

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Взрывное дело

№ 145/102

ЕДИНСТВЕННОЕ РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЕ ИЗДАНИЕ ПО ВЗРЫВНОМУ ДЕЛУ.
ОСНОВАН В 1932 г.

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ВЗРЫВНОГО ДЕЛА

Редакционная коллегия:

Главный редактор:
Трубецкой К.Н.

Ответственный редактор:
Рахманов Р.А.

Зам. главного редактора:
Викторов С.Д.
Вяткин Н.Л.
Захаров В.Н.

Члены редколлегии:

Адушкин В.В.
Блэр Д.
Бурке Б.
Валери В.
Горлов Ю.В.
Державец А.С.
Ефремов Э.И.
Жамьян Ж.
Жариков И.Ф.
Закалинский В.М.
Казачков Н.Н.

Крسمанович И.
Куликов В.И.
Лапиков И.Н.
Меркин А.А.
Петров Е.А.
Ракишев Б.Р.
Тханг Д.Т.
Умаров Ф.Я.
Федотенко В.С.
Шляпин А.В.

Москва, 2024

УДК 622.235
ББК 622.80
В408

Взрывное дело. Выпуск № 145/102. – М.: ИПКОН РАН, 2024. – 225 с.

В сборнике приведены результаты фундаментальных исследований и статьи прикладного характера, которые служат основой для научных направлений и технических разработок во взрывном и горном деле. Рассмотрены вопросы процессов разрушения горных пород, детонации и действия взрыва, исследования свойств взрывчатых материалов, технологии изготовления взрывчатых веществ и средств инициирования, технологии ведения взрывных работ в различных областях промышленности, сейсмического действия взрыва, утилизации конверсионных взрывчатых веществ, экологии и безопасности при ведении взрывных работ.

Сборник предназначен для специалистов научно-исследовательских и проектных организаций, инженерно-технических работников горно-добывающей, строительной и других отраслей промышленности, студентов и аспирантов, занимающихся вопросами взрывного и горного дела.

Сборник включен в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук».

За достоверность научно-технической информации ответственность несёт автор. За достоверность рекламной информации ответственность несёт рекламодатель. При перепечатке материала, ссылка на сборник «Взрывное дело» обязательна.

Учредитель и издатель:

ФГБУН Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН (ИПКОН РАН)
<https://ipkonran.ru>

ЗАО «МВК по взрывному делу при Академии горных наук»
<https://mvkmine.ru>

АНО «Национальная организация инженеров-взрывников в поддержку профессионального развития»
<https://noi-v.ru>

Адрес редакции:

111020, г. Москва,
Крюковский тупик, 4
Тел/факс: +7(495)664-36-71
E-mail: vd@mvkmine.ru

ISSN 0372-7009

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-63194 от 01.10.2015г.

Подписной индекс в объединенном каталоге «Пресса России» – 55212.

Электронный вариант издания доступен в научной библиотеке <https://elibrary.ru> и на сайте <https://sbornikvd.ru>

© ЗАО «МВК по взрывному делу» при Академии горных наук, 2024г.

<i>Солодухин Е.С., Шушпанов А.Н., Акинин Н.И., Франтов А.Е., Латилов И.Н.</i> Преимущества применения биодизельного топлива в качестве горючего компонента простейших взрывчатых материалов.....	116
--	-----

Раздел 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ 136

<i>Гарифуллин Р.Ш., Быстрова А.И.</i> Перспективный энергосыщенный материал для газодинамического воздействия на нефтяной пласт.....	136
<i>Мухутдинов А.Р., Гарифуллин Р.Ш., Вахидова З.Р.</i> Апробация универсального вычислительного экспресс-метода разработки нейросетевой модели на определении оптимальных эксплуатационных параметров специального изделия	144

Раздел 5. ЭКОЛОГИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ ВЕДЕНИИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ 153

<i>Кантор В.Х.</i> Особенности определения безопасных расстояний по разлету кусков горных пород при взрывных работах	153
<i>Стрелецкий А.А., Кубрин С.С.</i> Структурная схема мониторинга и прогнозирования распространения аэрозолей после взрывов на угледобывающих предприятиях	170
<i>Шляпин А.В., Белоусов Ф.С., Голубев Ф.М.</i> Исследование приповерхностного грунтового массива на предмет обнаружения зон потенциальных провалов.....	180

Раздел 6. ИНФОРМАЦИЯ 199

<i>Болотова Ю.Н.</i> Участие научного совета РАН по проблемам «Народнохозяйственного использования взрывов» в решении комплексных научно-технических программ развития ябуровзрывного комплекса страны	199
<i>Взрыв – это искусство!</i>	217

СОДЕРЖАНИЕ 221

*Солодухин Е.С., Шушпанов А.Н., Акинин Н.И.,
Франтов А.Е., Лапиков И.Н.*

ПРЕИМУЩЕСТВА ПРИМЕНЕНИЯ БИОДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА В КАЧЕСТВЕ ГОРЮЧЕГО КОМПОНЕНТА ПРОСТЕЙШИХ ВЗРЫВЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье рассмотрены новые модельные системы смесей аммиачной селитры и биодизельного топлива. Описан процесс синтеза биодизельного топлива путем проведения реакции переэтерификации с этиловым спиртом. Методом хромато-масс-спектрологии проведена оценка чистоты синтезированного из рапсового масла биодизельного топлива. На основе проведенного исследования краевых углов смачивания в статье дана оценка адсорбционного сродства различных видов горючего к аммиачной селитре. Проведен анализ термической устойчивости как образцов горючего, так и их смесей с аммиачной селитрой, на основе чего сделан вывод о пожаровзрывоопасности полученных составов.

Ключевые слова: биодизельное топливо, переэтерификация, рапс, аммиачная селитра, АСДТ, взрывчатые вещества, гранулит, дифференциальный термический анализ, адсорбция.

В последние десятилетия глобальные проблемы, связанные с нестабильностью рынка нефти, ограниченностью ее количества как невозобновляемого ресурса, а также с масштабными климатическими изменениями стали основными стимулами развития альтернативных видов топлива [1]. Эти альтернативные виды топлива должны быть экологически устойчивыми, возобновляемыми, нетоксичными, экономичными и углеродно-нейтральными. Биотопливо соответствует представленным требованиям и в перспективе может стать заменой ископаемых видов топлива.

Биодизельным топливом в настоящее время называется дизельное топливо, состоящее из алкиловых эфиров (по большей части метиловых, этиловых и пропиловых) длинноцепочечных жирных кислот. Основным сырьем для получения биодизеля являются масличные культуры (рапс, соя, пальмы и подсолнечник) [2]. Само растительное масло также возможно использовать в качестве топлива для дизельных двигателей, однако его основной недостаток – чрезмерно высокая вязкость, превышающая вязкость минеральных масел в 10–20 раз [3].

Переэтерификация растительных масел первичными спиртами в присутствии алкоксидов калия и натрия или их гидроксидов, а также серной и фосфорной кислот в качестве катализаторов позволяет значительно снизить вязкость получаемого биотоплива за счет преобразования разветвленной структуры молекул биомасел в молекулы меньшего размера с линейной структурой [4]. Хотя реакции переэтерификации при кислотном и основном катализе не отличаются по механизму своего протекания, они значительно отличаются по скорости реакции: скорость реакции с основным катализатором многократно больше за счет более быстрого растворения щелочи в спирте. Еще одно важное преимущество основного катализа состоит в меньшем коррозионном воздействии. Кислотные катализаторы рационально использовать при значительном загрязнении исходного сы-

рья водой [5]. Для предотвращения нежелательной реакции омыления между основным катализатором и свободными жирными кислотами реакцию в его присутствии разделяют на две стадии: саму переэтерификацию и нейтрализацию щелочи кислотой.

Основными преимуществами биодизельного топлива являются его более высокая температура вспышки (около 150 °С) по сравнению с ископаемым дизельным топливом (до 55 °С) [6, 7], улучшение процесса окисления сажи для предотвращения загрязнения выхлопной системы [8] и сниженное количество выбросов оксидов азота [9]. Более того, применение смесей биодизельного и дизельного топлива до определенной концентрации биотоплива не требуют дополнительных модификаций двигателя, позволяя тем самым получить более экологичный аналог [10].

Одним из самых распространенных и широко используемых бризантных взрывчатых веществ (ВВ) остаются простейшие смеси гранулированной аммиачной селитры и дизельного топлива. В этой смеси аммиачная селитра используется в качестве окислителя и адсорбента, а топливо является горючим для ВВ. Основные преимущества этого АСДТ – низкая себестоимость и простой технологический процесс производства. АСДТ относится к классу неидеальных взрывчатых веществ, которые характеризуются пористой структурой, низкой плотностью и имеют тенденцию к разделению молекул окислителя и топлива, ввиду чего они могут формировать отдельные фазы веществ. Эти особенности, впрочем, становятся причиной относительно низкой скорости детонации неидеальных ВВ, которая, в свою очередь, может приводить к прерыванию или даже отказу детонации [11]. С целью решения данной проблемы на протяжении долгого времени велись разработки добавок для АСДТ, в основном сфокусированные на замене дизельного топлива в составе АСДТ на другие виды топлива [12].

Производство промышленных взрывчатых веществ в России находится на уровне 2000-2300 тыс. тонн, из них эмульсий и смесей АСДТ (гранулитов) производится порядка 90% от общего объема [13]. В качестве основного горючего компонента в рецептуре гранулитов используют углеводородные соединения, вещества, основной частью которых является углерод или углеродосодержащие материалы [14-17]. Промышленными видами указанных материалов являются дизельные топлива, минеральные масла, отработанные нефтепродукты, угольный порошок, резиновый гранулят, коксовая мелочь и другие. В состав горючих компонентов гранулитов входит сера, причем в зависимости от вида топлива содержание серы составляет от 10 мг/кг до 4,5%.

В атмосфере сера присутствует в виде диоксида серы (SO_2), проявляющегося в газообразной форме сероводорода (H_2S) и проявляющегося в виде конденсата сульфатного иона SO_4^{+2} [18]. Диоксид серы окисляясь до SO_3 и взаимодействуя с атмосферной влагой, образует серную кислоту, что приводит к усилению воздействия на окружающую среду. Снижение эмиссии газообразных соединений серы является мероприятием повышения техногенной безопасности взрывных работ в горнодобывающих отраслях промышленности.

Другим аспектом экологической опасности массового применения АСДТ является образование значительного количества оксидов азота (NO , NO_x) и моно-

оксида углерода (СО). Основными факторами, определяющими количество образующихся загрязняющих веществ, являются рецептурный состав, качество исходных сырьевых компонентов, степень смешения компонентов ВВ, плотность заряда, обводненность заряда, влияние окружающих заряд горных пород, размеры и величина зазоров в заряжаемом объеме и ряд других параметров [19]. Для снижения выбросов оксидов азота и монооксида углерода на этапе рецептуры требуется применение стехиометрического количества окислителя и горючего, при котором кислородный баланс смеси равен нулю, поскольку отрицательный кислородный баланс приводит к неполному окислению углерода до монооксида, а положительный – к окислению азота до оксидов [20]. Зачастую нарушение стехиометрического состава ВВ на основе гранулированной аммиачной селитры обусловлено расслоением смесей. На практике это проявляется в том, что верхняя часть заряда смеси АСДТ имеет недостаток горючего (положительный кислородный баланс) и взрывается с повышением выхода ядовитых оксидов азота, а нижняя часть заряда – избыток горючего (отрицательный кислородный баланс) с повышенным выделением ядовитых оксидов углерода [21]. В данном случае наличие в составе горючего кислорода может компенсировать этот эффект, снизив тем самым газовую вредность ВВ и повысив его эффективность.

Проведенные исследования бикомпонентных смесей аммиачной селитры и биодизельного топлива показали, что детонационные параметры практически не отличаются от аналогичных для стандартных смесей АСДТ [12]. Кроме того, аналогичные результаты показало применение биодизельного топлива в эмульсионных взрывчатых веществах на основе аммиачной селитры: скорость детонации и бризантность практически не изменилась, но была значительно улучшена термическая стабильность взрывчатого вещества [22].

К ключевым недостаткам биодизельного топлива относят его склонность к кристаллизации при низких температурах, что приводит к значительному снижению его эффективности. Образование кристаллов начинается при температуре помутнения топлива и продолжается при дальнейшем понижении температуры вплоть до достижения температуры застывания, после которой свободное движение горючего как жидкости полностью прекращается [23]. Между этими двумя температурными параметрами находится также предельная температура фильтруемости, позволяющая оценить условия, при которых возможно применение биодизельного топлива без угрозы закупоривания фильтра [24]. Описанные температурные параметры в значительной части зависят от содержания насыщенных жирных кислот: чем их массовая доля больше, тем биотопливо менее устойчиво к воздействию низких температур [25].

Из вышесказанного следует, что одним из способов улучшения свойств биодизельного топлива при необходимости его применения при низких температурах может стать увеличение содержания ненасыщенных жирных кислот. Это может быть достигнуто как использованием сырья с большим содержанием ненасыщенных жирных кислот, так и добавлением к полученному биодизелю различных депрессорных присадок и его смешение с дизельным топливом (диметиллазелат, триацетин, полиметилакрилат и др.) [26, 27]. Однако нужно принимать во внимание, что ненасыщенные жирные кислоты химически не слишком стойки

и могут окисляться, вследствие чего могут требоваться антиоксидантные добавки [28]. В качестве еще одного способа улучшения эффективности биодизельного топлива при низких температурах можно назвать проведение процесса винтеризации. Данный процесс заключается в охлаждении топлива ниже температуры помутнения и отделения образовавшейся твердой фазы. Полученная таким образом жидкая фаза биотоплива будет иметь более низкую температуру помутнения и, как следствие, более устойчива к низким температурам [29]. Описанные способы улучшения морозостойкости также применимы к дизельному топливу на основе ископаемой нефти.

Примечательно, что обратная ситуация характерна для сырья, полученного из водорослей *Fucus vesiculosus* и *Laminaria digitata*. При проведении пиролиза водорослей в инертной атмосфере азота происходит образование крайне легколетучей жидкой органической фазы, пригодной для синтеза биодизельного топлива, испарение которой происходит при температуре ниже 100 °С. При этом проведение переэтерификации позволяет лишь незначительно повысить температуру кипения полученного биодизельного топлива относительно первичного пиролизата [30]. Однако данная особенность также позволяет предположить наличие наилучших морозостойких свойств у биодизельного топлива, полученного из водорослей, для его потенциального применения в условиях арктического климата.

Целью проведенной работы являлось изучение адсорбционной способности аммиачной селитры по отношению к различным видам горючего, определяющей устойчивость полученных смесей ВВ к расслоению окислителя и горючего. Также был проведен дифференциальный термический анализ образцов горючего и смесевых ВВ на основе дизельного и биодизельного топлива.

В качестве сравнительного образца горючего для ВВ использовалось зимнее дизельное топливо, на основе которого была приготовлена смесь с пористой аммиачной селитрой (АО «ЕвроХим», Россия).

Синтез биодизельного топлива проводился непосредственно научной группой. В качестве сырья использовалось рапсовое масло (ООО «РУСЬЭКО», Россия), которое смешивалось с водным раствором этилового спирта в объемном соотношении 1:2. Полученная смесь перемешивалась в течение двух часов в присутствии основного катализатора (гидроксида калия в количестве 3 масс. %) при 50 °С. Далее смесь нейтрализовалась соляной кислотой для предотвращения протекания реакций омыления с щелочью, а остатки спирта и воды выпаривались. При дальнейшем расслоении фаз более тяжелая фракция побочных продуктов образует нижний слой, вследствие чего удалось отделить чистое биодизельное топливо, представленное смесью этиловых эфиров различных жирных кислот. Примененный процесс синтеза характеризуется технологической простотой, ввиду чего несложным образом может быть масштабирован до уровня промышленного производства.

Состав полученного биодизельного топлива был проанализирован методом хромато-масс-спектрологии в центре коллективного пользования РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Для определения сродства различных видов горючего по отношению к аммиачной селитре был проведен анализ их краевых углов смачивания по отношению к различным поверхностям: неполярному политетрафторэтилену и полярному стеклу. Исследование проводилось на приборе для измерения краевого угла DSA25 (KRUSS, Германия) на кафедре коллоидной химии РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Пожаровзрывоопасные свойства смеси аммиачной селитры и синтезированного биодизельного топлива были оценены на основе результатов дифференциального термического анализа (ДТА). ДТА проводился параллельно с термогравиметрическим анализом на дериватографе при скорости нагревания $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ в окислительной атмосфере (воздух) в диапазоне температур от температуры помещения ($23\text{ }^{\circ}\text{C}$) до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. В качестве эталонного инертного образца использовался оксид алюминия.

Результаты хромато-масс-спектрографии (рис. 1) позволили установить превалирование в составе синтезированного биодизельного топлива этиловых эфиров линолевой и олеиновой кислот. Также в исследованном образце представлены незначительные количества этиловых эфиров других жирных кислот, входящих в состав рапсового масла (табл. 1), не оказывающие существенного влияния на свойства биодизельного топлива. Особо следует отметить отсутствие в продуктах серы и её соединений (сероводорода и меркаптанов), что выделяет полученный состав как с точки зрения его экологичности ввиду невозможности образования токсичных оксидов серы, так и с точки зрения эксплуатационных свойств, поскольку соединения серы могут способствовать коррозии материалов. Данная особенность выделяет полученное биотопливо не только на фоне ископаемой нефти, но и на фоне значительного количества серосодержащего органического сырья для биодизельного топлива, в том числе в пиролизных маслах.

Краевые углы смачивания относительно тефлоновой подложки для ископаемого дизельного топлива (рис. 2а) составили 27° и 25° , что говорит о хорошей смачивающей способности жидкости. Схожие значения были получены для биодизельного топлива на тефлоновой подложке (рис. 2б): контактные углы капли составили 22° и 32° . Аналогичный эксперимент с подложкой из стекла приводит к полному растеканию капли, при котором она формирует пленку, а контактный угол стремится к нулю. Это позволяет предположить, что, несмотря на различие в полярности углеводородов в ископаемом дизельном топливе и сложных эфиров в биодизельном топливе, исследуемые образцы не имеют значительных отличий в адсорбционной способности как по отношению к полярным, так и по отношению к неполярным поверхностям, и, как следствие, имеют идентичную адсорбционную способность в том числе по отношению к аммиачной селитре.

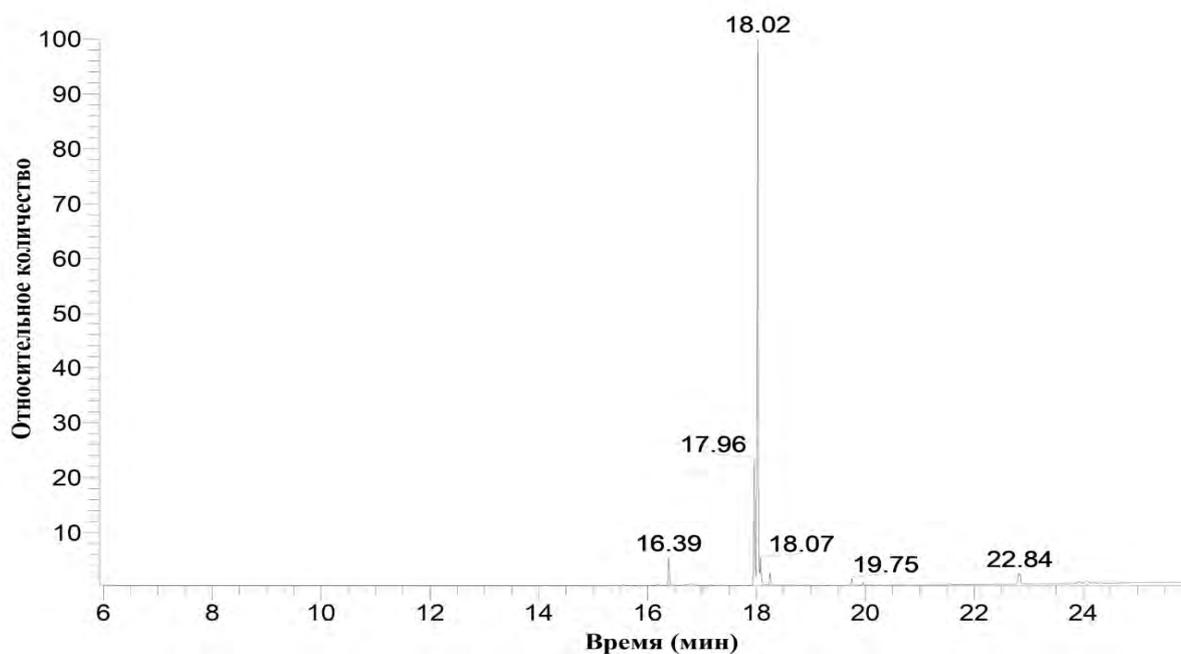


Рис. 1. Хроматограмма образца синтезированного биодизельного топлива

Таблица 1

Результаты газовой хроматографии биодизельного топлива

Соединение	Время удерживания, мин	% площади
Этиловый эфир гексадекановой кислоты	16,39	3,33
Этиловый эфир линолевой кислоты	17,96	15,18
Этиловый эфир олеиновой кислоты	18,02	69,83
Этиловый эфир элаидиновой кислоты	18,07	3,12
Этиловый эфир стеариновой кислоты	18,25	1,52
Этиловый эфир пальмитолеиновой кислоты	19,75	0,86
Этиловый эфир арахидиновой кислоты	21,55	0,28

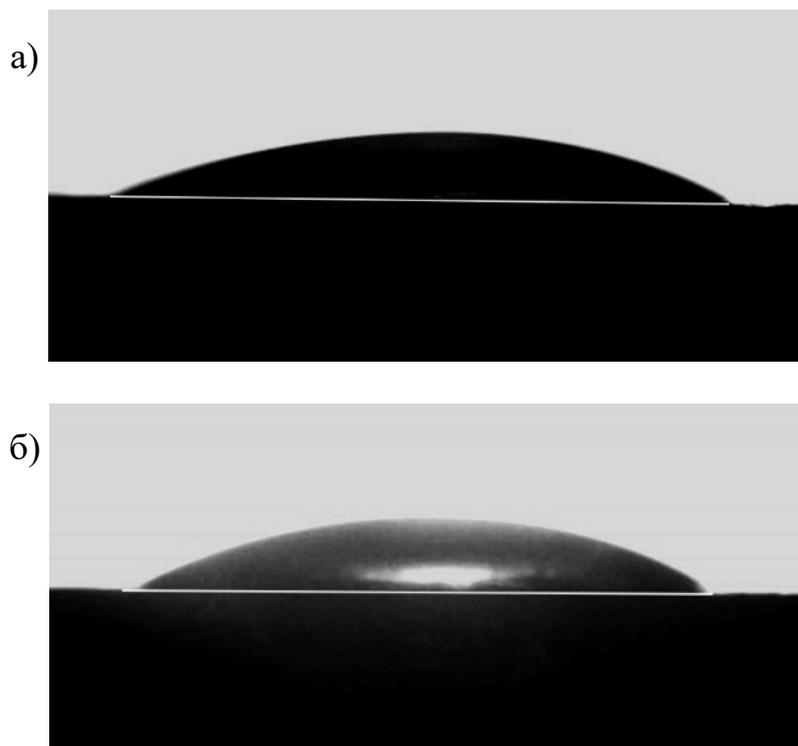


Рис. 2. Изображения краевых углов смачивания дизельного (а) и биодизельного (б) топлива на тефлоновой подложке

На рис. 3 представлены результаты ДТА различных видов горючего. Экзотермическое разложение биодизельного топлива происходит в температурном диапазоне от 250 °С до 400 °С. Значительно отличается поведение дизельного топлива на основе ископаемой нефти: образец не разлагается, а испаряется в диапазоне температуре от 130 °С до 250 °С, что сопровождается характерным эндотермическим эффектом. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что биодизельное топливо обладает лучшей термической устойчивостью. Для верификации эффективности применения биодизельного топлива в том числе в двухкомпонентных смесях нитрата аммония и горючего был проведен ДТА приготовленных смесей с соотношением окислителя и горючего 95,5 масс. % и 4,5 масс. % соответственно.

Результаты ДТА двухкомпонентных смесей аммиачной селитры и различных видов горючего (рис. 4) демонстрируют идентичное поведение обеих смесей при повышении температуры. Незначительные эндотермические пики в диапазоне температур от 50 до 200 °С характеризуют фазовые переходы селитры. При температуре 250 °С наблюдается экзотермический эффект, связанный с наиболее интенсивным разложением аммиачной селитры, который на рис. 4б перекрывается эндотермическим пиком, обусловленным дальнейшим испарением продуктов разложения селитры. Аналогичных эндотермический также наблюдается для смеси селитры и биодизельного топлива, однако находится в диапазоне более высоких температур: если пик для стандартного АСДТ совпадает с экзотермическим эффектом при 250 °С, то смесь селитры и биодизельного топлива имеет наиболее выраженный эндотермический эффект в диапазоне температур от

270 °С до 310 °С. Полученные данные согласуются с ранее полученными для промышленного биодизельного топлива на основе смеси подсолнечного и рапсового масла [31].

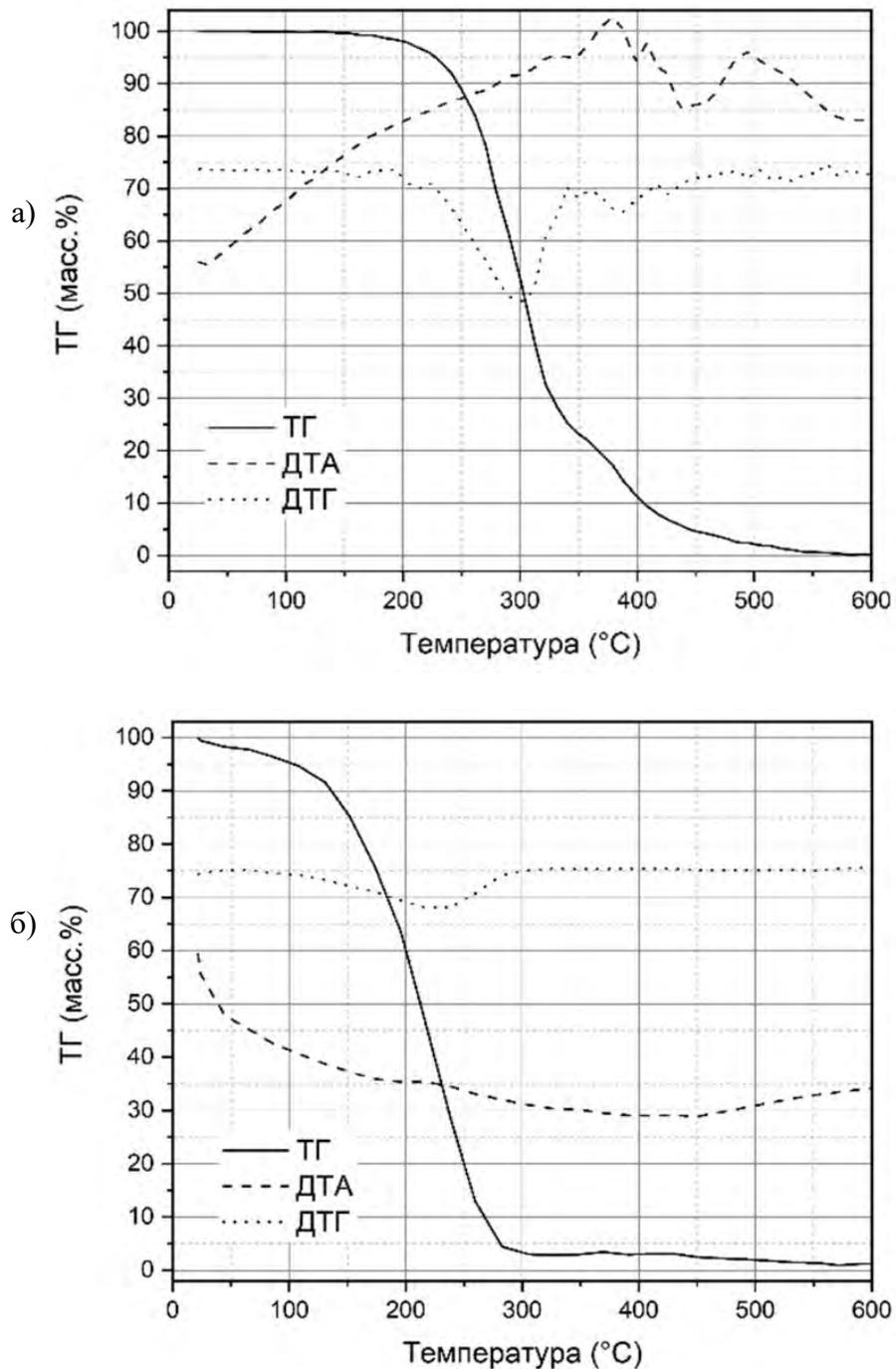


Рис. 3. Результаты дифференциального термического анализа биодизельного топлива (а) и дизельного топлива (б) (ТГ – термогравиметрия, ДТА – дифференциальный термический анализ, ДТГ – дифференциальная термогравиметрия)

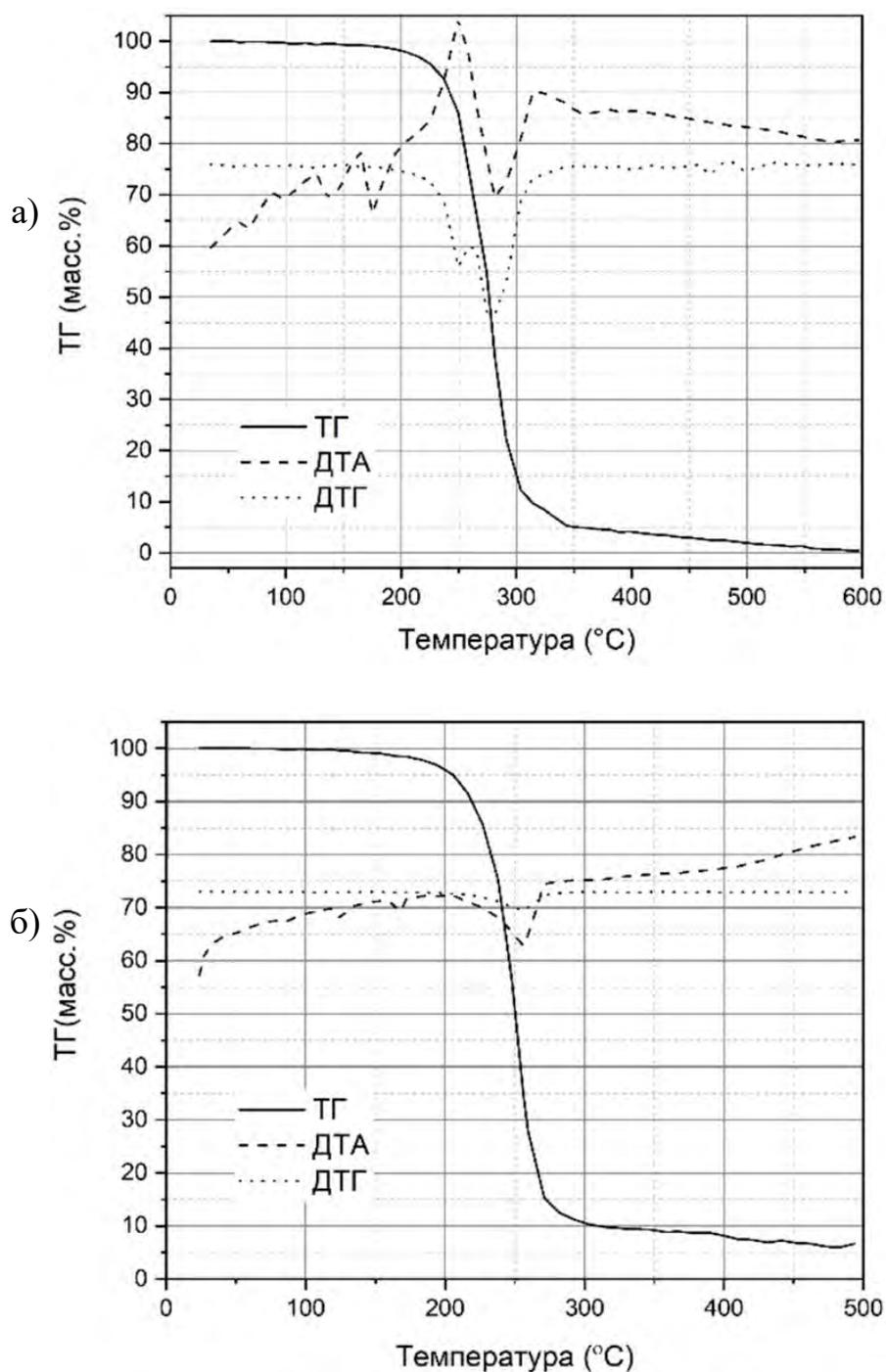


Рис. 4. Результаты дифференциального термического анализа смеси аммиачной селитры и биодизельного топлива (а) и аммиачной селитры и дизельного топлива (б)

Выводы

В результате исследования было установлено, что биодизельное и дизельное топливо не имеют существенных отличий в своих адсорбционных свойствах как по отношению к полярным, так по отношению к неполярным поверхностям, что позволяет сделать вывод о схожей смачивающей способности различных видов горючего в смесях с аммиачной селитрой.

Результаты ДТА позволили установить отличие существенных свойств смесей селитры и различных видов топлива в рамках их термического распада. В то же время чистое биодизельное топливо характеризуется лучшей термостойкостью по сравнению с ископаемым дизельным топливом, хотя и имеет существенное отличие в природе протекающих при повышенной температуре процессов: биодизельное топливо разлагается термическом воздействии, а дизельное топливо – испаряется.

На основе проведенного исследования можно выдвинуть гипотезу о возможности как полной замены ископаемого дизельного топлива в составе АСДТ на биодизельное топливо, так и применении биотоплива в качестве присадок для дизельного топлива. Дальнейшие исследования термостабильности полученных составов, а также их детонационных параметров позволят однозначно определить наиболее оптимальный состав ВВ как с точки зрения экономической целесообразности, так и с точки зрения эффективности применения.

Библиографический список

1. A.K. Das, S.K. Sahu, A.K. Panda. Current status and prospects of alternate liquid transportation fuels in compression ignition engines: A critical review // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2022. Т. 161. 112358
2. W. Senusi, M.I. Ahmad, H.P.S.A. Khalil. Comparative assessment for biodiesel production from low-cost feedstocks of third oil generation // *J. Renew. Energy*, 2024. Т. 236. 121369
3. M. Balat. Modeling Vegetable Oil Viscosity // *Energy Sources A: Recovery Util. Environ. Eff.*, 2008. Т. 30. С. 1856-1869.
4. A. Demirbas. Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections // *Energy Convers. Manag.*, 2008. Т. 49, №8. С. 2106-2116.
5. B. Maleki, S.S.A. Talesh, M. Mansouri. Comparison of catalysts types performance in the generation of sustainable biodiesel via transesterification of various oil sources: a review study // *Mater. Today Sustain.*, 2022. Т. 18. 100157.
6. Sh.M. Santos, D.C. Nascimento, M.C. Costa, A.M.B. Neto, L.V. Fregolente. Flash point prediction: Reviewing empirical models for hydrocarbons, petroleum fraction, biodiesel, and blends // *Fuel*, 2020. Т. 263. 116375.
7. ГОСТ 32511–2013 Топливо дизельное ЕВРО. Технические условия. Разработан Открытым акционерным обществом "Всероссийский научно-исследовательский институт по переработке нефти" (ОАО "ВНИИ НП"). Внесен Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии. Принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 14 ноября 2013 г. N44). Введ. 2015-01-01 Москва: Стандартинформ, 2014. 15 с.
8. Th. Jeyaseelan, P. Ekambaram, J. Subramanian, T. Shamim. A comprehensive review on the current trends, challenges and future prospects for sustainable mobility // *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2022. Т. 157. 112073.
9. R. Jayabal, S. Subramani, D. Dillikannan et al. Multi-objective optimization of performance and emission characteristics of a CRDI diesel engine fueled with sapota methyl ester/diesel blends // *Energy*, 250. Т. 250. 123709.
10. S.M. Palash, H.H. Masjuki, M.A. Kalam et al. Biodiesel production, characterization, diesel engine performance, and emission characteristics of methyl esters from *Aphanamixis polystachya* oil of Bangladesh // *Energy Convers. Manag.*, 2015. Т. 91. С. 149-157.
11. S.I. Jackson, Ch.B. Kiyanda, M. Short. Experimental observations of detonation in ammonium-nitrate-fuel-oil (ANFO) surrounded by a high-sound-speed, shockless, aluminum confiner // *Proc. Combust. Inst.* 2011. Т. 33, № 2. С. 2219-2226.

12. *M. Fabin, T. Jarosz.* Improving ANFO: Effect of Additives and Ammonium Nitrate Morphology on Detonation Parameters // *Materials (Basel)*, 2021. Т. 14, №19. 5745.
13. *Соснин В.А.* Состояние и перспективы развития промышленных взрывчатых веществ // Международная научно-техническая конференция «Промышленные взрывчатые вещества (ПВВ): состояние, перспективы разработки и применения» (АО «ГосНИИ Кристалл»). Нижний Новгород, 16.05.2023 - 19.05.2023 г.
14. *Викторов С.Д., Франтов А.Е., Лапиков И.Н.* Развитие потенциала простейших взрывчатых веществ в России // *Безопасность труда в промышленности*, 2021. № 8. С. 7-14.
15. *Викторов С. Д., Франтов А. Е., Лапиков И. Н.* Результаты сравнительных испытаний гранулитов разного рецептурного состава // *Горный журнал*, 2022. №7, С. 65-71.
16. *A. E. Frantov and I. N. Lapikov.* Evaluation of technological parameters of cheap explosives' components in terms of using in northern and arctic regions of Russia // *AIP Conf. Proc.*, 2022. 2656. 020009.
17. *A. E. Frantov, S. D. Viktorov, I. N. Lapikov.* Comparison of oil products as components of granulites for Siberia, extreme north and the Arctic areas // *Eurasian Mining*, 2023. № 2. С. 70-75.
18. *Мальшиев Ю. Н. А.Т. Айруни, Е.Ю. Куликова.* Физико-химические процессы при добыче полезных ископаемых и их влияние на состояние окружающей среды // Москва: Академия горных наук, 2002. – 270 с.
19. *Булушев Д.А., Султанов Е.В., Акинин Н.И., Смирнов С.П.* Снижение экологического вреда от применения аммиачно-селитренных промышленных взрывчатых веществ // *Взрывное дело*, 2023. № 141/98. С. 168-184.
20. *Султанов Е.В., Булушев Д.А., Акинин Н.И., Смирнов С.П.* Количественное определение оксидов азота (II) в продуктах взрыва модельных промышленных составов на основе нитрата аммония // *Успехи в химии и химической технологии*, 2022. Т. 36, № 10. С. 124-128.
21. *Белин В.А., Парамонов Г.П., Жимьян Ж.* Особенности изготовления и применения смесевых взрывчатых веществ типа АСДТ на горных предприятиях Монголии // *Записки Горного института*, 2018. Т. 232. С. 364-367.
22. *H. Li., Ce Yang, J. Sun, Y. Cheng.* Effects of biodiesel on thermal safety and detonation characteristics of emulsion explosive // *Propellants, Explos. Pyrotech.*, 2023. Т. 48, № 5. e202200258.
23. *Sh.M. Santos, M.R. Wolf-Maciel, L.V. Fregolente.* Cold flow properties: Applying exploratory analyses and assessing predictive methods for biodiesel and diesel-biodiesel blends // *Sustain. Energy Technol. Assess.*, 2023. Т. 57. 103220.
24. ГОСТ 22254-92 Топливо дизельное. Метод определения предельной температуры фильтруемости на холодном фильтре. Подготовлен и внесен Всесоюзным научно-исследовательским институтом по переработке нефти (ВНИИ НП). Утвержден и введен в действие Постановлением Комитета стандартизации и метрологии СССР от 03.02.92 N101. Взамен ГОСТ 22254-76; введ. 1993-01-01. Комитет по стандартизации и метрологии СССР; Москва: 1992. 15 с.
25. *A. Bouaid, N. El boulifi, K. Nahati, M. Martinez, J. Aracil.* Biodiesel production from biobutanol. Improvement of cold flow properties // *Chem. Eng. J.*, 2014. Т. 238. С. 234-241.
26. *P.A. Leggieri, M. Senra, L. Soh.* Cloud point and crystallization in fatty acid ethyl ester biodiesel mixtures with and without additives // *Fuel*, 2018. Т. 222. С. 243-249.
27. *I.M. Monirul, M.A. Kalam, H.H. Masjuki et al.* Influence of poly(methyl acrylate) additive on cold flow properties of coconut biodiesel blends and exhaust gas emissions // *Renew. Energ.*, 2017. Т. 101. С. 702-712.
28. *A.K.F. Achmad, N.A. Fathurrahman, E. S. Kunarti et al.* Optimizing cold-flow properties and oxidation stability of B40 biodiesel blend with turpentine oil and ethanol: Experimental and quantum chemical approach // *Fuel*, 2025. Т. 381. 133258.
29. *H. Tajima, M. Abe, H. Komatsu, K. Yamagiwa.* Feasibility of additive winterization of biodiesel fuel derived from various eatable oils and fat // *Fuel*, 2021. Т. 305. 121479.
30. *Солодухин Е.С., Шушпанов А.Н., Шушпанова Д.В.* Термический анализ биотоплив из растительных материалов в сравнении с ископаемым дизелем // *Образование и наука для*

устойчивого развития: XVI Международная научно-практическая конференция: материалы конференции: в 2 ч. Т. 1. С. 238–241.

31. *Акинин Н.И., Шушпанов А.Н., Солодухин Е.С., Франтов А.Е.*. Свойства биодизельного топлива на основе растительного сырья и возможность его применения в промышленных взрывчатых веществах // XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии, 7-12 октября, 2024, Федеральная территория Сириус, Россия. Сборник тезисов докладов в 7 томах. – Т. 6. – М.: ООО «Адмирал Принт», 2024. – С. 328–328.

Информация об авторах

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева» (Москва, Россия):

Солодухин Е.С., старший лаборант, аспирант кафедры «Техносферная безопасность»,
e-mail: 220047@mustr.ru

Шушпанов А.Н., доцент кафедры «Техносферная безопасность»,
канд. техн. наук

Акинин Н.И., зав. кафедрой «Техносферная безопасность»,
проф., д-р техн. наук.

ИПКОН РАН (Москва, Россия):

Франтов А.Е., ведущий научный сотрудник, д-р техн. наук,

Лапиков И.Н., старший научный сотрудник, канд. техн. наук.

UDC 662.756.3 + 622.235

*Solodukhin E.S., Shushpanov A.N., Akinin N.I.,
Frantov A.E., Lapikov I.N.*

THE ADVANTAGES OF BIODIESEL USAGE AS A FUEL COMPONENT IN SIMPLE EXPLOSIVES

The article discusses new modular systems of mixtures of ammonium nitrate and biodiesel. The process of synthesis of biodiesel fuel by transesterification reaction with ethyl alcohol in the presence of the basic catalyst is described. The purity of synthesized from rapeseed oil biodiesel fuel, which is a mixture of fatty acid esters, was evaluated via chromato-mass spectroscopy. Based on the conducted study of contact angles, the article evaluates the adsorption affinity of various types of fuels to polar and non-polar surfaces, from which a conclusion is formulated about the adsorption affinity of various types of fuels in relation to ammonium nitrate. The method of differential thermal analysis was utilized to assess the thermal stability of both samples of the fuel itself and their mixtures with ammonium nitrate, on the basis of which a conclusion was made about the fire and explosion hazard of the obtained compositions.

Keywords: biodiesel, transesterification, rapeseed, ammonium nitrate, ANFO, explosives, granulit, differential thermal analysis, adsorption.

References

1. A.K. Das, S.K. Sahu, A.K. Panda. Current status and prospects of alternate liquid transportation fuels in compression ignition engines: A critical review // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2022. Vol. 161. 112358
2. W. Senusi, M.I. Ahmad, H.P.S.A. Khalil. Comparative assessment for biodiesel production from low-cost feedstocks of third oil generation // *J. Renew. Energy*, 2024. Vol. 236. 121369
3. M. Balat. Modeling Vegetable Oil Viscosity // *Energy Sources A: Recovery Util. Environ. Eff.*, 2008. Vol. 30. pp. 1856-1869.
4. A. Demirbas. Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections // *Energy Convers. Manag.*, 2008. Vol. 49, №8. pp. 2106-2116.
5. B. Maleki, S.S.A. Talesh, M. Mansouri. Comparison of catalysts types performance in the generation of sustainable biodiesel via transesterification of various oil sources: a review study // *Mater. Today Sustain.*, 2022. Vol. 18. 100157.
6. Sh.M. Santos, D.C. Nascimento, M.C. Costa, A.M.B. Neto, L.V. Fregolente. Flash point prediction: Reviewing empirical models for hydrocarbons, petroleum fraction, biodiesel, and blends // *Fuel*, 2020. Vol. 263. 116375.
7. GOST 32511–2013 Diesel fuel EURO. Technical conditions. Developed by Open joint-stock company " All-Russian Scientific Research Institute for Oil Refining " ("VNII NP" OAO). Proposed by the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. Approved by the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (protocol from November 14, 2013 N44). Put in force 2015-01-01 Moscow: Standartinform, 2014. 15 p.
8. Th. Jeyaseelan, P. Ekambaram, J. Subramanian, T. Shamim. A comprehensive review on the current trends, challenges and future prospects for sustainable mobility // *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2022. Vol. 157. 112073.

9. *R. Jayabal, S. Subramani, D. Dillikannan et al.* Multi-objective optimization of performance and emission characteristics of a CRDI diesel engine fueled with sapota methyl ester/diesel blends // *Energy*, 250. Vol. 250. 123709.
10. *S.M. Palash, H.H. Masjuki, M.A. Kalam et al.* Biodiesel production, characterization, diesel engine performance, and emission characteristics of methyl esters from *Aphanamixis polystachya* oil of Bangladesh // *Energy Convers. Manag.*, 2015. Vol. 91. pp. 149-157.
11. *S.I. Jackson, Ch.B. Kiyanda, M. Short.* Experimental observations of detonation in ammonium-nitrate-fuel-oil (ANFO) surrounded by a high-sound-speed, shockless, aluminum confiner // *Proc. Combust. Inst.* 2011. Vol. 33, № 2. pp. 2219-2226.
12. *M. Fabin, T. Jarosz.* Improving ANFO: Effect of Additives and Ammonium Nitrate Morphology on Detonation Parameters // *Materials (Basel)*, 2021. Vol. 14, №19. 5745.
13. *Sosnin V.A.* The state and prospects of development of industrial explosives // International Scientific and Technical Conference "Industrial explosives: state, prospects of development and application" (JSC «GosNII Krystall»). Nizhniy Novgorod, 16.05.2023 - 19.05.2023.
14. *Viktorov S.D., Frantov A.E., Lapikov I.N.* Development of the potential of the simplest explosives in Russia // *Occupational Safety in Industry*, 2021. № 8. pp. 7-14.
15. *Viktorov S.D., Frantov A.E., Lapikov I.N.* The results of comparative tests of granulated explosives of different formulation composition // *Gornyi Zhurnal*, 2022. №7, pp. 65-71.
16. *Frantov A. E., Lapikov I. N.* Evaluation of technological parameters of cheap explosives' components in terms of using in northern and arctic regions of Russia // *AIP Conf. Proc.*, 2022. 2656. 020009.
17. *Frantov A. E., Viktorov S. D., Lapikov I. N.* Comparison of oil products as components of granulites for Siberia, extreme north and the Arctic areas // *Eurasian Mining*, 2023. № 2. pp. 70-75.
18. *Malyshev Y. N., Ayruni A.T., Kulikova E.Y.* Physico-chemical processes in the extraction of minerals and their impact on the environment // Moscow: Academy of Mining Sciences, 2002. – 270 p.
19. *Bulushev D.A., Sultanov E.V., Akinin N.I., Smirnov S.P.* the environmental harm mitigation from application of ammonium nitrate industrial explosives // *Vzryvnoe delo (Explosion Technology)*, 2023. № 141/98. pp. 168-184.
20. *Sultanov E.V., Bulushev D.A., Akinin N.I., Smirnov S.P.* quantitative determination of nitrogen oxides (II) content in explosion debris of model industrial explosive charges based on ammonium nitrate // *Uspehy himii i himicheskoy tehnologii (Advances in Chemistry and Chemical Technology)*, 2022. Vol. 36, № 10. pp. 124-128.
21. *Belin V.A., Paramonov G.P., Zhimyan Z.* Peculiarities of manufacturing and application of mixed explosives of ANFO type at mining enterprises of Mongolia // *Journal of Mining Institute*, 2018. Vol. 232. pp. 364-367.
22. *H. Li., Ce Yang, J. Sun, Y. Cheng.* Effects of biodiesel on thermal safety and detonation characteristics of emulsion explosive // *Propellants, Explos. Pyrotech.*, 2023. Vol. 48, № 5. e202200258.
23. *Sh.M. Santos, M.R. Wolf-Maciel, L.V. Fregolente.* Cold flow properties: Applying exploratory analyses and assessing predictive methods for biodiesel and diesel-biodiesel blends // *Sustain. Energy Technol. Assess.*, 2023. Vol. 57. 103220.
24. GOST 22254-92 Diesel fuels. Cold filter method for determination of lowest filtering temperature. Developed and proposed by All-Union Scientific Research Institute for Oil Refining (VNII NP). Approved and put in force by the Resolution of the Committee for Standardization and Metrology of the USSR from 03.02.92 N101. Instead of GOST 22254-76; introduced 1993-01-01. Committee for Standardization and Metrology of the USSR; Moscow: 1992. 15 p.
25. *A. Bouaid, N. El boulifi, K. Hahati, M. Martinez, J. Aracil.* Biodiesel production from biobutanol. Improvement of cold flow properties // *Chem. Eng. J.*, 2014. Vol. 238. pp. 234-241.
26. *P.A. Leggieri, M. Senra, L. Soh.* Cloud point and crystallization in fatty acid ethyl ester biodiesel mixtures with and without additives // *Fuel*, 2018. Vol. 222. pp. 243-249.
27. *I.M. Monirul, M.A. Kalam, H.H. Masjuki et al.* Influence of poly(methyl acrylate) additive on cold flow properties of coconut biodiesel blends and exhaust gas emissions // *Renew. Energ.*, 2017. Vol. 101. pp. 702-712.

28. *A.K.F. Achmad, N.A. Fathurrahman, E. S. Kunarti et al.* Optimizing cold-flow properties and oxidation stability of B40 biodiesel blend with turpentine oil and ethanol: Experimental and quantum chemical approach // *Fuel*, 2025. Vol. 381. 133258.

29. *H. Tajima, M. Abe, H. Komatsu, K. Yamagiwa.* Feasibility of additive winterization of biodiesel fuel derived from various eatable oils and fat // *Fuel*, 2021. Vol. 305. 121479.

30. *Solodukhin E.S., Shushpanov A.N., Shushpanova D.V.* Thermal analysis of biofuels from plant materials in comparison with fossil biodiesel // *Education and science for sustainable development: XVI International Scientific and Practical Conference: conference materials: in 2 parts.* Vol. 1. pp. 238–241.

31. *Akinin N.I., Shushpanov A.N., Solodukhin E.S., Frantov A.E.* Properties of the plants derived biodiesel and the possibility of its application in the industrial explosives // *XXII Mendeleev congress on general and applied chemistry, 7-12.10.2024, Federal Territory “Sirius”, Russia. Book of abstracts in 7 volumes.* – Vol. 6. – M.: “Admiral Print” LLC, 2024 – pp. 328–328.

Information about authors

FSFEI HE «Mendeleev University of Chemical Technology of Russia»

(Moscow, Russia):

Solodukhin E.S., senior laboratory assistant, PhD student of Technosphere Safety department, e-mail: 220047@muctr.ru,

Shushpanov A.N., assistant professor of Technosphere Safety department, Ph.D. of Engineering Sciences,

Akinin N.I., head of Technosphere Safety department, Prof., Doctor of Engineering Sciences.

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences – IPKON RAS (Moscow, Russia):

Frantov A.E., Leading Researcher, Doctor of Engineering Sciences,

Lapikov I.N., Senior Researcher, Ph.D. of Engineering Sciences.