating the informativity of electret-thermal analysis with respect to polysaccharides and natural dietary fats. In particular, we have obtained and characterized a specific current response (spectra of thermally stimulated currents) to heating chitosan and liquid vegetable oils samples. It is shown that in the studied objects there is a phenomenon similar to the electret effect in dielectrics. The electret state of chitosan is determined by the coordinating nature of its supramolecular structure and the possibility of implementing several conformational variations of macromolecules, each of which characterized by a special mutual arrangement of bound dipoles. It is these variations that current extrema recorded in specific temperature ranges can be correlated with. Interpretation of the processes occurring during heating of vegetable oils can be based on the hypothesis that due to intermolecular interactions the molecules of fatty acids triglycerides are interconnected by coordination bonds, forming a kind of supramolecular formations, i.e. associates, that unite several triglyceride molecules. Heating the oil sample stimulates destruction of this complex system, which is accompanied by a violation of electrical neutrality and formation of ionized molecular fragments. It is these fragments that account for the current response also recorded in a certain temperature range. Current responses to the above processes are not distributed uniformly across the spectrum, but are consistent, forming clearly outlined extreme regions. This gives grounds to make a conclusion about the consistency of the collapse of associates differing in thermal stability, which unite triglycerides of saturated, monounsaturated, and polyunsaturated fatty acids. Differences in the current spectra of oils are due to their specific fatty acid composition. Obviously, the individual spectrum of polysaccharides and dietary fats is a characteristic parameter and allows interpreting the chemical composition of that studied objects, which can serve as a quality indicator.

Введение

Электрофизическое состояние вещества является функцией его состава. Для диэлектрических материа-

лов исследование электропроводности, диэлектрической проницаемости и других параметров может дополнить более длительный и трудоемкий анализ их

химической структуры. Кроме того, физико-химические изменения, по тем или иным причинам происходящие в диэлектриках, целесообразнее зафиксировать именно по электрофизическому отклику на них. В частности, метод электретно-термического анализа (ЭТА), основанный на термическом стимулировании высвобождения связанного веществом электрического заряда [1], применяется для исследования электретного эффекта, который состоит в «запоминании» электрического заряда и электрической поляризации. Этот эффект свойственен любой сложноорганизованной физико-химической системе, содержащей электрически заряженные функциональные группы или молекулярные фрагменты. Электретное поведение демонстрируют многие объекты биологического происхождения – «биоэлектреты» (белки, ферменты, гемоглобин, костная ткань и др.), причем в ряде случаев особую роль играет характер структурирования координационной воды [2]. В работе [3] ЭТА представлен в качестве высокоинформативного метода исследования любых конденсированных сред, структура или технологическая предыстория которых предполагает образование и/или перераспределение носителей зарядов.

Это справедливо по отношению к диэлектрическим по своей природе объектам, являющимися органическими компонентами пищевых продуктов. Физико-химическая структура таких веществ, как белки, жиры и полисахариды, предполагает существование разветвленных внутри- и межмолекулярных связей, прочность которых может существенно различаться в зависимости от конкретного химического состава. Поэтому термическое стимулирование разрушения этих связей будет вести к процессам, строго специфичным для каждого из анализируемых объектов такого типа. Это подтверждают имеющиеся данные о том, что такой распространенный полисахарид, как крахмал, демонстрирует специфическое электрофизическое поведение, а именно – дает отличный от нуля индивидуальный спектр термостимулированных токов (ТСТ), на котором фиксируется токовый отклик на релаксационные переходы полисахаридов и на десорбцию влаги [4]. Схожие явления, обусловленные перераспределением электронной плотности, вращением фрагментов макромолекул и т.п., могут наблюдаться и в других подобных веществах или объектах.

Цель работы – представить и проанализировать экспериментальные данные, подтверждающие информативность метода ЭТА при исследовании веществ, входящих в состав пищевых продуктов или непосредственно являющихся ими, а именно – хитозана и растительных масел.

Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования выбраны:

- хитозан пищевой;
- масло подсолнечное рафинированное дезодорированное «Премиум» товарного знака «Затея»;
- масло оливковое нерафинированное Extra Virgin товарного знака «Romelia»;
- масло тыквенное пищевое нерафинированное производства ООО «Натуральные масла».

Метод ЭТА основан на нагревании анализируемого образца, размещенного между заземленным и измерительным электродами, с задаваемой постоянной скоростью [1]. Во внешней цепи, замыкающей электроды, возникает ТСТ. Его причиной является интенсификация теплового движения частиц, разрушающего поляризованное состояние анализируемого образца, что сопровождается высвобождением носителей заряда из ловушек и их движением к электродам. Результат ЭТА – график зависимости протекающего во внешней цепи электрического тока от температуры, т.е. спектр ТСТ. Функциональная схема измерительного комплекса включает измерительную ячейку с двумя алюминиевыми электродами и термокамеру. Изоляция электродов осуществляется с помощью термостойких диэлектриков (фторопласт-4, керамика), обеспечивающих сопротивление не менее 10^{12} Ом. Имеется автоматическое устройство для программируемого повышения температуры, а также пикоамперметр, обеспечивающий измерение ТСТ с погрешностью $\leq 5\%$. Регистрировали спектры ТСТ с сохранением данных в цифровом виде с помощью специализированного программного обеспечения.

ЭТА проводили с учетом консистенции исследуемых образцов (порошкообразный хитозан и жидкие растительные масла). Из порошкообразного хитозана прессовали «таблетки» диаметром 10 мм и толщиной 2 мм. Для фиксации образцов растительных масел в измерительной системе применено запатентованное техническое решение [5], заключающееся в использовании инертного «носителя» диэлектрической жидкости – мелкодисперсного порошка кварца или диоксида титана, причем «носитель» смешивали с образцом растительного масла в соотношении 2:1 при общей массе смеси 0,5 г, а полученную композицию размещали на нижнем электроде и равномерно распределяли на площади 70–80 мм². Растительные масла подвергали ЭТА как в нативном виде, так и после термической обработки (оливковое, подсолнечное), моделируя варианты использования масла.

Результаты и их обсуждение

Хитозан – производное хитина – известен как уникальный энтеросорбент. Он имеет значительные перспективы для применения в составе продуктов и пищевых добавок. Методом ЭТА получен спектр ТСТ полученного из порошка хитозана таблетированного образца (рис. 1) [6]. Наличие высокоинтенсивных токовых пиков на спектре позволяет однозначно отнести хитозан к классу природных электретов. Электретное состояние этого химического соединения обусловлено координационной природой его надмолекулярной структуры и возможностью реализации нескольких конформационных вариаций макромолекул, причем каждая из этих вариаций характеризуется особым взаимным расположением связанных диполей. Именно с указанными вариациями могут быть соотнесены токовые экстремумы, зафиксированные методом ЭТА в диапазонах 60–70, 90–95 и вблизи 130 °С.

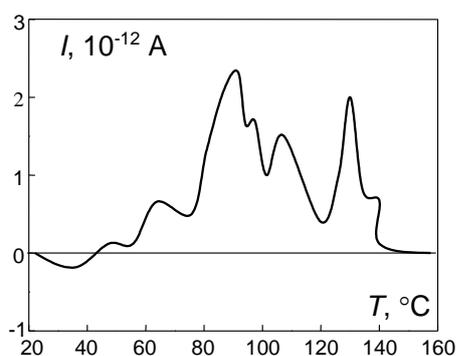


Рис. 1 – Спектр ТСТ хитозана

Вид спектра ТСТ хитозана отличается от спектра α -хитина, приведенного в работе [2]. Это может иллюстрировать различный характер удерживания электрического заряда и реализации взаимодействий посредством меж- и внутримолекулярных водородных связей в этих биополимерах, близких по химическому составу, но отличающихся по виду функционального аминного заместителя, а также по характеру структурирования координационной воды.

В работах [7, 8] впервые предложено расширить арсенал инструментальных методов исследования растительных масел за счет ЭТА. Токвый анализ дополняет широко применяемые в пищевой индустрии методы, которые используются для определения кислотного, перекисного, йодного чисел, показателя преломления, содержания влаги, числа омыления и др. показателей. В работе [9] подробно описано методологическое обоснование применения ЭТА для исследования растительных масел. Растительное масло представляет собой типичную диэлектрическую среду (по разным источникам, диэлектрическая проницаемость 2–3, удельная электрическая сопротивляемость свыше 10^{10} Ом·м). Основными компонентами растительных масел являются триглицериды ненасыщенных жирных кислот (олеиновой, линолевой, линоленовой и др.). Молекулы этих веществ имеют неопределенные химические связи и кислородсодержащие группы, которые способны к внутри- и межмолекулярным взаимодействиям. Вся изучаемая система, таким образом, имеет значительное число «связанных» электрических зарядов и, соответственно, обладает потенциалом для их термически стимулированного высвобождения, подобно любой сложноорганизованной системе взаимодействующих органических молекул.

Экспериментальные результаты ЭТА растительных масел представлены на рис. 2. Видно, что спектры ТСТ существенно различаются температурными диапазонами локализации экстремальных областей, а также геометрической формой основных токовых пиков. На спектрах образцов, подвергнутых предварительной термической обработке, обнаружено частичное либо полное вырождение некоторых экстремальных областей (токовых пиков), а также возникновение новых слабовыраженных пиков при других температурах.

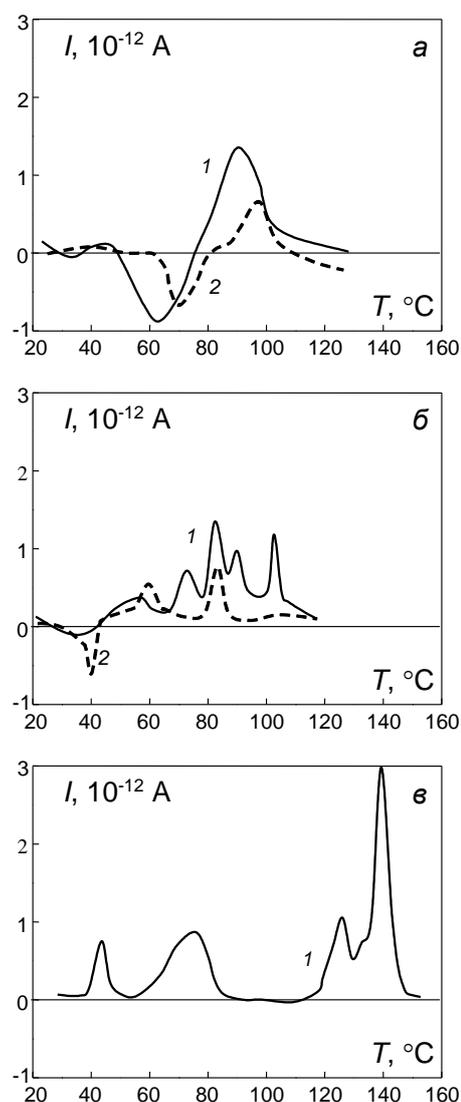


Рис. 2 – Спектры ТСТ растительных масел: а – подсолнечного; б – оливкового; в – тыквенного; 1 – исходный образец; 2 – образец после термообработки

Интерпретация процессов, происходящих при ЭТА, может быть основана на выдвинутой нами гипотезе о том, что за счет межмолекулярных взаимодействий молекулы триглицеридов жирных кислот связаны между собой координационными связями, формируя своеобразные надмолекулярные образования – ассоциаты, объединяющие несколько молекул таких триглицеридов. Нагрев образца масла в диапазоне 20–120 °С стимулирует разрушение этой сложноорганизованной системы, которое может быть описано следующим образом:

- начинается разрыв координационных связей между молекулами триглицеридов;
- при этом происходит перераспределение электронной плотности, вследствие чего от ассоциатов «отрываются» не электрически нейтральные молекулы триглицеридов, а их ионизированные производные или радикальные фрагменты;

– на систему постоянно воздействует атмосферный кислород, внося вклад в окисление триглицеридов и жирных кислот;

– окисление по перекисному механизму ведет к распаду триглицеридов на глицерин и окисленные фрагменты жирных кислот.

На каждой из этих стадий происходит нарушение электрической нейтральности и формирование ионизированных фрагментов молекул. Именно эти фрагменты представляются объектами, ответственными за токовый отклик, регистрируемый в определенном температурном диапазоне.

Представляется важным, что токовые отклики на вышеуказанные процессы не распределены равномерно по всему спектру ТСТ, а являются определенным образом согласованными, формируя четко обрисованные экстремальные области. Это дает основание сделать вывод о согласованном характере распада ассоциатов, относящихся к нескольким конкретным типам. В растительных маслах могут присутствовать триглицериды насыщенных (тип 1), моновенасыщенных (тип 2) и полиненасыщенных (тип 3) жирных кислот. Указанные соединения, имея кислородсодержащие функциональные группы (типы 1–3), одну двойную связь (тип 2) или несколько двойных связей (тип 3), способны с разной интенсивностью вступать в физико-химическое взаимодействие со своим окружением с образованием координированных структур (ассоциатов) из нескольких молекул триглицеридов. Для триглицеридов типа 1 возможности по реализации этих взаимодействий наименьшие, для типа 2 – значительные и для типа 3 – наибольшие, что обусловлено увеличением количества активных центров взаимодействий. Тем самым, ассоциаты будут отличаться по термической стабильности (наименее стабильные типа 1, более стабильные типа 2 и наиболее стабильные типа 3), т.е. разрушаться при различных температурах. Этим, как мы считаем, обуславливаются различия в спектрах ТСТ.

Относительное содержание ассоциатов того или иного типа лимитируется содержанием в составе масла тех или иных жирных кислот. Так, в подсолнечном масле содержится 8–10% насыщенных, 23–50 моновенасыщенных и 40–70% полиненасыщенных жирных кислот. На спектре ТСТ подсолнечного масла (рис. 2, а, кривая 1) практически не заметен низкотемпературный пик разрушения малостабильных и самых немногочисленных ассоциатов типа 1, при более высокой температуре фиксируется пик разрушения более стабильных ассоциатов типа 2, а при наибольшей температуре – пик разрушения наиболее стабильных ассоциатов типа 3.

На спектре ТСТ оливкового масла (рис. 2, б, кривая 1) наблюдаются две области, которые можно отнести к экстремальным: групповая в диапазоне 60–70 °С и одиночная вблизи 85 °С. На спектре термообработанного масла (рис. 2, б, кривая 2) в низкотемпературном диапазоне появляются два пика при 40 и 50 °С, а пики в двух других более высокотемпературных областях теряют свою интенсивность, т.е. вырождаются. Оливковое масло содержит главным образом олеиновую кислоту (до 84%, моновенасыщенная) и линолевую кислоту (7–13%, полиненасыщенная), а также малые количества линоленовой кислоты (полиненасыщенная). Среднетемпературную экстремальную область на спектре ТСТ можно сопоставить с деструкцией малостабильных ассоциатов, составленных триглицеридами моновенасыщенной олеиновой кислоты, а высокотемпературную – более стабильных ассоциатов, которые составлены триглицеридами полиненасыщенных кислот [9, 10]. Термообработка масла ведет к более глубокому окислению, а также к частичному разрушению ассоциатов, причем их «осколки» еще менее стабильны, чем исходные надмолекулярные структуры, и дают пики ТСТ при более низких температурах. За изменение картины ТСТ может быть также ответственна различная скорость окисления компонентов масел.

На спектре ТСТ тыквенного масла (рис. 2, в), обращает на себя внимание наличие трех выраженных групп токовых пиков – низкотемпературные пики в сравнительно узком диапазоне 40–50 °С, среднетемпературные пики в более широком диапазоне 65–90 °С, а также высокотемпературные пики (не менее двух) в диапазоне выше 130 °С (где для других масел пригодные для интерпретации токовые области не фиксировались). По нашему мнению, эта картина вновь согласуется с тремя видами жирных кислот, триглицериды которых превалируют в составе тыквенного масла – насыщенных, моновенасыщенных и полиненасыщенных. От взаимного соотношения кислот будет зависеть стабильность соответствующих ассоциатов триглицеридов. Поэтому токовые пики мы вновь соотносим с типом разрушаемых ассоциатов. Характерно, что высокотемпературный пик ТСТ тыквенного масла является высокоинтенсивным и сдвинут в существенно более высокотемпературную область. Это может быть обусловлено следующими причинами:

– способностью триглицеридов линолевой кислоты связываться в ассоциаты с триглицеридами других кислот, что усложняет структуру координационных связей и повышает стабильность кооперативных образований;

– вероятностью того, что в температурном диапазоне до 100 °С происходит не только термораспад малостабильных ассоциатов, но и рекомбинация триглицеридов различных кислот в более сложные и стабильные структуры, повторное согласованное разложение которых идет при существенно более высоких температурах.

Вышеприведенные рассуждения находятся в соответствии с пониманием того факта, что именно окисление жирных кислот является базовым процессом, отвечающим за изменение комплекса свойств растительного масла. Известно, что общая окислительная стабильность натуральных масел и жиров может быть определена методом «Rancimat», основанном на окислении молекул масла или жира с образованием первичного (пероксида) и вторичного (образовавшиеся после разложения жирных кислот низкомолекулярные органические кислоты) продуктов окисления, которые растворяются в воде, после чего по изменению электропроводности судят о со-

держании кислот, а по продолжительности индукционного периода до появления вторичных продуктов – об «индексе стабильности масла» [11]. Результаты комплексного экспериментального исследования физико-химических свойств смесей эфиров жирных кислот, полученных методом переэтерификации масел, представлены в работе [12].

Заключение

Включение ЭТА в число экспериментальных методов исследования пищевых продуктов находится в соответствии с современной тенденцией расширения арсенала инструментальных методов анализа. Одним из факторов качества продуктов может являться определенное электрофизическое поведение его компонентов. Изменение этого поведения, фиксируемое посредством ЭТА, свидетельствует о тех или иных физико-химических превращениях, которые, в свою очередь, необратимо изменяют свойства продукта в целом.

Хитозан проявляет себя как природный электрет (биоэлектрет). Его поляризационное состояние, обусловленное связанным зарядом и возможностью реализации конформаций макромолекул, может быть ответственным за ряд полезных свойств этого полисахарида. В частности, это способность содержащихся в хитозане молекулярных комплексов к эффективной физико-химической сорбции токсинов, а также возможность реализации координационных взаимодействий с другими органическими веществами, что обуславливает хорошую совместимость хитозана с элементами химического состава пищевых продуктов.

Растительное масло проявляет себя как сложноорганизованная диэлектрическая среда. Поляризационное состояние жидкого растительного масла является делокализованным по системе надмолекулярных образований – ассоциатов триглицеридов жирных кислот. Авторы, вводя в научный оборот понятие ассоциатов, придерживаются традиционного взгляда на окисление как на базовый механизм термически стимулированных деструктивных процессов в растительном масле. Нагрев масел провоцирует постепенное окисление триглицеридов по перекисному механизму, а конечным результатом является образование индивидуальных жирных кислот и их окисленных производных. Поэтому интерпретация токового отклика может оказаться несколько сложнее, чем представленная в данной работе. При этом авторы считают, что экспериментально зафиксированный методом ЭТА согласованный токовый отклик может быть объяснен именно распадом ассоциатов определенного типа. Для каждого вида масла специфичен тот или иной набор ассоциатов, зависящий от жирнокислотного состава. Это позволяет по спектрам ТСТ, например, определить видовую принадлежность масел или установить отклонение реального их состава от заявленного, т.е. признак фальсификации.

Не исключено, что в растительных маслах присутствуют ассоциаты смешанных типов. Однако трудно ожидать, что их термораспад будет согласо-

ванным, и токовый отклик на него будет делокализован по температурной шкале, явившись лишь фоном для согласованных процессов, аналогичных вышеописанным.

Можно заключить, что ЭТА имеет перспективы применения в качестве средства анализа пищевых продуктов на том основании, что многие из них содержат вещества диэлектрической природы, которые подчиняются всем закономерностям, изучаемым в физике диэлектриков. На основе описанного подхода существует возможность получить интерпретируемые результаты ЭТА по таким объектам, как пищевые жиры и полисахариды.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Республики Беларусь.

Литература

1. Пластмассы и пленки полимерные. Методы определения поверхностных зарядов электретов: ГОСТ 25209-82. – Введ. 01.01.82. – М.: Госкомитет СССР по стандартам, 1982. – 12 с.
2. Маскаренас, С. Биоэлектреты: электреты в биоматериалах и биополимерах / С. Маскаренас // Электреты / Под ред. Г.М. Сесслера: пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – Гл. 6. – С. 400-430.
3. Кравцов, А.Г. Электрические и магнитные поля в полимерных волокнистых фильтроэлементах для тонкой очистки многофазных сред: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: 01.04.07 / А.Г. Кравцов; ИММС НАН Беларуси. – Гомель, 2007. – 44 с.
4. Electret-thermal analysis to assess biodegradation of polymer composites / L.S. Pinchuk [et al.] // Intern. Biodeterioration & Biodegradation. – 2004. – № 54. – P. 13-18.
5. Способ термоактивационной токовой спектроскопии пищевого растительного масла. Патент 21764 РБ, МПК7 G 01 N 27/00, G 01 N 27/00, G 01 N 33/03 // Ж.В. Кадолич [и др.]; заявители ИММС НАН Беларуси, БТЭУ ПК. – № а20150180; заявл. 06.04.2015; опубл. 30.12.2017 / Афіцыйны бюлетэнь / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці Рэспублікі Беларусь. – 2017. – № 6.
6. Материал для эндопротеза кровеносного сосуда на основе высокомолекулярных соединений / Е.А. Цветкова [и др.] // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 20. – С. 57-62.
7. Кадолич, Ж.В. Базовые и перспективные методы контроля качества растительных масел / Ж.В. Кадолич, И.О. Деликатная // Современная торговля: теория, практика, перспективы развития: материалы I Международной инновационной научно-практической конференции, Москва, 12 марта 2012 г. / Московский гуманитарный университет. – М.: Изд-во МГУ, 2012. – С.939-942.
8. Кадолич, Ж.В. Растительные масла: потребительский рынок, фальсификация, методы контроля качества / Ж.В. Кадолич, И.О. Деликатная, Е.А. Цветкова // Потребительская кооперация. – 2012. – №4 (39). – С. 82-91.
9. Кадолич, Ж.В. Пример реализации комплексного подхода к оценке качества растительных масел / Ж.В. Кадолич, С.В. Зотов // Вопросы качества и конкурентоспособности товаров: коллективная монография. – Москва: ООО «Русайнс», 2018. – Гл. 1. – С. 5-18.
10. Кадолич, Ж.В. Анализ качественного состава оливкового масла методом электретно-термического анализа / Ж.В. Кадолич // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 160-163.
11. Жиры и масла животные и растительные. Определение устойчивости к окислению (ускоренное испытание на

окисление): ГОСТ Р 53160-2008 (ISO 6886:2006). – Введ. 01.01.2010. – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии; ФГУП «Стандартинформ», 2009. – 12 с.

Крук, Ю.В. Максимук, В.Н. Курсевич // Свиридовские чтения: сб. ст. – Минск: БГУ, 2014. – Вып. 10. – С. 163-177.

12. Исследование составов и физико-химических свойств смесей эфиров жирных кислот / З.А. Антонова, В.С.

© **Ж. В. Кадолич** – доцент, кандидат техн. наук, доцент кафедры товароведения Учреждения образования «Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации», 246029, Республика Беларусь, г.Гомель, проспект Октября, 50. Тел: +375(232)401618, chilodak@mail.ru; **С. В. Зотов** – кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела «Композиционные материалы и рециклинг полимеров» Государственного научного учреждения «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», zotov-1969@mail.ru.

© **Zh. V. Kadolich** – assistant professor, Ph. D. (Tech.), assistant professor of the Department of commodity research, Belarus Trade and Economic University of Consumer's Cooperation, 246029, Belarus, Gomel, October Avenue, 50. Tel: +375(232)401618, chilodak@mail.ru; **S. V. Zotov** - Ph. D. (Tech.), Lead researcher of the Department of Composite materials and polymers recycling, V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National academy of sciences of Belarus, zotov-1969@mail.ru.