

МЕТОД СУБТЕРАГЕРЦОВОЙ ГАЗОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ЭНЕРГОЁМККИХ СОЕДИНЕНИЙ

Анфертьев Владимир Алексеевич (anfertev@ipmras.ru)¹, Вакс Владимир Лейбович¹, Шейков Юрий Валентинович², Лукьяненко Илья Александрович²

¹ИФМ РАН г. Нижний Новгород

²ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В работе представлены методы нестационарной газовой спектроскопии высокого разрешения и спектрометры на их основе. Рассмотрены практические применения данного метода для аналитических приложений.

Ключевые слова: суб-терагерцовая спектроскопия высокого разрешения, спектр поглощения, энергоёмкие соединения.

METHOD OF HIGH RESOLUTION SUBTERAHERTZ SPECTROSCOPY TO STUDY THERMAL DECOMPOSITION OF ENERGETIC COMPOUNDS

Anfertev Vladimir Alexeevich (anfertev@ipmras.ru)¹, Vaks Vladimir Leibovich¹, Sheykov Yuri Valentinovich², Lukyanenko Ilya Alexandrovich²

¹IPMRAS, Nizhny Novgorod

²FSUE «RFNC-VNIEF», Sarov, Nizhny Novgorod region

Methods of high resolution non-stationary gas spectroscopy as well as the spectrometers based on them are described in the paper. Practical implementation of the method in analytical applications is considered.

Keywords: high resolution sub-terahertz spectroscopy, absorption spectrum, energetic compounds.

Введение

В настоящее время во всем мире ведутся разработки по созданию методик применения излучения терагерцового (ТГц) и субтерагерцового (субТГц) частотных диапазонов для задач различных приложений: систем безопасности, медицины и биологии. Связано это, прежде всего, с тем, что в этом диапазоне лежат наиболее сильные линии вращательного спектра поглощения многих веществ (например, вода, аммиак, спирты, альдегиды). Кроме того, ТГц и субТГц излучение не является ионизирующим и, следовательно, опасным для биологических объектов, как часто используемое рентгеновское, что дает возможность использовать его *in vivo*.

Перспективным подходом для исследования многокомпонентных газовых смесей является моле-

кулярная спектроскопия поглощения, в частности нестационарная спектроскопия субТГц частотного диапазона. По характерным линиям поглощения в спектрах, полученных при прохождении излучения через газообразный образец, можно идентифицировать вещества, входящие в состав исследуемой многокомпонентной газовой смеси. В частности, могут быть выявлены вещества-маркеры, характеризующие энергоёмкие соединения, потенциальные маркеры патологического состояния биологических образцов, маркеры заражения грибковыми заболеваниями различных сельскохозяйственных культур, маркеры изменения состояния при естественном разложении продуктов питания и т. д.

Исследование образцов, последовательно взятых в течение какого-либо временного интервала, способно помочь отследить динамику происходящих

процессов (протекания заболевания, естественного разложения веществ или протекания других химических реакций).

Методы и подходы

В работе представлен развиваемый в ИФМ РАН метод суб-терагерцовой газовой нестационарной спектроскопии высокого разрешения. Спектрометры, реализующие этот метод и работающие в режиме фазовой манипуляции воздействующего на газ излучения, а также в режиме быстрого прохождения частоты, обеспечивают одновременное достижение высокой чувствительности и разрешающей способности, ограниченной лишь доплер-эффектом.

Применение методов нестационарной микроволновой спектроскопии и компонентов полупроводниковой электроники позволило реализовать спектрометры ТГц диапазона, работающие в режиме фазовой манипуляции частоты и в режиме быстрого свипирования по частоте [1]. В результате взаимодействия фазоманипулированного излучения с резонансно поглощающими молекулами происходит периодически процесс наведения и распада макроскопической поляризации молекул. Этот процесс можно представить как включение импульсного сигнала на частоте молекулярного резонанса и возникновение поглощения излучения молекулами, после чего переключается фаза (или частота) сигнала, и происходит релаксация поляризации молекул. Возникающие в результате этого переходные сигналы регистрируются и накапливаются в приемной части спектрометра. По величине и форме этих сигналов можно оценить концентрацию исследуемых компонент газовой смеси.

Для анализа многокомпонентных газовых смесей в субТГц спектрометрах необходимо использовать источники синтезированных сигналов и высокочувствительные приемники. Для обеспечения требований спектроскопии высокого разрешения точность установки мгновенных значений частоты источника излучения для режима фазовой манипуляции должна быть не хуже 10^{-8} относительно центральной частоты излучения. Подобная точность достигается за счет использования фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) источника излучения по высокостабильному опорному синтезатору частоты, что позволяет реализовать спектральное разрешение на уровне 10 кГц, необходимое для однозначной регистрации и идентификации линий поглощения многих газов с высоким разрешением.

В качестве источника излучения в спектрометре используется лампа обратной волны (ЛОВ). Питание ЛОВ осуществляется при помощи высоковольтного источника напряжения, величина которого определяет частоту генерации. Сигнал ЛОВ проходит через ячейку, содержащую исследуемый газ и регистрируется детектором на основе диода Шоттки. Далее в приемном блоке протектированный сигнал усиливается и преобразуется в цифровую форму в ана-

лого-цифровом преобразователе (АЦП). Для выделения слабых спектроскопических сигналов на фоне шумов используется специально разработанный для этой цели цифровой накопитель, осуществляющий суммирование и усреднение в режиме реального времени поступающих на его вход сигналов.

Для спектрометра, работающего в режиме быстрого свипирования по частоте, точность мгновенных значений частоты источника излучения должна быть не хуже 10^{-6} , что достигается с помощью системы ФАПЧ. Управление и подстройка частоты ЛОВ осуществляется по фазе высокостабильного опорного синтезатора частоты, причем синтезатор формирует сигнал с линейной частотной модуляцией. Приемная часть спектрометра включает в себя детекторный модуль и цифровой приемный блок. Детекторный модуль содержит детекторную головку с диодом Шоттки, малошумящий предварительный усилитель с цепью подачи смещения на детектор и фильтры. Фильтры разделяют сигналы с детектора на постоянный (пропорциональный мощности приходящего излучения) и переменный (пропорциональный отклику газа на резонансной частоте). Измерение выпрямленного постоянного напряжения на детекторе позволяет нормировать интенсивность спектральных линий без каких-либо предварительных калибровок, исключая зависимость мощности ЛОВ от частоты.

Переменный сигнал поступает на вход быстродействующего АЦП. Затем – на быстродействующий цифровой накопитель, который производит суммирование и усреднение в реальном времени спектроскопических сигналов. Далее данные передаются в компьютер, где усреднение может быть продолжено. Накопление сигналов позволяет повысить соотношение сигнал-шум и, следовательно, чувствительность спектроскопических измерений. Управление и контроль основных узлов спектрометра, а также обработку спектроскопических сигналов осуществляет встроенный компьютерный модуль.

Перспективным подходом является переход к полупроводниковой элементной базе. Спектрометры с использованием источников и приемников на полупроводниковых устройствах компактны и более дешевы по сравнению со спектрометрами на ЛОВ. Разработан и реализован спектрометр на основе генератора Ганна с умножением частоты применением умножителя на основе полупроводниковых сверхрешеток [1]. Разработана концепция спектрометра на нестационарных эффектах с использованием коммерческих синтезаторов частоты на полупроводниковых элементах. В качестве опорного источника может быть использован коммерчески доступный низкочастотный источник излучения, например, (например, «Luft Research», 9,17–14,17 ГГц) частота которого умножается с использованием умножителя, например, производства фирмы Virginia Diodes. Выходная мощность такого источника составляет десятки-сотни мВт, что более чем достаточно для проведения спектроскопических экспериментов. В каче-

стве приемного устройства может быть использован детектор на диодах Шоттки.

Высокая чувствительность и спектральное разрешение дают возможность использовать созданные спектрометры для многих приложений, в частности, для медицины системы безопасности.

Применение для различных приложений

Многокомпонентные газовые смеси независимо от происхождения могут быть исследованы с использованием методов субТГц спектроскопии высокого разрешения.

Исследование продуктов термического разложения, а также их динамики в зависимости от температуры для энергетических материалов

Исследование механизмов термического разложения энергетических материалов (ЭМ) является чрезвычайно важной задачей для прогнозирования процессов, происходящих при длительном хранении этих материалов, а также при возникновении нештатных ситуаций. Одним из важнейших моментов исследования процессов термического разложения является выявление продуктов реакций термоллиза на всех стадиях процесса. Это позволяет выявить механизмы реакций, предсказать возможные пути разложения. В дальнейшем выявленные закономерности появления тех или иных продуктов термического разложения взрывчатых веществ позволят осуществлять безопасный и надежный контроль хранения таких материалов.

Для исследования процессов термического разложения энергоемких материалов был разработан реакционный объем спектрометра субТГц диапазона частот.

Спектрометр состоит из:

- системы напуска исследуемого вещества (кварцевую колбу, которая через притертый шлиф соединяется с патрубком аналитической ячейки),

- аналитической ячейки (кварцевая труба диаметром 50 мм с двумя патрубками, один из которых предназначен для подсоединения системы напуска, а другой – для подсоединения системы вакуумирования),

- системы нагрева и датчиков температуры, обеспечивающих задаваемый и контролируемый нагрев аналитической ячейки,

- системы напуска в интервале температур от 20 °С до 300 °С как при постоянной температуре, так и при линейном нагреве.

Откачка реакционного объема до рабочего давления 0,001 мбар осуществляется с использованием вакуумной станции через систему вакуумных соединений.

Для контроля температуры использованы четыре прецизионных датчика температуры Pt-100. Три из них крепятся на аналитическую ячейку (у торцов и посередине), один – на колбу с веществом. Сигналы с датчиков поступают через интерфейс USB

в компьютер, после обработки управляющей программой результаты выводятся на экран монитора в режиме реального времени, что позволяет отслеживать изменение температуры при нагреве реакционного объема.

С использованием реализованных спектрометров высокого разрешения, работающих в режиме фазовой манипуляции воздействующего на газ излучения, а также на основе быстрого свипирования частоты, были исследованы такие энергетические материалы, как аммиачная селитра, РЕТН, ТАТВ, НМХ [2]. Наличие линий продуктов разложения в спектре считали подтвержденным в том случае, если поглощение в ее максимуме в три раза превышало стандартное отклонение фонового сигнала. Продукты идентифицировались с использованием электронных баз данных [9, 10]. Идентифицированные продукты термораспада энергоемких соединений [3–8] представлены в табл. 1.

Таблица 1

Идентифицированные продукты термораспада энергоемких соединений

Энергоемкие соединения и условия	Продукты разложения
РЕТН (до 250 °С)	NO ₂ , CH ₂ O, N ₂ O, NO, CO ₂ , CO, H ₂ O, CH ₃ OH, HNO ₂ , CH ₃ NO ₂ , (O ₂ NOCH ₂) ₃ C-CHO
РЕТН (выше 250 °С)	CO, NO, H ₂ , O ₂ , CO ₂ , H ₂ O, N ₂ , CH ₄ , H ₂ CO, NO ₂ , HCN, C ₂ H ₂ , HNCO, C ₂ H ₄ , N ₂ O
НМХ (до 200 °С)	N ₂ , N ₂ O, NO, H ₂ CO, CO, CO ₂ , NH ₃ , HCOOH, HCN (следы), H ₂ O (следы), HOCN ₂ NHCHO (следы).
НМХ (выше 200 °С)	N ₂ , N ₂ O, NO, CO, CO ₂ , H ₂ CO (следы), H ₂ O (следы)
АН (200–250 °С)	NH ₃ , HNO ₃ , оксиды азота
ТАТВ (до 300 °С)	CO ₂ , H ₂ O, N ₂ , ацетон
ТАТВ (выше 300 °С)	CO, NO, HCN, N ₂ O, HNCO, H ₂ O

Применение метода субТГц спектроскопии высокого разрешения на нестационарных эффектах для медицинских задач

В качестве примера можно привести исследование тканевых метаболитов для различных заболеваний ЛОР органов, а также изучение влияния химиотерапии на состав паров мочи онкологических пациентов [11].

Метод субТГц газовой спектроскопии высокого разрешения применялся для исследования тканей оболочек кист околоносовых пазух и жидкостного содержимого пазухи. Проблема исследования процессов возникновения и развития заболеваний носа и околоносовых пазух на фоне увеличения их количества, тяжелых и резистентных к лечению форм, является актуальной медицинской и социально-экономической задачей. Кисты околоносовой пазухи являются одной из самых распространенных форм хронического риносинусита. С использованием спектрометра диапазона 115–178 ГГц с фазовой манипу-

ляцией воздействующего на газ излучения проведены исследования состава продуктов термораспада образцов оболочки и жидкостного содержимого, взятых у больных во время оперативных вмешательств с использованием принципов FESS (Functional Endoscopic Sinus Surgery). Возраст больных составил от 8 до 64 лет. Исследовались кисты верхнечелюстных и основных синусов. Полученные образцы массой 2–5 мг помещались в 5 мл стерильной дистиллированной воды и в течение 2 часов поступали в ИФМ РАН для проведения спектроскопического анализа. Образец помещался в пробирку, подсоединяемую к предварительно вакуумированной ячейке. Производился нагрев пробирки с образцом и напуск смеси продуктов термического разложения образца в ячейку, после чего проводились измерения спектра. Для идентификации веществ по спектрам поглощения использовались электронные базы данных [9, 10].

Пример записи участка спектра поглощения продуктов термораспада ткани оболочки кисты приведен на рис. 1.

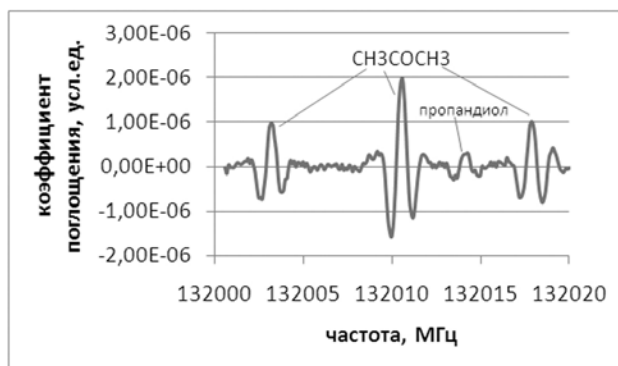


Рис. 1. Запись участка спектра поглощения продуктов термораспада ткани оболочки кисты с линиями ацетона и пропандиола

В образцах обнаружены ацетон, гидроксиацетон, пропандиол, ацетальдегид, метилбутиронитрил, пентаннитрил, метилмеркаптан, дигидроксиацетон, пропандиол, пропанол, малоновый альдегид, пропионитрил с изотопом С, метиленаминоацетонитрил, цианоксиран, циановинилацетилен, пиридин, аланин, моноэтаноламин, этиленгликоль, метилкарбамат, ацетальдегид с изотопом водорода, пропионитрил, цианоформамид, глицин, аминокетонитрил, пероксиазотная кислота, пропинол, метоксиацетальдегид, ацетонитрил и его изотополог, малоновый нитрил и азол.

Причины появления ряда соединений при термораспаде тканей и жидкостного содержимого пазух требуют детального исследования. Некоторые вещества могут непосредственно свидетельствовать о конкретных патологических состояниях. Большое количество соединений могут быть продуктами распада более тяжелых органических молекул. Метилмеркаптан может появляться при термораспаде серо-

содержащих аминокислот (метионин, цистеин, цистин) в составе белков тканей и жидкостного содержимого пазух. Цистин может быть источником ацетонитрила (CH_3CN). Часть обнаруженных веществ присутствуют и в здоровых тканях, и в тканях пациентов с патологией. Однако можно предположить, что такие соединения, как ацетон, дигидроксиацетон, могут являться маркерами воспаления. Эти исследования выполняются в рамках проекта РНФ № 21-19-00357.

С использованием реализованных спектрометров высокого разрешения, работающих в режиме фазовой манипуляции воздействующего на газ излучения, а также на основе быстрого свипирования частоты, проводилось исследование изменения состава мочи под влиянием химиотерапии (ХТ) у пациента с онкологией. Пациент (Ж, 79 лет, рак яичников) проходил курс химиотерапии на основе препаратов платины (Паклитаксел+Цисплатин). Особенностью профиля токсичности данной группы цитостатических препаратов является высокий риск развития повреждения почек и развития почечной недостаточности (нефротоксичность). У пациента уровень креатинина плазмы крови был в пределах нормы и до, и после введения цисплатина. Не были обнаружены также и изменения в общем анализе мочи.

Выявлен ряд летучих веществ, присутствующих во всех образцах, как здоровых людей, так и больных. Это вода, включая ее дейтерированный изотополог HDO, аммиак, включая его дейтерированный изотополог NH_2D , изоциановая кислота ($HNCO$), мочевины ($(NH_2)_2CO$), муравьиная ($HCOOH$) и уксусная (CH_3COOH) кислоты, формамид (NH_2CHO) и бутиронитрил (C_3H_7CN). Дейтерированные соединения в моче образуются из дейтерированной воды, присутствующей в составе обыкновенной воды, поскольку в природе в составе обычной воды одна молекула HDO приходится на 3200–3800 молекул легкой воды.

Характерной особенностью, появляющейся у больного с онкологией после проведения химиотерапии, является появление соединений группы нитрилов. Причем большинство этих соединений у условно здорового человека не появляется. Пример веществ, зарегистрированных в составе паров терморазложения мочи, приведен в табл. 2.

Применение метода субТГц спектроскопии высокого разрешения на нестационарных эффектах для сельскохозяйственных приложений

Начаты работы по выявлению возбудителей грибковых заболеваний зерновых сельскохозяйственных культур. Важнейшей задачей в сельском хозяйстве является сокращение потерь произведенной продукции на всех этапах технологической цепочки, в том числе при хранении. По оценке экспертов, ежегодные потери зерна в индустриально развитых странах составляют около 10 %, а в развивающихся странах они доходят до 50 % [12]. Причиной потерь зерна являются нарушения технологии его послеубо-

точной доработки и хранения, поражение вредителями и болезнями. Одним из наиболее опасных факторов, способствующих потере и значительному снижению качества зерна в процессе хранения, является его заражение плесневыми грибами (*Fusarium culmorum*, *Penicillium cyclopium*, *Penicillium capsulatum*, *Talaromyces rugulosus*, *Talaromyces thermophilus*, *Aspergillus versicolor*, *Aspergillus glaucus*, *Aspergillus candidus*, *Absidia Rhizopus arrizhus*, *Streptomyces altus* и др.). Для выявления зараженности злаков грибковыми заболеваниями может быть применен метод терагерцовой нестационарной газовой спектроскопии, позволяющий выявлять метаболиты зерна, появляющиеся в результате поражения

плесневыми грибами, а также самих грибков. Пример результатов исследования образцов зерна ярового овса «Архан» представлен на рис. 2. Новый сорт ярового овса «Архан» разработан в Федеральном исследовательском центре «Немчиновка», Московская область. Этот сорт устойчив к пыльной головне (*Ustilago avenae* Jens) (донором устойчивости к пыльной головне выступает сорт Putnam 61 (США)) [13].

В образце овса «Архан» – CH_3CHO , 1,3-пропандиол, 1,2-пропандиол, HCOCH_2OH , HCOOH , H_2CO , $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$, $\text{c-C}_6\text{H}_5\text{CN}$, HOONO_2 , HNCO , $\text{AA-n-C}_4\text{H}_9\text{CN}$. Наличие формамида может быть следствием пора-

Таблица 2

Вещества, зарегистрированные в составе паров мочи при нагреве

Вещество	Образец/количество линий в образце		
	Образец до ХТ	Образец после ХТ	Условно здоровый
Изоциановая кислота	4	9	15
Аммиак	1	1	1
Аммиак с изотопом водорода	0	1	0
Пропионитрил, включая дейтерированный и C^{13} изотопологи	1	0	
Пропионитрил с одним или несколькими изотопами С	0	1	0
Бутиронитрил, включая изотополог с изотопом С	1	3	2
Пентаннитрил	0	3	2
Бензонитрил	0	3	0
Метилбутиронитрил	1	3	0
Ацетонитрил	0	5	
Метиленаминоацетонитрил	0	2	
Меркаптоацетонитрил	1	1	
Аминопропионитрил	1	2	0
Акрилонитрил, включая изотополог с изотопом С	1	1	

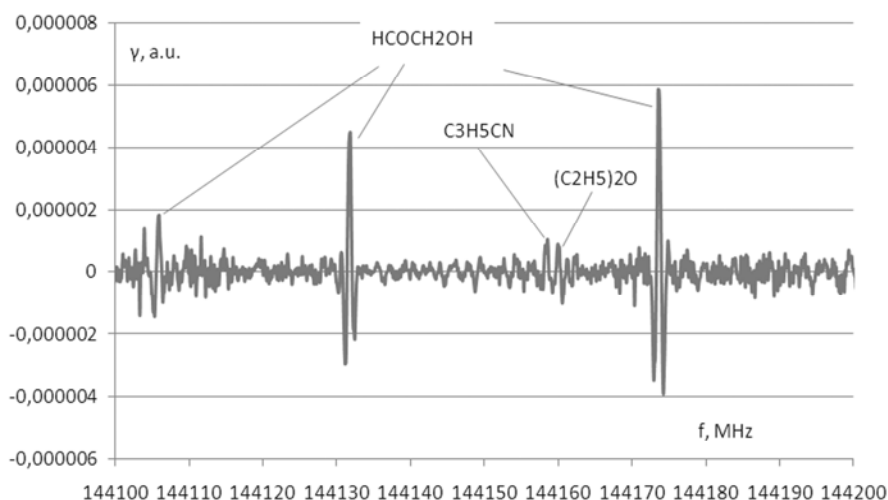


Рис. 2. Запись участка спектра «запах» образца зерна овса сорта «Архан» (коэффициент поглощения γ в условных единицах от частоты f в МГц). Идентифицированы линии HCOCH_2OH (с частотами 144105,7996 МГц, 144131,6898 МГц, 144173,6618 МГц) $\text{C}_3\text{H}_5\text{CN}$ (с частотой 144158,3801 МГц), $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$ (с частотой 144159,851 МГц) [14]

жения зерна некротрофными паразитами. При коэволюции они выработали систему защиты от токсических веществ, продуцируемых при отмирании зараженных растительных клеток, одним из продуктов трансформации токсичных соединений является формамид. При термораспаде D-глюкозы, например, в процессе пиролиза при нагреве около 200 °C и выше появляются такие альдегиды как ацетатальдегид и формальдегид, муравьиная и уксусная кислоты. Глюкозное звено входит в состав полисахаридов (целлюлоза, крахмал, гликоген) и ряда дисахаридов (мальтозы, сахарозы и др.)

Заключение

Рассмотрено практическое применение реализованных методов суб-терагерцовой газовой нестационарной спектроскопии высокого разрешения, а именно, исследование продуктов термического разложения, а также их динамики в зависимости от температуры для энергетических материалов, таких как аммиачная селитра, PETN, TATB, HMX. Рассмотрено применение метода для медицинских задач, например, исследование тканевых метаболитов для различных заболеваний ЛОР органов, изучение влияния химиотерапии на состав паров мочи онкологических пациентов. Начаты работы по выявлению возбудителей грибковых заболеваний зерновых сельскохозяйственных культур. Представленные результаты показывают перспективы использования методов нестационарной спектроскопии высокого разрешения субТГц частотного диапазона и приборов на их основе для практических приложений в различных областях (медицине, биологии, в задачах агропромышленного комплекса).

Список литературы

1. Вакс В. Л., Анфертьев В. А., Балакирев В. Ю., Басов С. А., Домрачева Е. Г., Иллюк А. В., Куприянов П. В., Приползин С. И., Черняева М. Б. Спектроскопия высокого разрешения терагерцевого частотного диапазона для аналитических приложений // УФН. 2020. Т. 190. С. 765–776. DOI: 10.3367/UFN.2019.07.038613.
2. Vaks V. L., Domracheva E. G., Chernyaeva M. B., Pripolzin S. I., Anfertyev V. A., Yablokov A. A., Lukyanenko I. A., Sheikov Yu. V. High-resolution terahertz spectroscopy for investigation of energetic materials during their thermal decomposition // IEEE TRANSACTIONS ON TERAHERTZ SCIENCE AND TECHNOLOGY. 2021. Vol. 11, N 4. P. 443–453. DOI: 10.1109/TTTHZ.2021.3074030.

3. Ng W. L., Field J. E., Hauser H. M. Thermal, Fracture, and Laser-induced Decomposition of Pentaerythritol Tetranitrate // Journal of Applied Physics. 1986. Vol. 59, N 12. P. 3945–3952.
4. Chambers D. M., Brackett C. L., Sparkman O. D. Perspectives on Pentaerythritol Tetranitrate (PETN) Decomposition // Lawrence Livermore National Laboratory. 2002. UCRL-JC-148956. 18 p.
5. Roos B. D., Brill T. B. Thermal Decomposition of Energetic Materials 82. Correlations of Gaseous Products with the Composition of Aliphatic Nitrate Esters // Combustion and Flame. 2002. Vol. 128. P. 181–190.
6. Shu Yu., Korsunsky B. L., Nazin G. M. The mechanism of thermal decomposition of secondary nitramines // Advances in Chemistry. 2004. Vol. 73, N 3. P. 320–335.
7. Chaturvedi S., Dave P. N. Review on Thermal Decomposition of Ammonium Nitrate // J. Energ. Mater. 2013. Vol. 31, N 1. P. 1–26.
8. Brill T. B., James K. J. Kinetics and Mechanisms of Thermal Decomposition of Nitroaromatic Explosives // Chem. Rev. 1993. Vol. 93. P. 2667–2692;
9. Pickett, H. M. *et al.* Submillimeter, Millimeter, and Microwave Spectral Line Catalog. JPL Molecular Spectroscopy // California Institute of Technology. <http://spec.jpl.nasa.gov/ftp/pub/catalog/catform.html>.
10. Endres, C. P., Schlemmer, S., Schilke, P., Stutzki, J. & Müller, H. S. P. The Cologne Database for Molecular Spectroscopy, CDMS, in the Virtual Atomic and Molecular Data Centre, VAMDC // J. Mol. Spectrosc. 2016. Vol. 327. P. 95–104.
11. Вакс В. Л., Домрачева Е. Г., Черняева М. Б., Анфертьев В. А., Айзенштадт А. А., Гаврилова К. А., Ларин Р. А. Применение метода терагерцовой газовой спектроскопии высокого разрешения для анализа состава продуктов термического разложения тканей кист околоносовых пазух // Оптический журнал. 2021. Т. 88. № 3. С. 72–76.
12. Дринча В., Цыдендоржиев Б. Комбикорма. 2010. № 7. С. 59–60.
13. Лейбович Я. Г., Власенко Н. М., Колупаева А. С. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20, № 2(2). С. 245–247.
14. Вакс В. Л., Домрачева Е. Г., Приползин С. И., Черняева М. Б., Анфертьев В. А., Гаврилова К. А., Дабахова Е. В. Терагерцовая газовая спектроскопия высокого разрешения для анализа состава продуктов термического разложения зерна злаков (овса, ячменя) // Журнал прикладной спектроскопии. 2019. Т. 86, № 5. С. 778–784.