

УДК 544.32.2+662,411.5+53.091

ВЗРЫВЧАТЫЕ СВОЙСТВА НИТРАТОВ ЦИКЛОДЕКСТРИНОВ

Ю. М. Михайлов, В. А. Гаранин, Л. Б. Романова, М. А. Рахимова,
А. В. Даровских

Институт проблем химической физики РАН, 142342 Черноголовка, lbr@icp.ac.ru

Расчетным и экспериментальным путем оценены взрывчатые свойства нитратов циклодекстринов с различной степенью замещения гидроксильных групп в циклодекстринах на нитратные группы. Показано, что заряды из нитрата β -циклодекстрина со степенью замещения 100 % при плотности 1.576 г/см³ детонируют с относительным импульсом взрыва, равным 96.4 % от его значения для состава тротил/гексоген (ТГ 50/50) плотностью 1.66 г/см³, импульс которого принят за 100 %. При этом скорость детонации составляет 7.15 км/с. Сделан вывод, что вещество относится к мощным бризантным взрывчатым веществам. Исследована чувствительность нитратов циклодекстринов к механическим воздействиям в зависимости от степени замещения. Полученные значения взрывчатых свойств и чувствительности нитратов циклодекстринов к удару и трению сопоставлены со свойствами нитроцеллюлозы.

Ключевые слова: циклодекстрины, нитраты циклодекстринов, нитроцеллюлоза, степень замещения, чувствительность к механическим воздействиям (удар, трение), относительный импульс, теплота взрыва, скорость детонации.

DOI 10.15372/FGV20220314

ВВЕДЕНИЕ

Нитраты циклодекстринов (НЦД) являются модифицированными производными циклодекстринов (ЦД) — циклических соединений, содержащих в молекуле 6, 7 или 8 глюкопиранозных звеньев (α -, β - и γ -ЦД соответственно). По составу ЦД совпадают с целлюлозой, а их нитраты — с нитроцеллюлозой, поэтому представляет интерес сопоставить их взрывчатые характеристики с данными для нитратов целлюлозы, в том числе в связи с возможностью практического использования НЦД в качестве как энергоемких соединений, так и лекарственных препаратов [1–5].

Исходя из того, что в НЦД присутствуют нитратные группы, с некоторого предела их количества в молекуле должны проявляться взрывчатые свойства, а при максимальной загрузке молекулы циклодекстрина нитратными группами полный нитрат должен обладать свойствами достаточно мощного взрывчатого вещества (ВВ).

В этой связи становится актуальным рассмотреть НЦД как энергоемкие вещества, спо-

собные к быстрому химическому превращению (взрыву), и оценить их взрывчатые характеристики: бризантность (действие взрыва), скорость детонации, а также дать более расширенное представление о чувствительности к механическим воздействиям.

В настоящее время в литературе данные по исследованию взрывчатых свойств НЦД отсутствуют. В работах, посвященных синтезу и изучению НЦД как энергоемких веществ [1–3], авторы не приводят ни экспериментальных, ни расчетных данных о параметрах, по которым можно судить о взрывчатых свойствах НЦД.

Известно, что в США для оценки таких параметров применяется методика «цилиндр-тест», с помощью которой оценивается мощность ВВ [6]. В СССР для оценки этих параметров была разработана методика по определению относительного импульса взрыва [7, 8]. Обе методики хорошо коррелируют между собой и могут использоваться для предварительной оценки действия ВВ в изделиях, использующих энергию взрыва [9].

Что касается чувствительности к механическим воздействиям, то в литературе делались попытки установить взаимосвязь между чувствительностью к удару и максимальной возможной теплотой взрыва — единственной константой, которая характеризует энергетику

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПХФ РАН 0089-2019-0005 (номер гос. регистрации АААА-А19-119101690058-9).

© Михайлов Ю. М., Гаранин В. А., Романова Л. Б.,
Рахимова М. А., Даровских А. В., 2022.

ВВ и вычисляется исходя из химического состава и энтальпии образования, в соответствии с принципом Берглю для ВВ типа $C_aH_bN_cO_d$ [10, 11]. Проведя анализ большого количества ВВ различных классов, отличающихся строением, плотностью и химическим составом, авторы пришли к выводу, что в настоящее время невозможно предсказать чувствительность исходя только из энергетики вещества. Кроме энергетических данных, существует ряд других факторов, которые влияют на чувствительность: дисперсность, дефектность и форма кристаллов, агрегатное состояние, прочность ВВ, флегматизация, а также технологические факторы: прессование, литье и др. В случае с НЦД, например, на чувствительность может оказывать влияние наличие гидрофобной полости внутри молекул.

Следует также добавить, что чувствительность зависит от конструкции приборов и методики испытаний, и в силу этого значения чувствительности для одних и тех же веществ могут существенно различаться.

В работе [12] приведены данные по оценке чувствительности к механическим воздействиям для γ -НЦД со степенью замещения гидроксильных групп в γ -ЦД на нитратные, равной 91.7 % (22 группы из 24 возможных). Однако этих данных недостаточно для полной оценки НЦД как ВВ.

Целью настоящей работы является изучение взрывчатых параметров НЦД в зависимости от их степени замещения с использованием современных методов оценки действия взрыва, а также определение чувствительности НЦД к механическим воздействиям (трению и удару) — параметра, определяющего степень опасности обращения с ними при работе и транспортировке.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы α -, β - и γ -НЦД с различной степенью замещения гидроксильных групп в ЦД нитратными группами получали нитрованием соответствующих ЦД азотной кислотой по методике, описанной в [13]. Для синтезированных веществ были найдены элементный состав, степень замещения, плотность, энтальпия образования.

Для исследования использовался пироксилин марки 1Пл вязкостью 3 Э, с объемной концентрацией оксида азота 213.2 мл/г (13.35 % N).

Содержание углерода, водорода и азота определяли методом адсорбционной пиролитической хроматографии на CHNS/O-элементном анализаторе Vario MICRO cube Elementar GmbH.

Степень замещения определяли с помощью ЯМР-спектроскопии высокого разрешения [14]. ЯМР-спектры регистрировали на спектрометре Avance III 500 МГц фирмы «Bruker» с рабочей частотой ^{13}C — 125.8 МГц, ^1H — 500 МГц, внутренний эталон — тетраметилсилан. Степень замещения рассчитывалась как отношение количества образующихся ONO_2 -групп в НЦД к максимально возможному количеству нитратных групп (18 — для α -НЦД, 21 — для β -НЦД, 24 — для γ -НЦД).

Энтальпию образования образцов НЦД определяли на основании данных о теплоте их сгорания в автоматическом калориметре АКС-ЗМУ при давлении кислорода 3 МПа по методике [15].

В табл. 1 приведены характеристики синтезированных нитратов ЦД, а также пироксилина (13.35 % N) [16] — степень замещения (СЗ), пикнометрическая плотность (ρ), энтальпия образования (ΔH_f^0).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Детонационные параметры

Особое внимание в работе уделено оценке местного действия взрыва, которое проводилось с помощью бризантометра [7]. Известно, что методика бризантометра хорошо коррелирует с другими методиками (метание пластин, разлет оболочки) и может быть применена для предварительной оценки действия ВВ в изделиях, использующих энергию взрыва [9].

В данной работе с помощью бризантометра (рис. 1) для β -НЦД со значением СЗ 100 и 76.7 %, а также для пироксилина (13.35 % N) экспериментально были определены значения относительного импульса взрыва $I_{\text{отн}}$ и скорости детонации D . Бризантность оценивалась по обжатию трех медных крешеров размером 8×13 мм (поз. 7, рис. 1). Скорость детонации измерялась с помощью датчиков, установленных на наружной поверхности гильзы (поз. 3, рис. 1).

Заряды длиной 80 мм состояли из четырех таблеток (диаметр 20 мм и высота 20 мм), прессованных при комнатной температуре при

Таблица 1

Характеристики НЦД и нитроцеллюлозы

№ п/п	Образец	СЗ, %	Брутто-формула	ρ , г/см ³	$-\Delta H_f^0$	
					кДж/моль	кДж/кг
1	β -ЦД	0	C ₄₂ H ₇₀ O ₃₅	1.462	7 239.8	6 378.2
2	β -НЦД-1	15.7	C ₄₂ H _{66.7} N _{3.3} O _{41.6}	1.502	6 504.2	5 067.3
3	β -НЦД-2	23.8	C ₄₂ H _{65.0} N _{5.0} O _{45.0}	1.526	6 387.4	4 696.3
4	β -НЦД-3	33.3	C ₄₂ H ₆₃ N ₇ O ₄₉	1.545	5 974.1	4 119.8
5	β -НЦД-4	41.4	C ₄₂ H _{61.3} N _{8.7} O _{52.4}	1.552	5 753.1	3 768.5
6	β -НЦД-5	54.8	C ₄₂ H _{58.5} N _{11.5} O ₅₈	1.596	5 704.1	3 451.6
7	β -НЦД-6	66.2	C ₄₂ H _{56.1} N _{13.9} O _{62.8}	1.630	5 845.6	3 320.1
8	β -НЦД-7	71.4	C ₄₂ H _{55.0} N _{15.0} O _{65.0}	1.638	5 040.9	2 784.6
9	β -НЦД-8	73.3	C ₄₂ H _{54.6} N _{15.4} O _{65.8}	1.640	5 357.4	2 805.1
10	β -НЦД-9	76.7	C ₄₂ H _{53.9} N _{16.1} O _{67.2}	1.645	5 350.7	2 877.2
11	β -НЦД-10	84.8	C ₄₂ H _{52.2} N _{17.8} O _{70.6}	1.653	5 424.4	2 801.8
12	β -НЦД	100	C ₄₂ H ₄₉ N ₂₁ O ₇₇	1.669	4 098.9	1 970.3
13	α -НЦД	100	C ₃₆ H ₄₂ N ₁₈ O ₆₆	1.646	3 468.3	1 945.2
14	γ -НЦД	100	C ₄₈ H ₅₆ N ₂₄ O ₈₈	1.678	4 893.1	2 058.2
15	Пироксилин (13.35 % N)	94.4	C ₆ H _{7.3} N _{2.7} O _{10.4}	1.656 [16]	754.5*	2 659.4
16	Пироксилин (13.35 % N)	94.4	C ₆ H _{7.3} N _{2.7} O _{10.4}	1.656 [16]	837.4 [16]*	3 056.4 [16]
17	Нитроцеллюлоза (14.14 % N)	100	C ₆ H ₇ O ₁₁ N ₃	1.659 [16]	799.7 [16]*	2 692.1 [16]

*Энтальпия образования — кДж/звено.

давлении 1 800 кг/см². Заряды подрывались в медной гильзе (поз. 3, рис. 1) длиной 80 мм, с внутренним диаметром, равным диаметру таблеток, с толщиной стенки гильзы 2 мм. Инициирование осуществлялось детонатором ЭД-8 через две таблетки А-IX-I (из гексогена, флегматизированного 5 % воскообразного вещества). Заряд крепился на пластинах (поз. 4, рис. 1).

Как известно, одним из важнейших параметров, влияющих на детонационные характеристики ВВ, является плотность [17], которая определяется природой вещества. В случае изготовления зарядов методом прессования на их плотность оказывает влияние способ изготовления заряда, а также способность вещества формоваться с минимальной пористостью.

Известно, что в молекуле НЦД присутствует гидрофобная полость. В связи с этим на таблетках размером 20 × 20 мм, изготовленных из β -НЦД, была определена зависимость

плотности от удельного давления прессования (табл. 2).

Исследование прессуемости β -НЦД позволило сделать вывод о том, что НЦД, несмотря на наличие в молекуле гидрофобной полости, хорошо прессуется при удельном давлении 180 МПа и имеет пористость не более 5.5 %, что соизмеримо с соответствующими величинами для штатных ВВ.

Что касается оценки параметров пироксилина (13.35 % N, СЗ 94.4 %), то следует отметить, что в большинстве случаев в литературе не указываются условия проведения эксперимента. Так, в работах [16, 18] отмечается, что на практике используются прессованные заряды из пироксилина (13.35 % N) плотностью 1.2 г/см³, а максимальная плотность заряда не превышает 1.4 г/см³, при этом режим прессования не указывается.

Поэтому нами была также определена прессуемость пироксилина (13.35 % N) при раз-

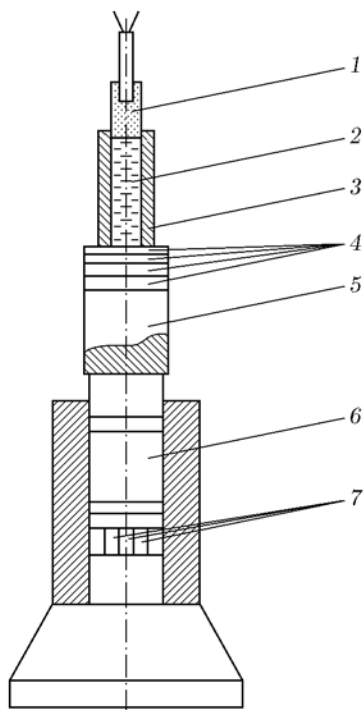


Рис. 1. Схема испытаний на бризантometре (импульсометре):

1 — бустер, 2 — заряд, 3 — гильза, 4 — сменные пластины, 5 — накладка, 6 — поршень, 7 — крешеры

Таблица 2
Зависимость плотности зарядов НЦД
от удельного давления прессования

Давление прессования, МПа	Плотность прессованных зарядов, г/см ³		
	β-НЦД (СЗ 100 %)	β-НЦД (СЗ 76.7 %)	пироксилин (СЗ 94.4 %)
100	1.320	1.320	1.240
150	1.560	1.520	1.410
180	1.580	1.557	1.420

личном удельном давлении прессования (см. табл. 2). Установлено, что плотность 1.2 г/см³ достигается при давлении 100 МПа, а максимальная плотность 1.41 ÷ 1.42 г/см³ — при давлении 150 ÷ 180 МПа.

Для полного представления о взрывчатых свойствах β-НЦД и пироксилина (13.35 % N) проведено их сопоставление с параметрами штатных составов тротил — гексоген ТГ 50/50 и А-IX-I, заряды из которых подрывали параллельно с зарядами из β-НЦД. В табл. 3 представлены полученные результаты.

Экспериментальные значения относительного импульса взрыва $I_{отн}$ для НЦД определяли по формуле [7] относительно зарядов из состава ТГ 50/50 плотностью 1.66 г/см³:

$$I_{отн} = \frac{\Delta h_m}{\Delta h_э} \cdot 100 \%,$$

где Δh_m — обжигание медных крешеров для зарядов из НЦД, пироксилина или А-IX-I, $\Delta h_э$ — обжигание медных крешеров для зарядов из ТГ 50/50.

Как видно из табл. 3, детонационные параметры β-НЦД находятся на достаточно высоком уровне.

С помощью соответствующих методик с использованием экспериментально полученных значений плотности ρ и энтальпии образования ΔH_f^0 (см. табл. 1) для НЦД и пироксилина (13.35 % N) были рассчитаны теплота взрыва $Q_{взр}$ и ее максимальное значение Q_{max} , относительный импульс $I_{отн}$ и скорость детонации D (табл. 4).

Максимально возможную теплоту взрыва вещества вычисляли способом, описанным в работе [10]:

$$Q_{max} = \frac{28.9b + 47(d - b/2) + \Delta H_f^0}{M} \cdot 1000,$$

где b, d — коэффициенты в брутто-формуле соединения $C_aH_bN_cO_d$, M — молекулярная масса соединения.

Расчет теплоты взрыва $Q_{взр}$ осуществлялся по способу, описанному в [19]. Скорость детонации D рассчитывали по методике, разработанной в [20]. Относительный импульс взрыва $I_{отн}$ вычисляли по формуле из работы [8]:

$$I_{отн} = 28.0 + 5.57\rho\sqrt{\frac{\rho(Q_{взр} - X_C C_v T_d)}{M}},$$

где X_C — количество углерода в продуктах взрыва, C_v — средняя теплоемкость углерода, T_d — температура детонации.

Как видно из табл. 3 и 4, экспериментально найденные значения $I_{отн}$ и D для β-НЦД (СЗ 100 и 76.7 %) и пироксилина (СЗ 94.4 %) практически совпадают с расчетными значениями при плотности прессованных зарядов. Расхождение находится в пределах точности определения $I_{отн}$ [8].

Таблица 3

Экспериментальные значения детонационных параметров

Образец	ρ , г/см ³	h , мм	$I_{отн}$, %		D , км/с	
			расчет	эксперимент	расчет	эксперимент
ТГ 50/50	1.66	3.92	—	100.0	—	7.55
А-IX-I	1.63	4.00	—	102.0	—	8.17
β -НЦД (СЗ 100 %)	1.576	3.78	97.1	96.4	7.23	7.15
β -НЦД (СЗ 76.7 %)	1.557	3.53	89.5	90.0	6.86	6.70
Пироксилин (13.35 % N, СЗ 94.4 %)	1.420	3.12	81.2	79.6	6.58	6.50

Таблица 4

Детонационные параметры нитратов α -, β - и γ -циклодекстринов

№ п/п	Образец	СЗ, %	ρ , г/см ³	Q_{max} , кДж/кг	$Q_{взр}$, кДж/кг	$I_{отн}$, %	D , км/с
1	β -НЦД-5	54.8	1.596	4 257.1	3 492.6	84.6	6.75
2	β -НЦД-6	66.2	1.630	4 421.7	3 508.1	87.4	6.92
3	β -НЦД-7	71.4	1.638	4 970.6	4 126.5	90.9	7.11
4	β -НЦД-8	73.3	1.640	4 829.9	4 012.2	93.8	7.07
5	β -НЦД-9	76.7	1.645	4 891.4	4 075.8	94.8	7.12
6	β -НЦД-10	84.8	1.653	4 986.1	4 182.2	96.2	7.18
7	β -НЦД	100	1.669	5 849.4	4 993.2	104.5	7.52
8	α -НЦД	100	1.646	5 874.5	4 999.5	103.1	7.46
9	γ -НЦД	100	1.678	5 761.0	4 924.1	104.4	7.52
10	Пироксилин	94.4	1.656	5 142.2	4 335.0	93.5	7.25
11	Пироксилин*	94.4	1.656	4 847.1	4 086.3	95.4	7.16
12	Нитроцеллюлоза*	100	1.659	5 128.4	4 372.3	98.2	7.28

*Исходные данные для расчетов взяты из [16].

Близость значений $I_{отн}$ и D в расчете и эксперименте подтвердила достоверность полученных результатов, что позволило расчетным путем сопоставить мощностные параметры при максимальной плотности для α -, β - и γ -НЦД (СЗ 100 %), а также для β -НЦД с различными значениями СЗ. Данные приведены в табл. 4.

Из-за отсутствия экспериментальных данных по детонационной способности β -НЦД с небольшой СЗ, с учетом того, что возможно наличие предельного и критического диаметров детонации, расчет $I_{отн}$ и D ограничен значением СЗ 50 %.

Из сравнения детонационных параметров

зарядов из β -НЦД с различными СЗ следует, что при снижении СЗ наблюдается падение значений $I_{отн}$ и D . Так, для β -НЦД с СЗ = 100 и 76.7 % экспериментальные значения $I_{отн}$ и D уменьшаются на 7.1 и 6.7 % соответственно.

Несмотря на различие химического состава, брутто-формулы, плотности, энтальпии образования, теплоты взрыва, расчетные значения $I_{отн}$ и D для α -, β - и γ -НЦД с СЗ 100 % близки (см. табл. 4).

Для НЦД (СЗ 100 %) при максимальной плотности расчетный импульс $I_{отн}$ сопоставим с параметрами для нитроцеллюлозы (СЗ 100 %) и составов ТГ 50/50 и А-IX-I (см. табл. 3, 4).

Таблица 5
Результаты испытаний чувствительности нитратов циклодекстринов
с различной степенью замещения

№ п/п	Вещество	СЗ, %	Нижний предел чувствительности	
			к удару (J), Дж	к трению (N), МПа
1	β -НЦД-2	23.8	Более 75	Более 1000
2	β -НЦД-4	41.4	35	Более 1000
3	β -НЦД-5	54.8	20	500
4	β -НЦД-7	71.4	5	300
5	β -НЦД-10	84.8	5	240
6	β -НЦД	100	5	60
7	β -НЦД (раст)	100	5	60
8	γ -НЦД	100	5	60
9	γ -НЦД [10]	91.7	4.5	210
10	Пироксилин (13.35 % N)	94.4	5	60

2.2. Чувствительность к механическим воздействиям

Оценка чувствительности НЦД к механическим воздействиям проводилась согласно рекомендациям Комитета ООН по оценке безопасности работ с ВВ «Руководство по испытаниям и критериям» [21] с использованием стандартных методик: для определения чувствительности к удару — ГОСТ 4545-88 [22], для определения чувствительности к трению — ГОСТ Р 50835-95 [23].

Для каждого подготовленного образца НЦД с известной СЗ определялся нижний предел чувствительности. Испытания на чувствительность к удару проводились путем сбрасывания груза массой 10 кг с определенной высоты. Нижний предел чувствительности — максимальная высота, при которой не происходит взрывов (J). За нижний предел чувствительности к трению принималось максимальное давление прижатия навески ВВ, при котором не происходит ни одного взрыва (N).

В табл. 5 приведены экспериментально найденные пределы чувствительности к удару и трению для β -НЦД с различными СЗ. Как показали полученные данные, поведение веществ при испытаниях существенно различается (рис. 2).

Все образцы β -НЦД с СЗ 70 ÷ 100 % имеют близкую чувствительность к удару —

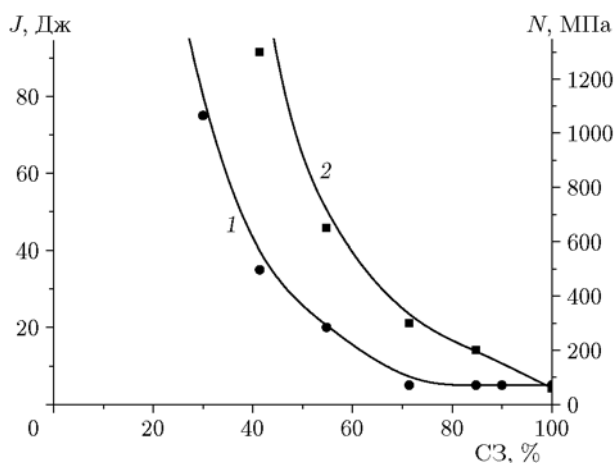


Рис. 2. Зависимости чувствительности к удару (1) и трению (2) от степени замещения β -НЦД

$J \approx 5$ Дж, и лишь при дальнейшем снижении СЗ она растет. Образцы с СЗ около 20 % не взрываются даже при падении груза 10 кг с высоты 75 см, $J > 75$ Дж.

В то же время снижение чувствительности к трению наблюдается уже при незначительном изменении СЗ. Так, если для β -НЦД с СЗ 100 % имеем $N = 60$ МПа, то для НЦД с СЗ 83 % давление прижатия будет $N = 240$ МПа. Можно отметить, что рост N при дальнейшем уменьшении СЗ ускоряется, и соединения с СЗ 40 % даже при давлении на образец 1000 МПа

не взрываются.

Показано также, что растирание кристаллов β -НЦД до мелкодисперсного состояния не оказывает влияния на чувствительность (табл. 5, поз. 7).

В работе [12] оценка чувствительности образца γ -НЦД (СЗ 91.7 %) была проведена на приборах фрикционных испытаний вращением, рекомендованных для этих целей в [21]. Полученные значения чувствительности к удару ($J = 4.5$ Дж), вследствие одинаковых конструкций приборов, практически совпадают с нашими данными (табл. 5, поз. 9). Данные по чувствительности к трению ($N = 210$ МПа) незначительно отличаются от наших данных, что можно объяснить принципиальными различиями конструкций прибора и разными методами испытания. В настоящей работе применена методика определения чувствительности к трению при ударном сдвиге (ГОСТ Р 50835-95) [21], в работе [12] использовали фрикционные испытания вращением [21].

Так как по составу НЦД совпадают с нитроцеллюлозой, было интересно сравнить их чувствительности к механическим воздействиям. Для этого в работе на образце пироксилина (13.35 % N) были определены значения J и N . Полученные данные сопоставимы с данными для β - и γ -НЦД (табл. 5, поз. 6, 8, 10).

Чувствительность к механическим воздействиям для НЦД находится на уровне таких веществ, как гексоген и тэн, для которых нижние пределы чувствительности к удару равны 7 и 5 Дж соответственно, а к трению — 200 и 150 МПа соответственно [21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы детонационные параметры нового класса соединений — нитратов циклодекстринов, для которых экспериментально и расчетным путем определены относительный импульс взрыва и скорость детонации.

Показано, что НЦД с высокой степенью замещения гидроксильных групп в циклодекстринах на нитратные являются взрывчатыми веществами с высокими детонационными параметрами и находятся на уровне мощных ВВ, таких как ТГ 50/50 и А-IX-I.

Несмотря на различие химических составов, брутто-формул и других величин, детонационные параметры α -, β - и γ -НЦД практически совпадают.

Показано также, что при максимальной плотности детонационные характеристики полностью нитрованных НЦД не уступают характеристикам нитроцеллюлозы (СЗ 100 %) и составов ТГ 50/50 и А-IX-I.

Изучена чувствительность β -НЦД к механическим воздействиям в зависимости от СЗ. Нижний предел чувствительности к удару (груз 10 кг) при СЗ 70 ÷ 100 % равен 5 Дж. При уменьшении СЗ чувствительность снижается и при СЗ = 20 % при максимальной высоте падения груза 75 см взрывы отсутствуют, $J > 75$ Дж.

При измерении нижнего предела чувствительности к трению чувствительность со своего максимального значения 60 МПа, достигаемого при СЗ = 100 %, начинает падать и при СЗ = 40 % становится равной нулю.

Нижние пределы чувствительности к механическим воздействиям НЦД близки к значениям для таких веществ, как гексоген и тэн.

Работа выполнена с использованием оборудования Аналитического центра коллективного пользования ИПХФ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. **US Pat. 5114506.** Energetic composites of cyclodextrin nitrate esters and nitrate ester plasticizers / Consaga J. P., Collignon S. L. — Publ. 19.05.1992.
2. **US Pat. 6293201.** Chemically reactive fragmentation warhead / Consaga J. P. — Publ. 25.09.2001.
3. **US Pat. 6468370.** Gas generating composition for vehicle occupant protection apparatus / Blomquist H. R. — Publ. 22.10.2002.
4. **US Pat. 6527887.** Polymeric cyclodextrin nitrate esters / Ruebner A., Statton G. L., Consaga J. P. — Publ. 04.03.2003.
5. **US Pat. 6673891.** Polymers for delivering nitric oxide in vivo / Stamler J. S., Toone E. J., Stack R. S. — Publ. 06.01.2004.
6. **Kury J. W., Hornig H. C., Lee E. L., McDonnell J. L., Ornellas D. L., Finger M., Strange F. M., Wilkins M. L.** Metal acceleration by chemical explosive // Proc. 4th Symp. (Int.) on Detonation, Silver Spring, Maryland, USA, 1965. — P. 3–13.
7. **ГОСТ 5984-80.** Вещества взрывчатые. Методы определения бризантности. — М.: Изд-во стандартов, 1980.
8. **Eremenko L. T., Nesterenko D. A., Strukov G. V., Garanin V. A.** Interrelationship between relative and chemical structure of explosive substances // Proc. 7th Int. Pyrotech. Seminar. — 1980. — V. 2. — P. 840–858.

9. Eremenko L. T., Garanin V. A., Nesterenko D. A. Interrelationship between relative detonation impulses and the effect of cumulative charges from explosives // Proc. 14th Int. Pyrotech. Seminar, Jersey, Channel Islands UK, 1989. — P. 563–568.
10. Пепекин В. И. Детонационная способность твердых взрывчатых веществ // Хим. физика. — 2011. — Т. 30, № 1. — С. 20–24.
11. Нестеренко Д. А., Гаранин В. А., Казаков А. И., Корепин А. Г., Романова Л. Б. Энергетические свойства и чувствительность к удару кристаллических взрывчатых веществ // Хим. физика. — 2014. — Т. 33, № 10. — С. 46–57. — DOI: 10.7868/S0207401X14100094.
12. Maksimowski P., Grzegorzczak A., Cieślak K., Gołofit T. et al. γ -Cyclodextrin nitrate/CL-20 complex: preparation and properties // Propell., Explos., Pyrotech. — 2019. — V. 44, N 2. — P. 207–216. — DOI: 10.1002/prep.201800301.
13. Михайлов Ю. М., Романова Л. Б., Тарасов А. Е., Рахимова М. А., Даровских А. В., Баринова Л. С. Исследование процесса получения нитратов циклодекстринов // Журн. прикл. химии. — 2018. — Т. 91, № 7. — С. 1049–1054. — DOI: 10.1134/S0044461818070174.
14. Романова Л. Б., Баринова Л. С., Лагодзинская Г. В., Казаков А. И., Михайлов Ю. М. Получение и анализ методом ЯМР нитратов бета-циклодекстрина // Журн. прикл. химии. — 2014. — Т. 87, № 12. — С. 1809–1815.
15. Казаков А. И., Далингер И. Л., Зюзин И. Н., Лемперт Д. Б., Плишкин Н. А., Шереметев А. Б. Энтальпии образования 3,4- и 3,5-динитро-1-триметил-1-пиразолов // Изв. АН. Сер. хим. — 2016. — № 12. — С. 2783.
16. Dobratz V. M. LLNL Explosives Handbook Properties of Chemical Explosives Simulants. — LLNL, USA, 1981.
17. Апин А. Я., Бардин Е. П., Велина Н. Ф. Влияние плотности и состава взрывчатого вещества на импульс взрыва // Взрывное дело. — М.: Горгостехиздат, 1963. — № 52/9. — С. 90–102.
18. Хмельницкий Л. И. Справочник по взрывчатым веществам. — Ч. II. — М.: Изд-во ВАИА им. Ф. Э. Дзержинского, 1962.
19. Пепекин В. И., Махов М. Н., Лебедев Ю. А. Теплоты взрывчатого разложения индивидуальных ВВ // Докл. АН СССР. — 1977. — Т. 232, № 4. — С. 852–855.
20. Пепекин В. И., Лебедев Ю. А. Критерий оценки параметров детонации ВВ // Докл. АН СССР. — 1977. — Т. 234, № 6. — С. 1391–1394.
21. Recommendation on the Transport of Dangerous Goods: Manual of Test and Criteria. — 5th ed. — New York and Geneva: UN, 2009.
22. ГОСТ 4545-88. Методы определения характеристик чувствительности к удару. — М.: Изд. Гос. комитета СССР по стандартам, 1988.
23. ГОСТ Р 50835-95. Методика определения характеристик чувствительности к трению при ударном сдвиге. — М.: Госстандарт России, 1995.

Поступила в редакцию 06.07.2021.

Принята к публикации 26.08.2021.