

DOI: 10.15593/2224-9400/2021.3.04

УДК 662.2-391.4

**В.М. Зиновьев, Л.Л. Хименко, Е.А. Новотчинова,
А.В. Садилова, С.А. Котельников**

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, г. Пермь, Россия

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА В ИЗУЧЕНИИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ НИТРАТА АММОНИЯ

Посредством методов термического анализа изучены физико-химические свойства композиций на основе нитрата аммония (НА). Комплексом термоаналитических методов (дифференциально-термический, калориметрический и термогравиметрический) найдены дополнительные методы контроля изучаемых образцов, необходимые для обеспечения стабильности технологии при переработке их в изделия. Наибольшая информативность зафиксирована методом ДСК, где показателями качества образцов являются температурные и калориметрические характеристики реакций, определяемые в температурно-временных условиях. Метод ДСК обладает высокой точностью измерений при минимальной навеске образца, что экономически выгодно для дорогостоящих композиций. Метод является экспрессным и имеет высокую вариабельность условий испытаний. В статье исследованы основные показатели реакционной способности образцов, определяемые методом ДСК: температура фазовых переходов, температура начала интенсивного разложения ($T_{\text{нпр}}$), температура пика ДСК, которая соответствует максимальному значению скорости теплового потока, а значит, и скорости разложения в заданных условиях нагрева, температура завершения интенсивного процесса, тепловой эффект реакции разложения. Таким образом, по воспроизводимости фиксируемых фазовых и структурных переходов композиций на основе НА можно также судить о стойкости показателей энергетических конденсированных систем (ЭКС) при вынужденных ее изменениях. В данной работе была поставлена задача изучить физико-химические свойства НА и композиций на его основе, определить влияние влаги на характеристики образцов комплексом термических методов, в соответствии с этим предложить наиболее эффективный метод оценки качества исследуемых образцов, а также опробовать его для разработки методики исследования.

Ключевые слова: дифференциально-сканирующая калориметрия, термогравиметрия, дифференциальный термический анализ, нитрат аммония, энергетические конденсированные системы, термический анализ, тепловой эффект, фазовый переход, температура начала интенсивного разложения, термическое разложение.

**V.M. Zinov'ev, L.L. Khimenko, E.A. Novotochinova,
A.V. Sadilova, S.A. Kotel'nikov**

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

PECULIARITIES OF THERMAL ANALYSIS METHODS APPLICATION IN STUDYING PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF AMMONIUM NITRATE BASED COMPOSITIONS

The paper is devoted to the study of the physical and chemical properties of ammonium nitrate (AN) compositions by means of thermal analysis methods. A complex of thermoanalytical methods (differential thermal, calorimetric and thermogravimetric) provides additional control of the samples under study, which is necessary to ensure stability of the technology when processing them into products. The most informative method is DSC method, where temperature and calorimetric characteristics of reactions determined under time-temperature conditions are the indicators of sample quality. The DSC method has a high measurement accuracy at minimum sample weight, which is economically beneficial for expensive compositions, and also the method is express and has high variability of test conditions. The paper investigates the main reactivity parameters of the sample under study, determined by the DSC method: phase transition temperature, temperature of the beginning of intense decomposition (T_{nr}), temperature of the DSC peak, which corresponds to the maximum value of the heat flow rate, and hence the rate of decomposition under the specified heating conditions, the temperature intensive process, the thermal effect of the decomposition reaction. Thus, the reproducibility of fixed phase and structural transitions of ND-based compositions can also be used to judge the persistence performance of energetic condensed systems (ECS) under forced changes. In the present work a task was set to study physical and chemical properties of ND and ND-based mixtures, to determine the influence of moisture on the characteristics of samples by a complex of thermal methods, in accordance with this to offer the most effective method for assessing the quality of the studied samples, as well as to try it out to develop a research method.

Keywords: *differential scanning calorimetry, thermogravimetry, differential thermal analysis, ammonium nitrate, energy condensed systems, thermal analysis, thermal effect, phase transition, temperature of the beginning of intense decomposition, thermal decomposition.*

Нитрат аммония (НА) является одним из часто используемых окислителей в газогенерирующих составах для различных устройств авиационной и ракетной техники: катапультирующиеся сиденья, пироклапаны, пусковые камеры турбонасосных агрегатов, силовые установки для перемещения космонавтов в открытом космосе [1].

Высокая гигроскопичность НА приводит к слеживанию, которое сопровождается изменением формы и размера частиц (так называемый полиморфизм), что приводит к изменению скорости горения, техноло-

гических и физико-механических свойств. Гигроскопическая влага является не только энергетическим балластом, но и отрицательно влияет на адгезию на границе полимер/частицы окислителя и, следовательно, на прочность изделия. Также влага ухудшает воспламенение и снижает физическую стабильность. Гигроскопичность окислителя требует строгого соблюдения условий по температуре и относительной влажности в производственных помещениях и при хранении изделия [2].

Следствием полиморфности НА являются нарушение физической целостности изделий на основе НА, отклонения от необходимого закона горения при их работе, низкая воспроизводимость эксплуатационных характеристик [2]. Частично эти недостатки могут быть устранены с помощью специальных добавок [1].

Несмотря на то, что изучению термического разложения НА уделялось и уделяется много внимания, следует признать, что к настоящему времени достаточно полного общепринятого представления о механизме процесса не достигнуто.

Известно, что при горении в открытом объеме аммиак удаляется из зоны реакции с большей скоростью, и, следовательно, скорость начального этапа реакции возрастает. Но по ходу накопления возрастает и скорость удаления из зоны реакции азотной кислоты, в итоге ускорение процесса прекращается.

Сложный характер имеет процесс разложения НА в замкнутом объеме. Из-за различных температурных зависимостей скоростей окисления аммиака азотной кислотой и продуктами ее распада и разложения азотной кислоты при относительно низких температурах (210–220 °С) происходит накопление аммиака, концентрация азотной кислоты падает и наступает торможение реакции разложения [3]. Процесс практически прекращается, несмотря на то, что большая часть соли еще не разложилась. При повышении температуры аммиак начинает разлагаться быстрее, реакция приобретает значительное самоускорение. Следует отметить, что в условиях замкнутого объема скорость и характер процесса разложения НА сильно зависит от величины m/V – степени заполнения солью реакционного сосуда, что может свидетельствовать об автокатализе процесса газообразными продуктами реакции.

В ходе многочисленных исследований установлено, что различия в начальных скоростях тепловыделения при термическом разложении различных промышленных партий НА может составлять до двух порядков и связано с наличием в них избыточной азотной кислоты, сле-

дов ионов металлов переменной валентности и органических включений с различной способностью к окислению [4].

Следует отметить, что к настоящему времени признано, что, несмотря на более чем полувековую историю изучения вопроса, понимание механизма горения НА и систем на его основе далеко не полно.

В последнее время получен ряд экспериментальных и теоретических результатов, требующих пересмотра положения о механизме горения НА и композиций на его основе в пользу представления о существенном вкладе реакций, протекающих в конденсированной фазе (к-фазные реакции) [5,6].

Что касается теоретического обоснования приоритета к-фазных реакций, то выполненные авторами работы [7] оценки показывают, что для случая горения чистого НА суммарного теплового эффекта реакций в конденсированной фазе недостаточно для расплава поверхностного слоя частиц и разогрева его до температуры диссоциации. В то же время теплоты реакции прямого взаимодействия НА с горючим (рассматривается углерод) в конденсированной фазе по механизму, предложенному в работе [8] (см. уравнение 2.2.1), вполне достаточно (в рассматриваемом процессе при соотношении НА : углерод = 3 : 1 выделяется до 980 кал/г тепла) для компенсации затрат на разогрев частиц НА и на обеспечение температуры поверхности горения (температуры диссоциации).

Из изложенного выше следует, что изучение и понимание механизма и закономерностей развития к-фазных процессов термического разложения систем на основе солей (в нашем случае на основе нитрата аммония) следует рассматривать как один из потенциально ключевых подходов к пониманию особенностей механизма горения систем.

Экспериментальная часть. Термические методы анализа, такие как дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК), дифференциально-термический анализ (ДТА) и термогравиметрический анализ (ТГА), широко применяются в исследованиях полимерных композиций и энергетических конденсированных систем [9, 10]. В том числе они позволяют определять температурные интервалы полиморфных переходов в кристаллической решетке различных веществ.

Данная работа посвящена получению экспериментальных данных о свойствах фаз и фазовых равновесиях нитрата аммония в многокомпонентной системе, а также оценке его влияния на тепловой эффект процесса. В ходе исследований получены новые данные, дополняющие

и уточняющие имеющиеся в литературе сведения относительно влияния различных факторов на полиморфные переходы нитрата аммония. В качестве основного метода испытаний образцов смесей на его основе предложен метод дифференциальной сканирующей калориметрии. В статье также представлены результаты исследований образцов термогравиметрическим и дифференциально-термическим методами, что наиболее эффективно дополняет информативность исследований композиций на основе НА.

С учетом известных из литературы исследований НА и его композиций [11–14] и результатов работ авторов [15] в качестве объектов для исследований была выбрана композиция НА–углерод–ацетат целлюлозы (АЦ).

Рассмотрены три варианта подготовки образцов:

1) перед испытаниями образцы НА дополнительно подсушивались при комнатной температуре над прокаленным силикагелем (сухие образцы);

2) перед испытаниями образцы НА выдерживались в эксикаторе над насыщенным водным раствором CaCl_2 (образцы, увлажненные при $\varphi = 32\%$);

3) перед испытаниями образцы НА выдерживались в эксикаторе над насыщенным водным раствором NaBr (образцы, увлажненные при $\varphi = 59\%$).

Перед проведением испытаний все образцы высушивались до постоянного веса над силикагелем в эксикаторах. Предварительно силикагель прокаливался в сушильном шкафу при $150\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 4 ч.

ДСК-исследования проводились на дифференциальном сканирующем калориметре DSC 204F1 Phoenix, ТГ-исследования на термомикровесах NETZSCH TG 209 F1 Iris, ДТА-исследования – на приборе контроля и регистрации температур, термического разложения и фазовых переходов в образцах.

Эксперименты выполнены в герметичных (запаянных методом «холодной сварки») алюминиевых реакционных тиглях в условиях минимального свободного объема. Масса образцов $\approx 1,5$ мг. Нагрев со скоростью $2,5\text{ K/мин}$.

Тройная смесь НА, АЦ и углерода и готовилась в соотношении 65:30:5 % мас. Для обработки результатов измерения ДСК использовали программу Proteus Analysis программного обеспечения NETZSCH Proteus, с помощью которой определяли температуры фазовых перехо-

дов, характерных для различных модификаций нитрата аммония, температуры начала разложения ($T_{н.р}$), оценивали процесс плавления.

Результаты и их обсуждение. С помощью ДТА определено (рис. 1), что первые три эндотермических пика, регистрируемых на термограммах при температурах 42, 53, 87–88 и 127–128 °С, это известные из литературных данных [1] процессы фазовых переходов кристаллов НА из модификаций IV в III, III в II, II в I, соответственно. Эндотермический процесс, фиксируемый на термограммах при 162–167 °С, это также известный по литературным источникам процесс плавления кристаллов соли. Выше температуры плавления кристаллов НА в условиях ДТА эксперимента (свободный массообмен с окружающей воздушной средой) на термограммах термического разложения соли регистрируются два экзотермических пика: первый – в интервале температур от 185–205 до 250 °С, а второй – в температурном интервале от 250 до 280–285 °С.

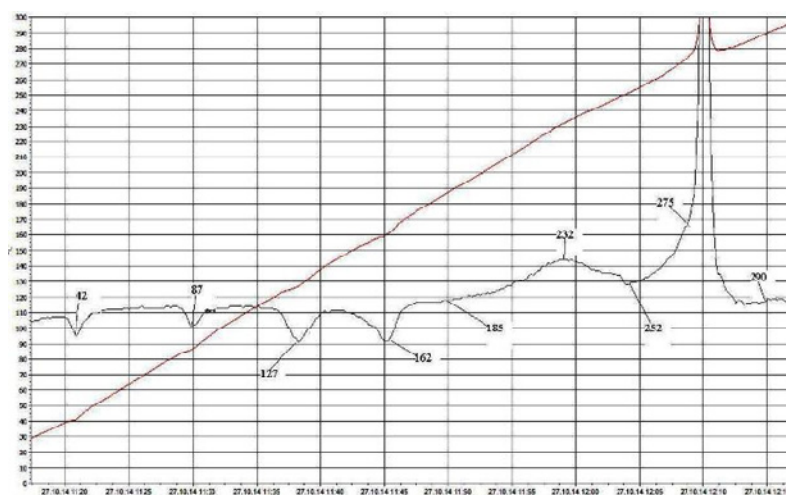


Рис. 1. Данные ДТА при разложении нитрата аммония после дополнительной сушки над силикагелем

Судя по характеру регистрируемых термограмм (неустойчивый характер линий), во всем температурном диапазоне термораспад соли сопровождался массообменными процессами с окружающей средой.

Опираясь на нижепредставленные данные термогравиметрических испытаний образцов НА, следует предположить, что регистрируемый на термограммах характер развития процесса (два последовательных пика) обусловлен не сменой химического механизма процесса

при температурах 230–250 °С, а влиянием эндотермического процесса кипения расплава НА (температура кипения около 235 °С).

Что касается влияния предварительной подготовки образцов, то по результатам ДТА испытаний закономерного количественного влияния степени увлажнения соли на характер развития процесса выявить не удалось (рис. 2–4).

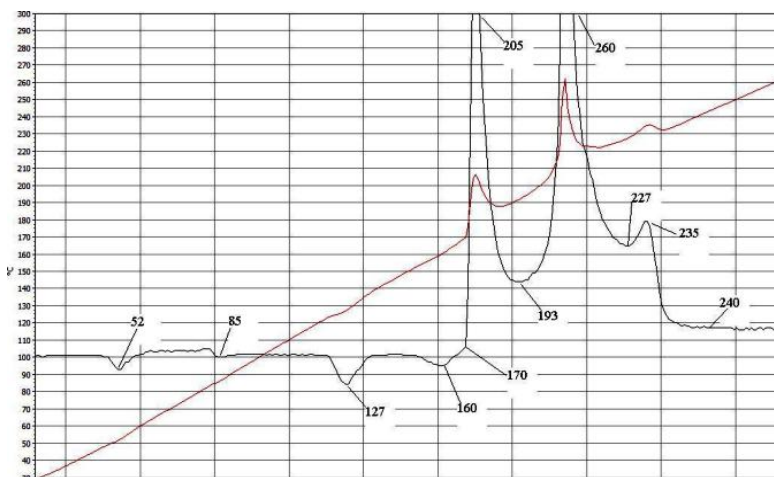


Рис. 2. Данные ДТА тройной смеси НА+АЦ +углерод после дополнительного подсушивания

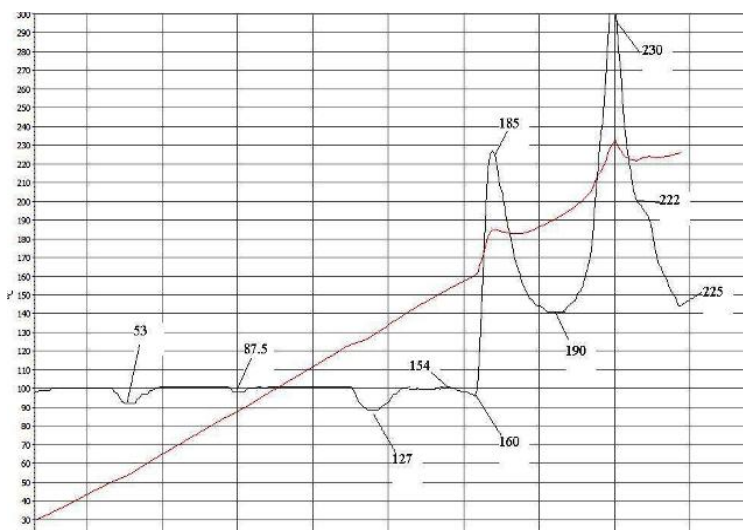


Рис. 3. Данные ДТА тройной смеси НА+АЦ +углерод, выдержанной при $\phi = 32\%$

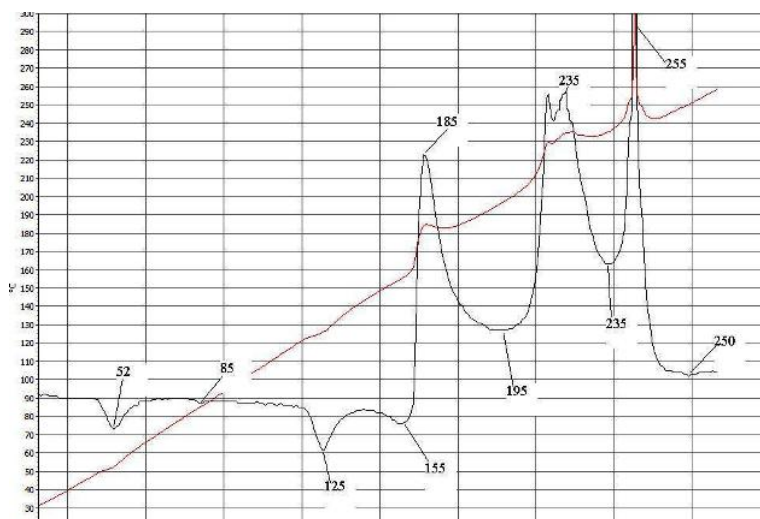


Рис. 4. Данные ДТА тройной смеси НА+АЦ +углерод, выдержанной при $\phi = 59 \%$

По-видимому, сказались условия проведения экспериментов – свободный массообмен с окружающей средой, а также тот факт, что термическое разложение проходило при температурах, в которых селитра находится в расплавленном состоянии.

На рис. 5 представлены ТГ-кривые образцов тройных смесей НА+углерод+АЦ.

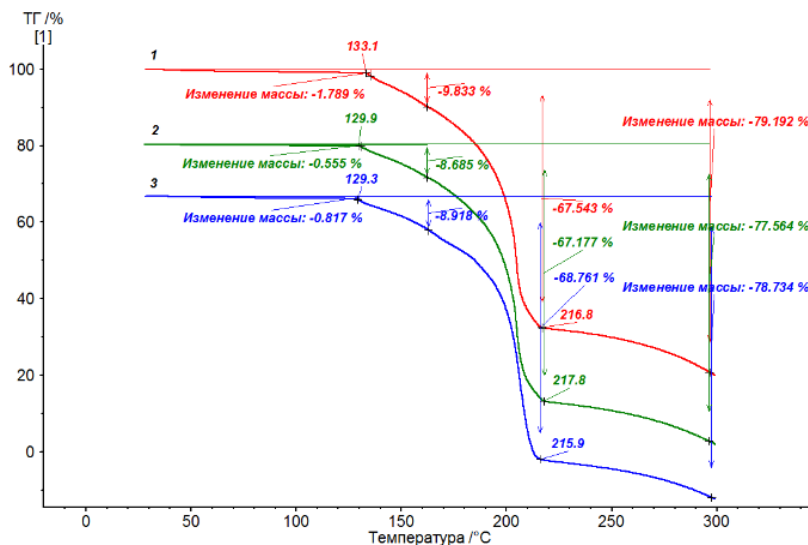


Рис. 5. ТГ кривые тройных смесей НА+АЦ +углерод: 1 – сухой образец; 2 – образец, выдержанный при $\phi = 32 \%$; 3 – образец, выдержанный при $\phi = 59 \%$

Результаты термогравиметрического анализа показывают, что начало процесса термораспада тройных смесей регистрируется при температуре около 129–133 °С – температуре, при которой все три реагента находятся в твердом состоянии.

Отметим, что вблизи указанной температуры (127 °С) происходит переход тетрагональной модификации кристаллов НА в кубическую, сопровождающийся изменением (уменьшением) плотности, т.е. увеличением контактирующей с компонентами смеси поверхности кристаллов. Отмеченный факт свидетельствует в пользу высказанного выше предположения о том, что процесс начинается на поверхности контакта НА с углеродом, возможно, при участии и АЦ. Далее, вплоть до температуры плавления кристаллов НА, скорость процесса с ростом температуры увеличивается незначительно.

В диапазоне температур 185–210 °С скорость процесса стремительно возрастает, отмечается явная убыль массы образца. Отметим, что к температуре 210 °С остается около 35 % исходной массы образца. Всего же в диапазоне температур 185–210 °С расходуется до 50 % массы образца. При этом в условиях ТГ эксперимента с НА индивидуально к температуре 210 °С расходуется не более 15–16 % массы образца соли.

Далее (выше 210 °С) масса образцов продолжает монотонно убывать и к 300 °С неразложившийся (возможно, неулетучившийся) остаток составляет около 20 % от исходной массы образцов.

По-видимому, к температуре 210–220 °С в условиях ТГ эксперимента практически расходуются реагенты, способные к активному взаимодействию в тройной смеси и далее, с ростом температуры, процесс в оставшихся продуктах реакции развивается медленно. Без химико-аналитических исследований состава образующихся продуктов реакции составить более полное представление о механизме развития процесса представляется весьма затруднительным.

На рис. 6 приведены сравнительные количественные результаты термогравиметрических экспериментов с образцами высушенной смеси НА и смеси, предварительно увлажненной в среде с относительной влажностью $\varphi = 59\%$. Процесс термического разложения высушенной смеси опережает процесс предварительно увлажненной смеси. Количественно к температуре 200 °С масса высушенного образца оказалась на 5 % меньше предварительно увлажненного образца.

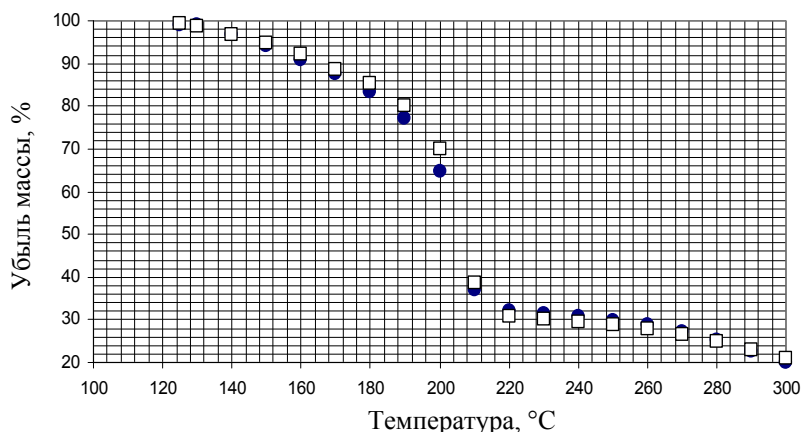


Рис. 6. Термогравиметрические кривые термического разложения тройных смесей НА+АЦ +углерод. ■ – образец предварительно высушенной смеси; □ – образец смеси, увлажненный при относительной влажности $\phi = 59\%$

На термограммах ДСК (рис. 7, 8) четко регистрируются пики фазовых переходов в кристаллах НА при 53, 86–89 и 127 °С и пик плавления кристаллов при 169 °С.

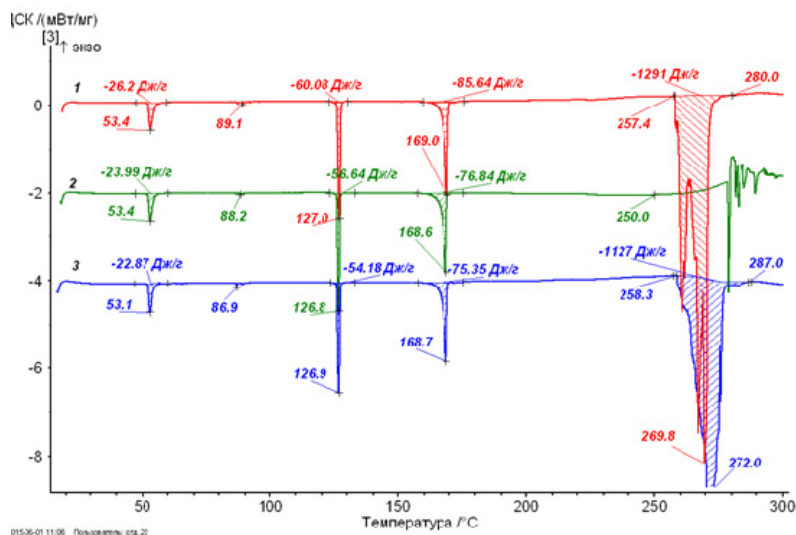


Рис. 7. Кривые ДСК образцов нитрата аммония, нагрев со скоростью 2,5 К/мин в замкнутом объеме тигля: 1 – исходная смесь; 2 – после увлажнения при 32%; 3 – после увлажнения при 59 %

Но в условиях ДСК эксперимента на термограммах отсутствует экзотермический процесс, регистрируемый в ДТА эксперименте в диапазоне температур 185–250 °С, тогда как в области температур

250–300 °С наблюдается эндотермический процесс с достаточно высоким (1100–1300 Дж/г) поглощением тепла. По-видимому, в замкнутом тигле с высокой степенью заполнения реакционного объема отсутствие экзотермического процесса объясняется отсутствием условий для накопления достаточной для инициирования начальной реакции концентрации азотной кислоты, образуемой в условиях ДТА эксперимента за счет удаления из реакционного объема аммиака. Эндотермический процесс (250–300 °С) обусловлен, по-видимому, кипением образовавшегося при 169 °С расплава НА. В открытом объеме кипение НА начинается при температуре 235 °С.

Отметим, что замеренный тепловой эффект плавления при 169 °С (75–85 Дж/г) вполне соответствует известным литературным данным, а эндотермический процесс при температуре 250–300 °С связывается с процессом сублимации-разложения НА. Замеренный в указанной работе тепловой эффект эндотермического процесса составил 1291 Дж/г.

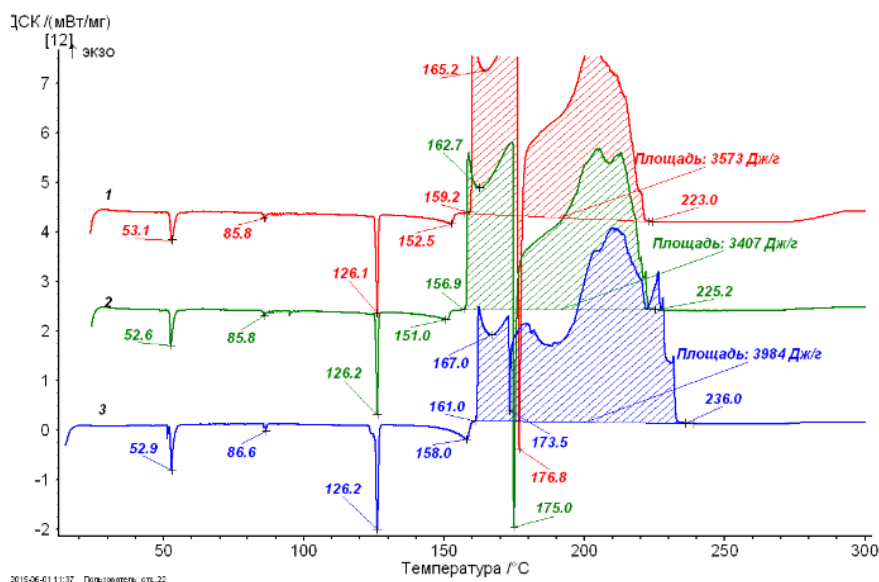


Рис. 8. Кривые ДСК образцов тройной смеси НА+АЦ+углерод, нагрев со скоростью 2,5 К/мин: 1 – исходная смесь; 2 – после увлажнения при 32 %; 3 – после увлажнения при 59 %

Далее следует проанализировать результаты исследований термического разложения тройных смесей НА+АЦ+углерод методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Из приведенных на рис. 8 данных следует, что $T_{н.и.р}$ смеси составила 157–159 °С,

т.е. и в условиях замкнутого объема процесс термического разложения тройных смесей начинается при температуре, при которой все три реагента смесей находятся в твердом состоянии. Начинается термическое разложение тройных смесей с интенсивным, имеющим автокаталитический характер процессом выделения тепла. На термограммах четко регистрируются налагаемые на основной экзотермический процесс воспроизводимые от испытания к испытанию пики двух эндотермических процессов. Первый, при температурах 164–169 °С, по-видимому, пик плавления кристаллов соли, а природа второго, при 175–180 °С, не ясна. Заканчивается процесс интенсивного тепловыделения к температуре 220–225 °С.

Как следует из ТГ кривых, к указанной температуре в основном заканчивается и процесс интенсивного снижения массы образцов (см. рис. 6). Замеренный тепловой эффект процесса термического разложения тройных смесей НА+АЦ+углерод составил 3400–4000 Дж/г. Отметим также, что на термограммах тройных смесей регистрируются небольшие эндотермические пики при 152–158 °С, при этом выраженные пики плавления кристаллов соли также присутствуют на термограммах.

Что касается влияния предварительного увлажнения, то по представленным результатам ДСК экспериментов закономерного влияния увлажнения на развитие процесса термического разложения тройных смесей выявить не удалось.

В табл. 1 приведены сравнительные результаты термогравиметрических (ТГ) испытаний образцов тройной смеси НА+АЦ+углерод.

Таблица 1

Сравнительные результаты термогравиметрических (ТГ) испытаний образцов тройной смеси НА+АЦ+углерод (65:30:5)

Образец	Сравниваемые показатели				
	T_n , °С	$T_{н.и.р.}$, °С	T_k , °С	М остатка при T_k , %	М остатка при 300 °С, %
Сухой	133	163	217	33,5	21
Выдержанный при $\varphi = 32\%$	130	162	218	33,0	23
Выдержанный при $\varphi = 59\%$	129	164	216	31,0	21

Примечание: T_n – фиксируемая прибором температура начала процесса; $T_{н.и.р.}$ – температура начала интенсивного процесса; T_k – температура завершения интенсивного процесса.

Для удобства интерпретации полученные результаты ДСК испытаний сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты ДСК испытаний образцов
тройной смеси НА+АЦ+углерод

Образец	Сравниваемые показатели			
	$T_{н.и.р.}, ^\circ\text{C}$	$T_{п.}, ^\circ\text{C}$	$T_{к.}, ^\circ\text{C}$	S пика, Дж/г
Сухой	159	≈ 165 (177)	223	3573
Выдержан при $\varphi = 32\%$	157	≈ 163 (175)	225	3407
Выдержан при $\varphi = 59\%$	161	≈ 167 (174)	236	3984

Примечание. Термограммы ДСК тройных смесей имели двойной пик тепловыделения (см. рис. 8), в скобках приведены температуры максимума второго пика ($T_{п.}$), S – суммарный тепловой эффект процесса, Дж/г.

В настоящей работе рассмотрено применение методов ДСК, ДТА и ТГА в исследованиях фазовой стабильности и оценке влияния предварительного увлажнения на термораспад смесей с углеродом такого окислителя энергетических конденсированных систем (ЭКС), применяемых в различных газогенераторах и энергетических установках, как нитрат аммония.

Заключение. Комплексом термических методов анализа изучены физико-химические свойства тройных композиций нитрат аммония – углерод – ацетата целлюлозы. Наиболее информативным методом из исследованных (ДТА, ДТГ, ДСК) является ДСК, который позволяет оценивать особенности процессов тепловых превращений композиций на основе нитрата аммония.

Список литературы

1. Твердые топлива реактивных двигателей / В.Н. Аликин, А.В. Вахрушев, В.Б. Голубчиков [и др.]; под ред. А.М. Липанова. – М.: Машиностроение, 2011. – 380 с.
2. Рогов Н.Г., Ищенко М.А. Смесевые ракетные твердые топлива: Компоненты. Требования. Свойства: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во СПбГТИ (ТУ), 2005. – 195 с.
3. Окислители гетерогенных конденсированных систем / Н.А. Силин, В.А. Ващенко, Н.И. Зарипов [и др.] – М.: Машиностроение, 1978. – 456 с.
4. Рубцов Ю.И., Казаков А.И., Шведов К.К. Исследование кинетических закономерностей и механизма разложения бинарных смесей на основе

нитрата аммония с экзо- и эндотермическими превращениями компонентов // Химическая физика. – 2007. – Т. 26, № 5. – С. 70–77.

5. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ и порохов / Г.Б. Манелис, Г.М. Назин, Ю.И. Рубцов, В.А. Струнин. – М.: Наука, 1976. – 223 с.

6. Combustion of Ammonium Nitrate-based Compositions, Metal-Containing and Water-Impregnated Compounds / B.N. Kondrikov, V.E. Annikov, V.Y. Egorshv, L.T. DeLuca, C. Bronzi // J. Propulsion and Power. – 1999. – Vol. 15, no. 6. – P. 763.

7. Ammonium Nitrate: Combustion Mechanism and the Role of Additives / V.P. Sinditskii, V.Y. Egorshv, A.I. Levshenkov, V.V. Serushkin // J. Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2005. – Vol. 30, no. 4. – P. 269–270.

8. Лурье Б.А., Ляньшен Чжан Кинетика и механизм термического разложения порошкообразного нитрата аммония под влиянием сажи // Физика горения и взрыва. – 2000. – Т. 36, № 5. – С. 63–73.

9. Уэндланд Т. Термические методы анализа. – М.: Мир, 1978. – 407 с.

10. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ и порохов / Г.Б. Манелис, Г.М. Назин, Ю.И. Рубцов, В.А. Струнин. – М.: Наука, 1996. – 400 с.

11. Бабкина Т.С. Фазовые равновесия в бинарных и тройных системах на основе нитрата аммония и мочевины: дис. ... канд. хим. наук. – М., 2014. – 145 с.

12. Исследование кинетики термического разложения нитрата аммония в неизотермических условиях в открытой системе / К.Г. Горбовский, А.И. Казаков, А.М. Норов, А.И. Михайличенко // Химическая технология. – 2020. – Т. 21, № 2. – С. 50–56.

13. Попок В.Н. Применение термических методов анализа к исследованию фазовой стабильности нитрата аммония // Ползуновский вестник. – 2011. – № 3-1. – С. 70–75.

14. Термическое разложение нитрата аммония с тройными добавками / И.А. Вазенова, И.В. Левченко, В.А. Таранушич, В.М. Чернышев // Журнал прикладной химии. – 2015. – Т. 4, № 88. – С. 541–545.

15. Новотчинова Е.А., Садилова А.В. Использование дифференциальной сканирующей калориметрии в изучении физико-химических свойств нитрата аммония и смесей на его основе // ХСІ Международные научные чтения памяти Е.К. Завойского: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. – М.: Научная артель, 2020. – С. 84.

References

1. Alikin V.N., Vakhrushev A.V., Golubchikov V.B. et al. Tverdye topliva reaktivnykh dvigatelej [Solid fuel jet engines]. Ed A.M. Lipanov. Moscow, Mashinostroenie, 2011, 380 p.

2. Rogov N.G., Ishenko M.A. Smesevye raketnye tverдые topliva: Komponenty. Trebovaniya. Svoystva [Mixed solid propellants. Components. Requirements. Properties]. Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii institut, 2005, 195 p.

3. Silin N.A., Vashenko V.A., Zaripov N.I. et al. Okisliteli geterogennykh kondensirovannykh system [Oxidizers of heterogeneous condensed systems]. Moscow, Mashinostroenie, 1978, 456 p.

4. Rubcov Ju.I., Kazakov A.I., Shvedov K.K. Issledovanie kineticheskikh zakonomernostej i mekhanizma razlozhenija binarnykh smesej na osnove nitrata ammonija s jekzo i jendotermicheskimi prevrashhenijami komponentov [Investigation of kinetic regularities and the mechanism of decomposition of binary mixtures based on ammonium nitrate with exo and endothermic transformations of components]. *Chemical physics*, 2007, vol. 26, no. 5, pp.70-77.

5. Manelis G.B., Nazin G.M., Rubcov Ju.I., Strunin V.A. Termicheskoe razlozhenie i gorenje vzryvchatykh veshestv i porokhov [Thermal decomposition and combustion of explosives and propellants]. Moscow, Nauka, 1976, 223 p.

6. Kondrikov B.N., Annikov V.E., Egorshev V.Y., DeLuca L.T., Bronzi C. Combustion of ammonium nitrate-based compositions, metal-containing and water-impregnated compounds. *J. Propulsion and Power*, 1999, iss.15, №6, p.763.

7. Sinditskii V.P., Egorshev V.Y., Levshenkov A.I., Serushkin V.V. Ammonium nitrate: combustion mechanism and the role of additives. *J. Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2005, iss.30, №4, pp. 269-270.

8. Lur'e B.A., Chzhan Ljan'shen. Kinetika i mekhanizm termicheskogo razlozhenija poroshkoobraznogo nitrata ammonija pod vlijaniem sazhi [Kinetics and mechanism of thermal decomposition of powdered ammonium nitrate under the influence of soot]. *Combustion and explosion physics*, 2000, vol. 36, no. 5, pp. 63-73.

9. Ujendland T. Termicheskie metody analiza [Thermal analysis methods]. Moscow, Mir, 1978, 407 p.

10. Manelis G.B., Nazin G.M., Rubcov Ju.I., Strunin V.A. Termicheskoe razlozhenie i gorenje vzryvchatykh veshestv i porokhov [Thermal decomposition and combustion of explosives and propellants]. Moscow, Nauka, 1996, 400 p.

11. Babkina T.S. Fazovye ravnovesija v binarnykh i trojnykh sistemakh na osnove nitrata ammonija i mocheviny [Phase equilibria in binary and ternary systems based on ammonium nitrate and urea]. *Abstract of Ph. D. thesis*. Moscow, 2014, 26 p.

12. Gorbovskii K.G., Kazakov A.I., Norov A.M., Mikhailichenko A.I. Issledovanie kinetiki termicheskogo razlozheniia nitrata ammoniia v neizotermicheskikh usloviiakh v otkrytoi sisteme [Study of the kinetics of thermal decomposition of ammonium nitrate in non-isothermal conditions in an open system]. *Chemical Technology*, 2020, vol.21, no.2, pp. 50-56.

13. Popok V.N. Primenenie termicheskikh metodov analiza k issledovaniju fazovoj stabil'nosti nitrata ammonija [Application of Thermal Analysis Methods to

Study the Phase Stability of Ammonium Nitrate]. *Polzunovsky Bulletin*, 2011, no. 3-1, pp.70-75.

14. Vazenova I.A., Levchenko I.V., Taranushich V.A., Chernyshev V.M. Termicheskoe razlozhenie nitrata ammoniia s troinymi dobavkami [Thermal decomposition of ammonium nitrate with triple additives]. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2015, no 88, vol.4, pp.541-545.

15. Novotochinova E.A., Sadilova A.V. Ispolzovanie differencialnoj skanirujushej kalorimetrii v izuchenii fiziko-khimicheskikh svojstv nitrata ammonija i smesej na ego osnove [The use of differential scanning calorimetry in the study of the physical and chemical properties of ammonium nitrate and mixtures based on it]. *XCI Mezhdunarodnye nauchnye chtenija pamjati E.K. Zavojskogo. Sbornik statej mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferentsii*. Moscow, Nauchnaja artel, 2020, p. 84.

Получено 20.07.2021

Об авторах

Зиновьев Василий Михайлович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология полимерных материалов и порохов» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: suzuk47@mail.ru).

Хименко Людмила Леонидовна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, заведующая кафедрой «Технология полимерных материалов и порохов» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: lhimenko@yandex.ru).

Новоточинова Екатерина Алексеевна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология полимерных материалов и порохов» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: novo-katerina@yandex.ru).

Котельников Сергей Александрович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология полимерных материалов и порохов» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ksa76@mail.ru).

Садилова Алёна Владимировна (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Технология полимерных материалов и порохов» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: alexandrasadilova2012@yandex.ru).

About the authors

Vasili M. Zinov'ev (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department "Polymer materials and propellants technology", Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: suzuk47@mail.ru).

Ludmila L. Khimenko (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Head of Department "Polymer materials and propellants technology", Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: lhimenko@yandex.ru).

Ekaterina A. Novotochinova (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department "Polymer materials and propellants technology" Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990).

Sergey A. Kotel'nikov (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department "Polymer materials and propellants technology", Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: ksa76@mail.ru).

Alena V. Sadilova (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Faculty of Aerospace, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: alexandrasadilova2012@yandex.ru).