

УДК 547.326:544.2

З. А. АНТОНОВА, В. С. КРУК, В. Н. КУРСЕВИЧ,
Ю. В. МАКСИМУК, М. Г. КРИВОВА

ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА ЭТИЛОВЫХ ЭФИРОВ РАПСОВОГО МАСЛА

Исследованы особенности получения и свойства этиловых эфиров рапсового масла, разработана усовершенствованная технология производства биодизельного топлива с использованием этанола в качестве переэтерифицирующего агента. Изучены три стадии процесса: переэтерификация рапсового масла; разделение фракций; выделение и осушка полученных продуктов. Рассмотрено влияние температуры, концентрации катализатора и молярного соотношения «этанол – масло» на протекание реакции переэтерификации. Определены оптимальные условия проведения процесса, проанализированы факторы, снижающие его эффективность, и предложены пути их преодоления. Установлено, что по основным физико-химическим и топливным характеристикам этиловые эфиры рапсового масла не уступают образцам биодизельного топлива на основе аналогичных метиловых эфиров.

Ключевые слова: этиловые эфиры рапсового масла; переэтерификация; этанол; биодизельное топливо.

Peculiarities of canola oil ethyl esters synthesis and properties were investigated, improved technology of biodiesel fuel production with the use of ethanol as a transesterification agent was developed. The detailed study of three stages of the process was performed: 1) transesterification of canola oil; 2) separation of the fractions; 3) biofuel isolation and drying. The influence of temperature, catalyst concentration and ethanol/oil ration on transesterification process was analyzed. Optimum conditions for ethyl esters production were determined. Decreasing efficiency factors were evaluated, and the practical ways to overcome these problems were proposed. The obtained canola oil ethyl esters were found to be relevant to methyl esters in reference to their main physical chemical and fuel properties.

Key words: canola oil ethyl esters; transesterification; ethanol; biodiesel fuel.

Дизельное биотопливо, представляющее собой смесь сложных моноэфиров высших жирных кислот, получаемых путем переэтерификации растительных масел и животных жиров [1, 2], является одним из наиболее распространенных альтернативных видов топлива, отвечающих основным требованиям к энергоносителям – экологическая чистота, наличие возобновляемых сырьевых источников и безопасность в эксплуатации [3–5]. В существующих технологиях в качестве переэтерифицирующего агента, как правило, используется метиловый спирт, представляющий собой легковоспламеняющуюся, токсичную жидкость третьего класса опасности, оказывающую негативное воздействие главным образом на нервную и сосудистую систему человека при попадании в организм через дыхательные пути или кожный покров. Альтернативой метанолу для производства биодизельного топлива могут служить безопасный этиловый спирт или его смеси с другими низкомолекулярными спиртами. Так, в [6–8] показано, что этиловые эфиры высших жирных кислот имеют характеристики, близкие к дизельному топливу, а использование их в качестве топлива или добавок к различным его видам способствует уменьшению содержания оксидов азота и токсичных полиароматических углеводородов в выхлопных газах [3, 9]. Низкая летучесть получаемых образцов биотоплива позволяет снизить упругость паров смесевоего топлива и повысить таким образом его взрывобезопасность [10].

Замена метанола на этанол и этанолсодержащие жидкости позволяет снизить издержки производителя, получающего топливо на собственных установках из местного сырья или из спиртосодержащих отходов промышленных предприятий и имеющего возможность комплексной переработки исходных компонентов с последующей реализацией сопутствующих продуктов (глицерин, жирные

кислоты, жмых). В Республике Беларусь действует ряд небольших спиртопроизводящих заводов, которые испытывают значительные трудности с реализацией своей продукции [11]. Заводы большой мощности (ОАО «Минск Кристалл», РУП «Мозырский комбинат “Этанол”», ОАО «Бобруйский завод биотехнологий» и др.) сталкиваются с проблемой утилизации отходов головной фракции – побочных продуктов получения этанола из пищевого сырья. В частности, только на Мозырском комбинате «Этанол» суммарный объем этой фракции превышает 200 тыс. дал в год. Аналогичные проблемы утилизации таких спиртосодержащих отходов наблюдаются и в других странах, в том числе в Российской Федерации [12]. Однако переработка растительных масел с использованием этанола в качестве переэтерифицирующего агента не получила повсеместного распространения в связи с высокой растворимостью в этаноле получаемых эфиров, затрудняющей выделение продуктов реакции, гигроскопичностью этилового спирта и, как следствие, более низкими выходами конечного продукта [13]. В данной статье описан процесс разработки усовершенствованной технологии получения одного из основных компонентов дизельного биотоплива – этиловых эфиров жирных кислот рапсового масла (ЭЭРМ), а также приведены результаты исследований их физико-химических и топливных характеристик.

Экспериментальная часть

В качестве исходного сырья для получения дизельного биотоплива было использовано рапсовое масло (ООО «БелВнешТрейддинг», Беларусь), предварительно очищенное по методике, приведенной в патенте [14]. Получаемое таким образом масло представляло собой прозрачную жидкость с остаточным содержанием фосфолипидов не более 0,012 % (в пересчете на P_2O_5).

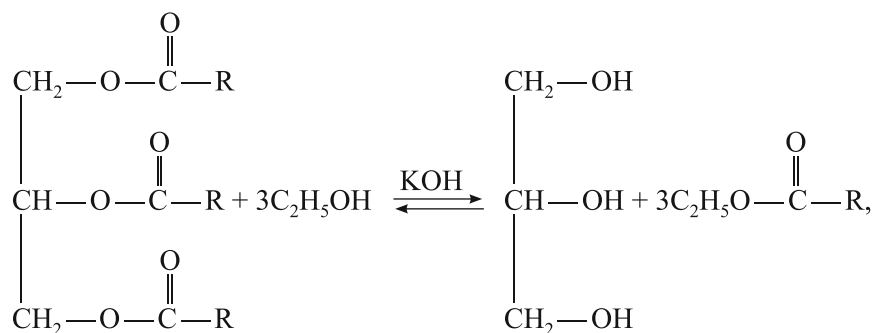
В качестве переэтерифицирующих агентов были взяты следующие образцы:

- спирт этиловый ректификованный из пищевого сырья марки «Люкс» (СТБ 1334, ОАО «Минск Кристалл»), абсолютизированный по методикам, описанным в [15];
- спирт этиловый ректификованный технический марки «Экстра» (ГОСТ 18300, ОАО «Бобруйский завод биотехнологий»), содержащий не менее 96,2 об. % этанола.

Реакция переэтерификации рапсового масла изучалась на созданной лабораторной установке производительностью 0,3 кг ЭЭРМ за один технологический цикл по методике, разработанной ранее [16, 17] для получения метиловых эфиров и модифицированной с поправкой на сложности, возникающие при использовании этанолсодержащих реагентов. Реактором служила круглодонная колба (емкостью 1,0 дм³), помещенная в термостат и снабженная мешалкой, обратным холодильником и системой конденсации. В нее помещали смесь рапсового масла и этанола, медленно нагревали до 75 °С, затем вводили катализатор и начинали перемешивание. В качестве катализатора использовали спиртовой раствор гидроксида калия. По окончании синтеза реакционную смесь охлаждали до комнатной температуры и добавляли глицерин (25 % веса масла), который способствовал формированию двух фаз. Содержимое переливали в делительную воронку для последующей обработки. После отстаивания образовывались две фазы – верхняя, состоящая из ЭЭРМ, и нижняя, содержащая глицерин, избыток этанола, непрореагировавший гидроксид калия, образовавшиеся мыла и продукты неполной переэтерификации. Полученные ЭЭРМ очищали отгонкой остаточного этанола, катализатор удаляли последовательным промыванием 1 % раствором лимонной кислоты (до нейтрального pH) и затем дистиллированной водой. Затем ЭЭРМ окончательно высушивали на ротаторном испарителе при температуре 75 °С и остаточном давлении 3,5 кПа, а также очищали вакуумной дистилляцией при 140 ÷ 90 °С и 0,3 кПа. Для определения степени переэтерификации из реакционной среды отбирали пробы по 3–4 см³, реакцию в которых останавливали добавлением 1–2 капель воды. Далее пробы сушили и оценивали жирнокислотный состав, содержание остаточного этанола и глицерина. Анализ рапсового масла и полученных на его основе эфиров проводили на газожидкостном хроматографе Цвет-800 с пламенно-ионизационным детектором и капиллярной колонкой Supelco № 19592-05 (60 м × 0,53 мм × 0,5 мкм) с наполнителем – привитый Carbowax 20M – и программированием температуры в интервале 35 ÷ 280 °С. Для идентификации эфиров, определения жирнокислотного состава и общего содержания эфиров в реакционной смеси использовали стандартные образцы Supelco 18920-1AMP, Supelco 4-7801 и метилгептадеканат (Fluka 51633).

Результаты экспериментов и их обсуждение

Процесс получения дизельного биотоплива из растительного сырья заключается в проведении реакции переэтерификации сложных триглицериновых эфиров, содержащихся в растительном масле, действием стехиометрического количества низших спиртов в присутствии катализатора:



где R – углеводородные радикалы C₁₄—C₂₄.

Практическим результатом такого процесса является образование сложной смеси, состоящей из этиловых эфиров – основного продукта синтеза, глицерина – ценного побочного продукта, широко применяемого в различных промышленных процессах [18, 19], этанола, остатков непрореагировавшего катализатора, солей карбоновых кислот, моно- и диглицеридов, содержащей также некоторое количество фосфолипидов, фосфатидов, каротинов, токоферолов, соединений серы и других примесей, входящих в состав исходных растительных масел. Таким образом, общая эффективность технологии получения ЭЭРМ определяется степенью превращения исходного сырья, а также эффективностью разделения продуктов реакции, выделения и очистки эфирной фракции.

Влияние количественного соотношения компонентов. Поскольку реакция переэтерификации равновесная, избыток спирта смещает равновесие в сторону образования продуктов реакции. Однако при большом избытке этанола увеличивается растворимость глицерина в реакционной смеси, что затрудняет его выделение и ухудшает распределение катализатора между эфирным и глицериновым слоями.

При стехиометрическом соотношении спирта и масла выход ЭЭРМ, как видно из табл. 1, не превышал 62 %. При этом большая часть катализатора находилась в глицериновой фазе. С увеличением количества этанола катализатор равномерно распределялся между обеими фазами, и выход эфиров постепенно увеличивался, достигая максимума при соотношениях от 9 : 1 до 12 : 1. Оптимальным же составом для получения ЭЭРМ является смесь этанол/масло в соотношении 9 : 1, поскольку при дальнейшем повышении содержания спирта ухудшается разделение продуктов реакции, а верхняя эфирная фракция, как показали результаты хроматографического анализа, частично обогащается глицерином, что уменьшает выход эфиров. При использовании в качестве переэтерифицирующего агента технического этилового спирта степень переэтерификации значительно меньше (см. табл. 1), что обусловлено присутствием воды, подавляющей протекание реакции.

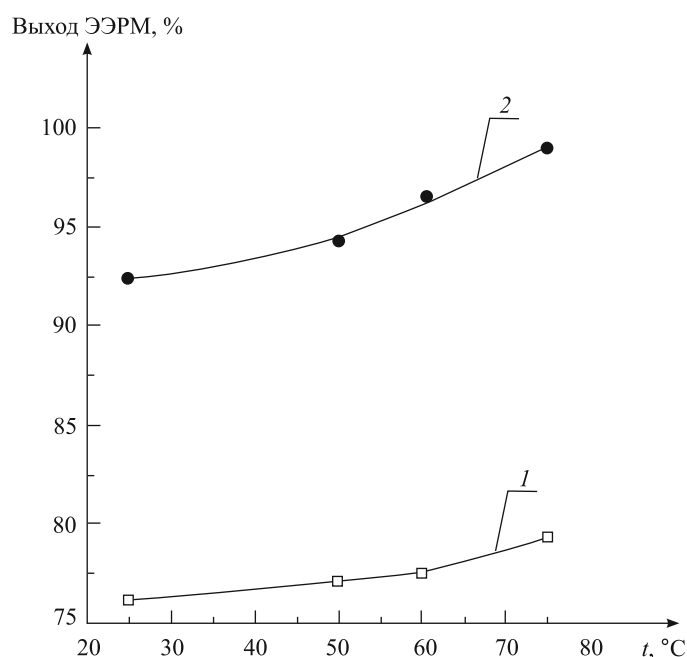
Таблица 1

Результаты опытов по переэтерификации рапсового масла этанолом

Спирт	Молярное соотношение «этанол – масло»	Количество катализатора (KOH), мас. %	Время реакции, мин	Выход ЭЭРМ, %
Этанол абсолютизированный	3 : 1	1,0	120	61,7 ± 0,3
	4,5 : 1	0,5	300	84,4 ± 0,3
	4,5 : 1	1,0	240	95,1 ± 0,3
	6 : 1	1,0	120	89,2 ± 0,3
	9 : 1	0,5	120	37,1 ± 0,2
	9 : 1	1,0	120	96,2 ± 0,3
	9 : 1	1,5	120	89,4 ± 0,3
	12 : 1	1,0	120	95,4 ± 0,3
	15 : 1	1,0	120	88,9 ± 0,3
Этанол технический	4 : 1	1,0	10	19,8 ± 0,2
	4 : 1	1,0	60	38,3 ± 0,2
	4 : 1	1,0	120	42,4 ± 0,2
	9 : 1	1,0	10	69,9 ± 0,3
	9 : 1	1,0	60	77,0 ± 0,3
	9 : 1	1,0	120	81,8 ± 0,3

Помимо этого, проведение синтеза с техническим этанолом во всех случаях сопровождалось трудностями с выделением продуктов реакции: для четкого разделения смеси на эфирную и глицериновую фракции требовалось больше времени, чем в опытах с абсолютизированным этанолом. Для ускорения процесса выделения ЭЭРМ после окончания синтеза в реакционную смесь можно добавлять какой-нибудь неполярный растворитель, например гексан в количестве 1/3 части объема смеси. Однако в промышленной технологии это потребует введения дополнительной стадии, связанной с отгонкой растворителя. Нами установлено, что для облегчения выделения эфирной фракции в реакционную смесь следует добавлять дополнительное количество глицерина.

Влияние температуры. В присутствии катализатора реакция переэтерификации сложных эфиров протекает и при комнатной температуре, однако на практике процесс обычно проводится при температуре, близкой к температуре кипения спирта, использующегося в качестве переэтерифицирующего агента. С технологической точки зрения это означает, что получение этиловых вместо метиловых эфиров рапсового масла требует изменения температуры реакционной смеси с 65 °С (температура кипения метанола) до 78 °С. Для оценки целесообразности такого повышения температуры, приводящего к существенному увеличению энергозатрат, были проведены опыты по получению ЭЭРМ при различных температурах. В результате показано, что при использовании абсолютизированного этилового спирта реакция переэтерификации протекает очень быстро: уже через 10 мин после ее начала степень превращения эфиров составляла более 70 %, а через 4 ч при температуре 75 °С достигала 99 % (рисунок). Подобная ситуация наблюдалась и в случае использования технического этанола с той лишь поправкой, что при аналогичных условиях степень переэтерификации была значительно ниже.



Влияние температуры на выход ЭЭРМ в различное время синтеза:
1 – 10 мин; 2 – 240 мин

При синтезе выяснилось, что более высокие температуры реакционной смеси в дальнейшем способствуют ее разделению на глицериновую и эфирную фракции, что упрощает процесс выделения конечного продукта и увеличивает эффективность всего процесса в целом.

Влияние концентрации катализатора. Из полученных данных следует, что наиболее высокие выходы ЭЭРМ наблюдаются при использовании 1–1,5 % гидроксида калия от массы масла (см. табл. 1). При этом увеличение концентрации катализатора выше 1,3 % является экономически нецелесообразным, поскольку не приводит к существенному повышению степени превращения, но влечет за собой дополнительные затраты, связанные со стоимостью катализатора и работой по удалению избыточной щелочи из реакционной среды по окончании реакции. Помимо этого, возрастание количества гидроксида калия вызывает формирование эмульсии, которая увеличивает вязкость смеси и способствует растворению ЭЭРМ в глицериновой фракции, препятствуя разделению продуктов реакции и уменьшая выход конечного продукта. Таким образом, оптимальное количество щелочного катализатора составляет 1–1,3 мас. % без учета поправки на кислотность исходного масла.

Выделение и очистка ЭЭРМ. Процедура выделения и очистки ЭЭРМ может быть осуществлена двумя путями. Первый – выделение ЭЭРМ вакуумной дистилляцией при давлении 100÷130 Па и температуре 170÷220 °С без предварительной подготовки, второй – классический: последовательное выделение, отмывка и осушка продукта. Особенностью получения ЭЭРМ и использования в качестве переэтерифицирующего агента этилового спирта являются трудности разделения фаз и выделения продуктов реакции, связанные с достаточно высокой растворимостью ЭЭРМ в этаноле, еще более увеличивающейся в присутствии низкомолекулярных жирных кислот, играющих в этом случае роль солибилизаторов. Кроме того, ЭЭРМ обладают предельно высокой способностью к образованию эмульсий в случае контакта с водой, поэтому при промывании вода должна добавляться медленно, а перемешивание самой смеси проводится предельно осторожно. Потери при таком способе очистки составляют от 5 до 10 % и связаны в основном с удалением мыла и глицеридов и их частичным переходом в нижний слой в процессе расслоения и отмывки. Использование ротационного испарителя позволяет значительно сократить потери при отгонке этилового спирта и исключить стадию осушки ЭЭРМ с помощью сульфата натрия.

Выбранный способ очистки оказывает влияние на отдельные физико-химические свойства получаемого биотоплива, в частности на его стойкость к окислению. Так, по данным хроматографического анализа, содержание ЭЭРМ в образцах, полученных после вакуумной дистилляции, достигало 99÷100 %, однако стойкость к окислению, определенная Rancimat-методом [20] согласно EN 14112, составляла всего 1 ч вместо требуемых 6 ч (СТБ 1657). В то же время ЭЭРМ, очищенные традиционным способом, по стойкости к окислению соответствовали требованиям стандарта, но их чистота не превышала 97 %. Более глубокий анализ данной проблемы показал, что она вызвана тем, что в ходе вакуумной дистилляции природные антиоксиданты (токоферолы), обеспечивающие необходимую окислительную стойкость эфиров, остаются в кубовом остатке и практически полностью отсутствуют в конечном продукте. Поэтому сразу по получении ЭЭРМ, очищенных с помощью вакуумной дистилляции, в них предварительно следует вводить некоторое количество антиоксидантов для предотвращения преждевременного окисления.

Сравнительный анализ таких физико-химических свойств эфиров, как плотность, вязкость, температура вспышки и высшая теплота сгорания, свидетельствует о том, что ЭЭРМ могут использоваться в качестве биодизельного топлива наряду с аналогичными метиловыми эфирами (табл. 2).

Таблица 2

Основные свойства этиловых (ЭЭРМ) и метиловых (МЭРМ) эфиров рапсового масла

Показатель	ЭЭРМ	МЭРМ	Нефтяное дизельное топливо EN 590	Биотопливо EN 14214	Метод испытаний
Плотность при 15 °С, кг/м ³	877	882	800–845	860–900	ISO 3675-1998
Вязкость при 40 °С, мм ² /с	4,49	4,16	2,0–4,5	3,5–5,0	ISO 3104-2003
Температура вспышки в закрытом тигле, °С, не менее	179	174	55	120	ISO 2719-2002
Высшая теплота сгорания, МДж/кг	40,12 ± 0,07	39,87 ± 0,05	42,9 Не нормируется	Не нормируется	ASTM D 4809-09

Таким образом, при исследовании особенностей получения этиловых эфиров рапсового масла установлено, что главными факторами, влияющими на выход и чистоту ЭЭРМ, являются концентрация катализатора, молярное соотношение «этанол – масло» и температура. Оптимальные условия для получения ЭЭРМ, соответствующих требованиям ТНПА, следующие: температура 75 °С, концентрация катализатора 1,0 % и молярное соотношение «этанол – растительное масло» 9 : 1. При молярном соотношении менее 9 : 1 реакция проходит не полностью, а с его увеличением затрудняется отделение глицерина и уменьшается выход эфиров. Показано, что присутствие даже незначительного количества воды существенно снижает выход ЭЭРМ, поэтому при практической реализации процесса требуется проведение предварительной тщательной осушки реактора и исходного сырья, в том числе и абсолютизация используемого этилового спирта.

Показано, что ЭЭРМ, очищенные методом вакуумной дистилляции, обладают пониженной стойкостью к окислению, поэтому при дальнейшем использовании требуют введения антиоксидантных добавок. В целом же по основным физико-химическим и топливным характеристикам ЭЭРМ не уступают образцам биодизельного топлива на основе аналогичных метиловых эфиров. Таким образом, замена метанола этиловым спиртом при переэтерификации рапсового масла позволит производить безопасное и экологически чистое биодизельное топливо, качество которого будет удовлетворять всем необходимым требованиям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Производство биодизельного топлива из органического сырья / С. И. Дворецкий [и др.] // *Вопр. современной науки и практики*. 2012. № 39. С. 126–135.
2. Панченко А. В. Биотопливо как альтернативный источник энергии // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2007. № 6 (18). С. 14–19.

3. Vozbas K. Biodiesel as an alternative motor fuel: Production and policies in the European Union // *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2008. Vol. 12, iss. 2. P. 542–552.
4. Брагинский О. Б. Альтернативные моторные топлива: мировые тенденции и выбор для России // *Рос. хим. журн.* 2008. Т. 52, № 6. С. 137–146.
5. Маляренко В. А., Яковлев А. И. Биодизель – альтернатива диверсификации моторных топлив // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит.* 2006. № 3. С. 64–73.
6. Transesterification of vegetable oils with ethanol and characterization of the key fuel properties of ethyl esters / G. Anastopoulos [et al.] // *Energies.* 2009. Vol. 2, iss. 2. P. 362–376.
7. Bouaid A., Martinez M., Aracil J. A comparative study of the production of ethyl esters from vegetable oils as a biodiesel fuel optimization by factorial design // *Chem. Eng. J.* 2007. Vol. 134, iss. 1. P. 93–99.
8. Ethyl ester of rapeseed used as a biodiesel fuel – a case study / C. L. Peterson [et al.] // *Biomass and Bioenergy.* 1996. Vol. 10, iss. 5. P. 331–336.
9. Makareviciene V., Janulis P. Environmental effect of rapeseed oil ethyl ester // *Renewable energy.* 2003. Vol. 28, iss. 15. P. 2395–2403.
10. Experimental vapor pressures of five saturated fatty acid ethyl ester (FAEE) Components of biodiesel / M. Benziane [et al.] // *J. Chem. Eng. Data.* 2011. Vol. 56, iss. 12. P. 4736–4740.
11. Орехов А. И. Спиртовая промышленность Республики Беларусь: современное состояние и перспективы развития // *Пищ. пром.: наука и технологии.* 2011. № 1 (11). С. 3–6.
12. Габуев А. Б. О правовом режиме отходов спиртового производства // *Бизнес в законе.* 2009. № 3. С. 14–17.
13. Rubin E. M. Genomics of cellulosic biofuels // *Nature.* 2008. Vol. 454, iss. 7206. P. 841–845.
14. Способ рафинации серосодержащих растительных масел : пат. 1214746 СССР, МКИ С 11 В 3/04 / В. С. Стопский, А. Б. Рафальсон, Н. Н. Майорова, Н. Л. Меламуд, Т. А. Шургая, В. Н. Григорьева ; заявитель НПО «Масложирпром». № 3731734/28-13 ; заявл. 25.04.84 ; опубл. 28.02.86 // *Бюл. / ВНИИПИ Гос. ком. СССР по делам изобретений и открытий.* 1986. № 8.
15. Общий практикум по органической химии : пер. с нем. / под ред. А. Н. Коста. М., 1965. С. 623.
16. Максимук Ю. В., Антонова З. А. Характеристические особенности жидких биотоплив // *Энергоэффективность.* 2008. № 1. С. 2–5.
17. Смирский В. В., Антонова З. А., Крук В. С. Промышленная переработка рапсового масла // *Белорусское сельское хозяйство.* 2003. № 11. С. 36–38.
18. Воробьев А. Полиэфирные смолы // *Компоненты и технологии.* 2003. № 32. С. 182–185.
19. Кириченко В. И., Нездоровин В. П. Комплексная переработка растительных масел и производство смазочно-охлаждающих средств для обработки металлов. Сообщ. 2. Принципы технологии и рационального использования // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.* 2013. № 5. С. 93–100.
20. Läubli M. W., Bruttel P. A. Determination of the oxidative stability of fats and oils: comparison between the active oxygen method (AOCS Cd 12-57) and the Rancimat method // *J. Am. Oil Chem. Soc.* 1986. Vol. 63, iss. 6. P. 792–795.

Поступила в редакцию 28.10.2014.

Зоя Арсеньевна Антонова – кандидат химических наук, заведующая лабораторией топлив, масел и кормов учреждения БГУ «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем».

Владимир Сергеевич Крук – научный сотрудник лаборатории топлив, масел и кормов учреждения БГУ «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем».

Вера Николаевна Курсевич – научный сотрудник лаборатории топлив, масел и кормов учреждения БГУ «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем».

Юрий Владимирович Максимук – кандидат химических наук, заведующий сектором лаборатории топлив, масел и кормов учреждения БГУ «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем».

Марина Григорьевна Кривова – кандидат химических наук, старший преподаватель кафедры физической химии химического факультета БГУ, научный сотрудник лаборатории топлив, масел и кормов учреждения БГУ «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем».

УДК 630.432

В. В. БОГДАНОВА, Т. В. ЛАКТЮШИНА, К. В. ДОБРЕГО, О. В. ЖИЛИНСКИЙ, О. И. КОБЕЦ, А. Н. ЛАКТЮШИН

РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИНТЕТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОГНЕЗАЩИТЫ И ТУШЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ МНОГОМЕРНОГО КОМПЬЮТЕРНОГО СИНТЕЗА

Разработана рецептура синтетического средства, обладающего наилучшим устойчивым огнезащитным и огнетушащим действием по отношению к древесине и торфу, методом многомерного компьютерного синтеза с учетом коллективного влияния химических компонентов на свойства азот-, фосфорсодержащих замедлителей горения. Применение предложенного подхода обеспечило корректную системную интерпретацию результатов огневых испытаний, а также сокращение временных, материальных и трудовых затрат на создание технического оптимального варианта рецептуры огнезащитно-огнетушащего средства для предупреждения и тушения лесных и торфяных пожаров.

Ключевые слова: огнезащитно-огнетушащее средство; азот-, фосфорсодержащее; математическая модель; оптимизация рецептуры; многомерный компьютерный синтез.