

ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ НИТРОЦЕЛЛЮЛОЗЫ С НИТРОГЛИЦЕРИНОМ НА ПАРАМЕТРЫ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ МОДЕЛЬНЫХ ПОРОХОВ

Ключевые слова: порох, горение, температурный профиль, Нитроцеллюлоза, Нитроглицерин.

Изучен температурный профиль в волне горения простых двухкомпонентных образцов – нитроцеллюлоза - нитроглицерин в широком диапазоне их соотношения, что обеспечило их различия по энергетическим, физико-механическим и баллистическим характеристикам. Горение изученных порохов соответствует модели горения с ведущей реакцией в конденсированной фазе, но при различной скорости горения они имеют одинаковую величину температуры поверхности (T_n) (при всех давлениях её значение выше температуры кипения нитроглицерина). Таким образом, для указанных образцов нет корреляции между скоростью горения и величиной T_n .

Keywords: propellant, combustion, temperature distribution, Nitrocellulose, Nitroglycerin.

The temperature distribution in combustion wave of simple two-component system - nitrocellulose, nitroglycerin in a wide range of ratios, ensuring their differences on energetic, physicomachanical and ballistic properties is studied. Combustion of the investigated propellants corresponds to the combustion model with leading reaction in condensed phase, but at various combustion rate they possess same value of combustion surface temperature (T_s) (at all pressure range it's value is higher than boiling temperature of nitroglycerin). Thus, for these specified samples there is no correlation between combustion rate and T_s value.

В фундаментальной работе [1] установлено, что горение среднекалорийного пороха Н (теплота горения ($Q_{ж}$) = 3800 кДж/кг) и высококалорийного пороха НБ ($Q_{ж}$ = 4918 кДж/кг), а также нитроцеллюлозы (НЦ), соответствует модели горения с ведущей (лимитирующей) реакцией в конденсированной фазе (к-фазе). Этой реакцией является взаимодействие диоксида азота с промежуточными продуктами распада НЦ и нитроглицерина (НГЦ) с энергией активации (E_k) равной ~83 кДж/моль, при этом массовая скорость горения (U_m) однозначно определяется величиной температуры поверхности (T_n)

$$U_m = 1800 \exp(-5000/T_n), \text{ г/см}^2 \cdot \text{с} \quad (1)$$

В [2, 3] показано, что и при горении низкокалорийных порохов ($Q_{ж}$ = 2189 и 2518 кДж/кг), значение E_k близко к указанной выше величине. Однако, величина T_n для таких порохов несколько выше, чем для пороха Н, который горит в ~1,5 - 2,2 раза быстрее, т.е. данные [2,3] не укладываются в зависимость (1). Это объяснено тем, что в низкокалорийных порохах содержится большое (~20%) количество термостойких и высококипящих пластификаторов (динитротолуола (ДНТ) и дибутилфталата (ДФБ)) и для исчезновения к-фазы (за счет разложения и диспергирования) необходима высокая степень распада НЦ и НГЦ в к-фазе (количество НГЦ в составах составляет всего 14 и 18%), что и обеспечивается повышенным значением T_n по сравнению с величиной, рассчитанной по уравнению (1) по экспериментальной скорости горения. В некоторых работах рассматривается вопрос о том, какие факторы влияют на величину температуры поверхности: в [4] отмечается, что для пороха Н величина T_n равна температуре кипения (T_k) смеси НГЦ и ДНТ; в [5] она близка к T_k НГЦ; в [6] значение T_n отнесено к температуре кипения жидкого реакционного слоя к-фазы; в [7] показано,

что для высококалорийного пороха, содержащего по 49% НГЦ и НЦ, значение T_n выше температуры кипения пластификатора.

В целом можно считать, что вопрос о том, какие факторы определяют фундаментальную для механизма горения порохов величину T_n , и может ли быть однозначная зависимость скорости горения от T_n для порохов, существенно отличающихся по составу, исследован недостаточно и фактически не решен. Для его выяснения в данной работе изучен температурный профиль в волне горения простых двухкомпонентных образцов - НЦ-НГЦ в широком диапазоне их соотношения (табл. 1, в каждом образце содержится по одному проценту централита и вазелинового масла), что обеспечило их различия по энергетическим характеристикам, по физико-механическим свойствам, в частности по вязкости, а также, по скорости горения, которую определяли в приборе постоянного давления в атмосфере азота на образцах диаметром 7 мм, запрессованных в плексигласовые трубки.

Указанные различия должны повлиять как на тепловой эффект реакций в к-фазе, так и на глубину диспергирования, которое при горении регулирует величину T_n и скорость горения [8].

Таблица 1 - Состав и некоторые характеристики образцов

Обр.	НГЦ/ НЦ	T_p (4 МПа), К	$Q_{ж}$, кДж/кг	$U_{(4 \text{ МПа})}$, мм/с	v
1	70/30	3207	5985	11,2	0,63/0,88
2	60/40	3133	5619	9,7	0,64/0,82
3	50/50	3022	5253	8,6	0,72
4	40/60	2874	4888	7,6	0,71
5	30/70	2700	4522	7	0,7

При увеличении содержания НГЦ в образцах от 30 до 70% увеличивается $Q_{ж}$, температура (табл.1) и скорость горения (например,

при давлении 2 МПа в 1,7 раза, а при 18 МПа в 2 раза) (рис.1). Для образцов 3, 4, 5 скорость горения почти в одинаковой степени зависит от давления в интервале 1-20 МПа - значение v в законе скорости горения $U=Br^v$ близко к 0,7, а для образцов 1 и 2 (с более высоким содержанием НГЦ) до давления 5,5 МПа значение v несколько меньше (~0,63) а выше 5,5 МПа - несколько больше (0,88 и 0,82).

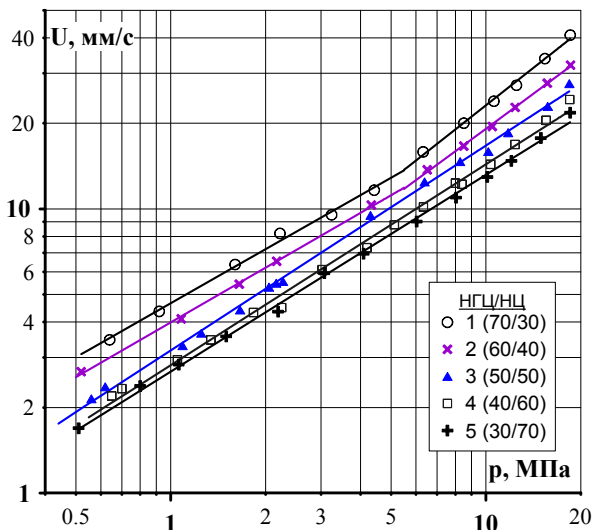


Рис. 1 - Зависимость скорости горения от давления исследованных образцов

Температурный профиль в волне горения порохов определяли по методике [9] с помощью вольфрам-рениевых термодпар толщиной 5 мкм. При каждом давлении проводили от 6 до 15 опытов. Для образца 1 ввиду его высокой скорости горения опыты проводили при давлении до ~2,5 МПа, а для остальных образцов - до давления ~4,5 МПа.

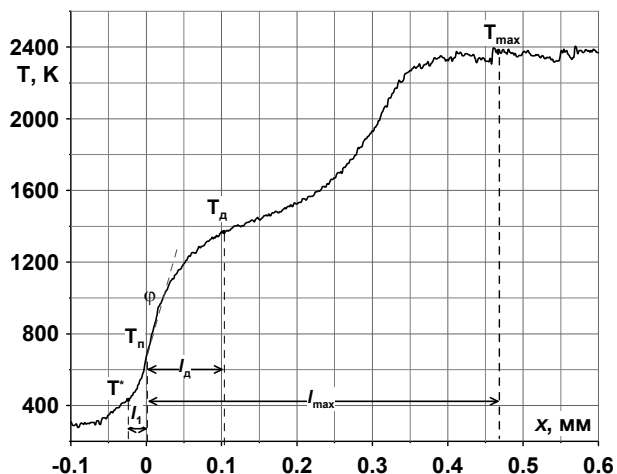


Рис. 2 - Типичный профиль температуры с характерными точками при $p = 2,3$ МПа (образец 2)

Исходные осциллограммы температура - время ($T(t)$) для всех составов имеют сложный характер. На них можно выделить несколько точек, в которых происходит изменение градиента температуры. За температуру поверхности (T_n) принимали точку характерного перегиба - изменение выпуклости кривой на вогнутость, что соответствовало выходу спая термодпары из к-фазы в

газовую. После этого осциллограмму ($T(t)$), зная скорость горения, перестраивали в зависимость температуры от расстояния x от поверхности горения (рис. 2). На всех кривых $T(x)$ отмечали характерные температуры и ширину различных зон: l_1 - ширина прогреваемого слоя к-фазы, на которой разогрев падает в e раз; T_d и l_d - температура в дымогазовой зоне (первичное пламя) и ее протяженность; $\phi = dT/dx$ - градиент температуры, который использовали для расчета теплового баланса к-фазы при горении пороха, вычисляли на расстоянии 50-100 мкм от поверхности горения; T_{max} - максимальная температура в газовой зоне; l_{max} - расстояние от T_n до T_{max} .

Основные результаты обработки осциллограмм заключаются в следующем:

Значения T_n для всех порохов одинаковы (рис.3) и с ростом давления в интервале 0,5-5 МПа увеличиваются с 613К до 723К (на 110К), при этом они выше температуры кипения НГЦ (пунктир), которую рассчитывали по зависимости давления упругости паров НГЦ, установленную в диапазоне температуры 298÷333К: $\ln p (\text{Па}) = 29,71 - 9543 \cdot T_n^{-1} (\text{K})$ [10]. Различие (ΔT) между этими температурами увеличивается с ростом давления: при $p = 1$ МПа $\Delta T \sim 30\text{K}$, а при 5 МПа $\sim 55\text{K}$.

Характерная ширина прогреваемого слоя ($l_1 = \chi/U$), на котором разогрев падает в e раз, для всех образцов практически одинакова и слабо зависит от давления. Это означает, что образцы имеют различный коэффициент температуропроводности (χ), который возрастает с увеличением содержания НГЦ.

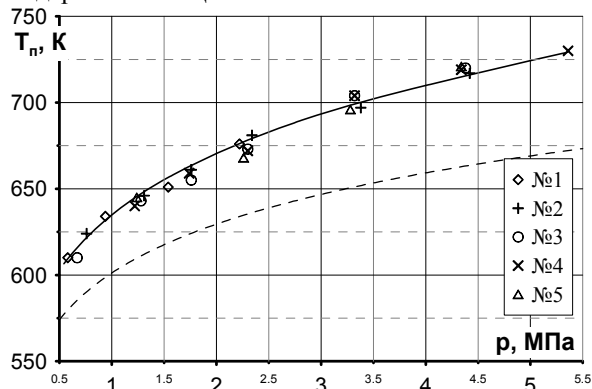


Рис. 3 - Зависимость T_n от давления образцов

Температуру T_d в первом пламени (в пародымогазовой зоне) возможно было выделить при давлении до 2-2,5 МПа. С повышением давления от 0,5 МПа до 2 МПа она увеличивается довольно слабо. Наибольшую температуру имеет образец №1 с наибольшим содержанием НГЦ, для которого температура возрастает от 1370 до 1440К, а наименьшую (на ~100К)- образец 5 с наименьшим его количеством. Значения T_d для образцов 2,3 и 4 почти не отличаются и находятся между значениями для образцов 1 и 5 (табл. 2).

По протяженности дымогазовой зоны (l_d) между образцами с максимальным и минимальным содержанием НГЦ имеется гораздо более сильное различие, чем по значению T_d : образец 5 имеет в

6÷7 раз большую протяженность, чем образец 1; значения l_d для образцов 2, 3 почти одинаковы (табл. 2).

Таблица 2 - Параметры газовой зоны исследованных образцов

	ρ, МПа	Образец				
		1	2	3	4	5
T _д , К	1	1410	1360			1320
	2	1440	1390			1340
l _д , мм	1	0,075	0,095		0,185	0,493
	2	0,058	0,075		0,089	0,4
φ·10 ⁻⁴ , К/см	1	18,5	11			2,8
	2	21,8	13			4
	3	23,1	14			4,2
	4	23,5	15			4,4
T _{max} , К	1	1455	1450	1445		1445
	2	2465	2260	2050		1640
	3	2525	2380	2255		2085
	4	2555	2415	2285		2150
l _{max} , мм	1	0,5	1,4			6,4
	2	0,28	0,6			4,6
	3	0,19	0,3			2,8
	4	0,17	0,2			1,1

По градиенту температуры (Φ) над поверхностью горения образца располагаются в обратном порядке (табл. 2): наибольшее значение Φ имеет образец 1 с наибольшим содержанием НГЦ, которое при $p = 1$ МПа в ~ 6 раз больше, чем у образца 5 с наименьшим количеством НГЦ. Учитывая то, что скорость оттока газов от поверхности горения для образца 1 в $\sim 1,8$ раз выше, чем для образца 5 времени завершения реакций в этой зоне различаются более чем в 10 раз.

Максимальная температура горения при давлении 1 МПа незначительно выше T_d , а затем в интервале давления от 1,5÷2 МПа, следует резкий её скачок, что связано с появлением вторичного пламени, после чего температура плавно возрастает и достигает максимального значения при давлении 3-4 МПа (табл. 2). Для всех образцов значение T_{max} при 4 МПа значительно (500÷700K) ниже расчетных значений (табл. 1.). Это обусловлено теплотериями термопарой за счет излучения [9]. Чем выше температуры горения (T_r), тем выше теплотери, которые пропорциональны $\sim T_r^4$. Как показано в [11], для образца 3 расчетные теплотери составляют $\sim 650K$.

Расстояние l_{max} (от поверхности горения до зоны с максимальной температурой) для всех образцов с увеличением давления сокращается (особенно резко для образца 5, при этом, между образцами имеется такое же различие, как и по протяженности дымогазовой зоны; при давлении ~ 2 МПа значение l_{max} для образца 1 с 70% НГЦ почти в

16 раз меньше, чем образца 5 с 30% НГЦ. С учетом скорости движения газов от поверхности горения (для образца 1 она выше почти в ~ 2 раза, чем для образца 5) получается, что время завершения всех газовых реакций для образца с 70% НГЦ в 32 раз меньше, чем для образца с 30% НГЦ. Следовательно, вторичные экзотермические реакции в газовой зоне при горении НГЦ идут гораздо быстрее, чем для НЦ. Это очевидно, следует отнести и к к-фазе, так как при $p = 1$ МПа желатина НГЦ горит в $\sim 3,7$ раз быстрее НЦ [12].

Значительное расхождение между экспериментальными и расчетными значениями температуры горения при более низком давлении (когда вторичного пламени нет) связано, как это общеизвестно, с четко выраженной двухстадийностью восстановления NO_2 (в первом пламени $NO_2 \rightarrow NO$, а во втором – $NO \rightarrow N_2$).

Прежде чем перейти к расчету теплового баланса к-фазы при горении порохов рассмотрим возможные физико-химические процессы, протекающие в прогретом слое к-фазы. Известно, что пороха представляют собой раствор НГЦ в НЦ, при этом процесс растворения является экзотермическим. При содержании НГЦ в системе не более 30% он весь энергетически связан с полимером, т.е. образуются сольваты: при 30% НГЦ на два глюкопиранозных цикла НЦ приходится одна молекула НГЦ (взаимодействуют две первичные нитратные группы НГЦ: энтальпия сольватации $\Delta H_{сол} = 22$ Дж/г) [13].

При концентрации 50% НГЦ (более 1 молекулы на 1 звено НЦ) энергетическое взаимодействие, связанное с сольватацией, менее значительно ($\Delta H_{сол} \sim 17$ Дж/г) и почти полностью исчезает при содержании НГЦ около 70 масс.% ($\Delta H_{сол} \sim 0$). Это равно пределу растворимости НГЦ в НЦ.

С увеличением температуры термодинамическое сродство компонентов снижается [13] и должны происходить десольватация НГЦ (на это затрачивается $\Delta H_{дес}$) и расслоение системы с образованием свободного НГЦ. При этом возможно, что часть НГЦ может превращаться в парообразное состояние в слое с температурой $T_k - T_n$ поскольку значения $T_k < T_n$. Поэтому в тепловом балансе к-фазы необходимо учитывать затраты тепла на десольватацию и на испарение неразложившейся части НГЦ. Степень первичного разложения (η) НЦ и НГЦ (табл. 3) рассчитывали по формуле:

$$\eta = 1 - \exp(-Kt) \quad (2)$$

Использовали обобщенные значения констант скорости первичного распада НЦ ($K = 10^{16,9} \exp(-175728/RT_n)$) [14] и НГЦ ($K = 10^{16,8} \exp(-171000/RT_n)$) [15]. t - время существования реакционного слоя к-фазы равно ширине реакционного слоя к-фазы ($l_{p.c.}$) деленной на скорость горения; в соответствии с [16] $l_{p.c.} = l_1 RT_n^2 / E_k (T_n - T_0)$. По экспериментальным значениям T_n и E_k второй множитель равен $\sim 0,1$. Тогда $l_{p.c.} = 0,1 \cdot l_1 = 0,1 \cdot \chi / U$ и $t = 0,1 \cdot \chi / U^2$.

Таблица 3 - Расчет степени распада основных компонентов в реакционном слое к-фазы и результаты теплового баланса образцов

	p, МПа	Образец				
		1	2	3	4	5
$\eta_{\text{НЦ}}, \%$	1	11	12	15	17	56
	2	41	46	52	57	97
	3	70	75	80	84	100
	4	87	90	93	95	100
$\eta_{\text{НГЦ}}, \%$	1	20	23	28	30	80
	2	63	68	74	79	100
	3	88	92	94	96	100
	4	97	98	99	99	100
$Q_k, \text{Дж/г}$	1	522	553	494	451	494
	2	506	542	507	482	533
	3	500	539	524	511	574
	4	518	555	549	540	602
$\varepsilon, \%$	1	76	83	78	74	92
	2	79	86	83	80	93
	3	82	88	86	84	95
	4	84	89	87	86	95
$\varepsilon', \%$	1	67	77	72	68	92
	2	76	84	81	79	93
	3	81	87	85	83	94
	4	84	88	87	85	95
$Q^x, \text{Дж/г}$	2	1345	1247	1197	1190	1182
	4	1393	1324	1289	1280	1272
$100 \cdot Q_k / Q^x, \%$	2	38	43	42	41	45
	4	37	42	43	42	47

Из табл. 3 видно, что для образца 5, имеющего наименьшую скорость горения, и, следовательно, наибольшее время существования реакционного слоя (τ), высокая степень первичного распада компонентов достигается уже при 1 МПа (для НГЦ - 80% и для НЦ - 56%), которая при давлении ≥ 2 МПа величина η близка к 100%. С повышением содержания НГЦ (т.е. уменьшением τ) значение η закономерно уменьшается: например, для образца 1 при давлении 1 МПа значение η для НГЦ в 4 раз, а для НЦ в 5 раз меньше, чем для образца 5. Однако, уже при $p = 2$ МПа степень распада компонентов в образце 1 достигает значительных величин.

Тепловой баланс к-фазы рассчитывали по формуле

$$C_p(T_p - T_0) + \Delta H_{\text{дес}} + (1 - \eta) \cdot m_{\text{НГЦ}} \cdot \Delta H_{\text{и}} = Q_k + Q_{\lambda},$$

где

C_p – теплоемкость пороха, 1,46 Дж/г.К;

$m_{\text{НГЦ}}$ – массовая доля НГЦ в порохе;

$\Delta H_{\text{и}}$ – энтальпия испарения НГЦ, 349,6 Дж/г [10];

$\Delta H_{\text{дес}}$ – энтальпия десольватации НЦ–НГЦ системы, Дж/г;

$Q_{\lambda} = (\lambda / \rho U) \cdot \Phi$ – тепло, приходящее из газов теплопроводностью, Дж/г;

$\lambda = (0,699(T)^{1/2} - 11,18) \cdot 10^{-4}$ Дж/см.с.К – коэффициент теплопроводности газовой фазы [1];

ρ – плотность пороха, 1,6 г/см³;

Q_k – тепло, выделяемое в к-фазе, Дж/г;

$\varepsilon = 100 \cdot Q_k / (Q_k + Q_{\lambda})$ – относительная доля Q_k в тепловом балансе, %.

ε' – относительная доля Q_k в тепловом балансе без учета затраты тепла на десольватацию и испарение, %.

Для всех образцов видно, что основное количество тепла, необходимого для распространения горения выделяется в к-фазе (табл. 3). Поэтому для них можно использовать формулу $U_m = A \exp(-E_k / 2RT_p)$. Экспериментальные точки для каждого образца в координатах $U_m(1/T_p)$ расположены на прямых (рис. 4), имеющих близкий угол наклона и, соответственно, близкие значения энергии активации (E_k): в нашем случае они равны 90, 89, 88 и 87 (для образцов 4 и 5) кДж/моль соответственно, что близко к значению E_k для всех ранее изученных порохов различного состава [1-3]. Но при этом единой зависимости U_m от величины T_p не наблюдается (образцы с различной скоростью горения имеют одинаковую величину T_p).

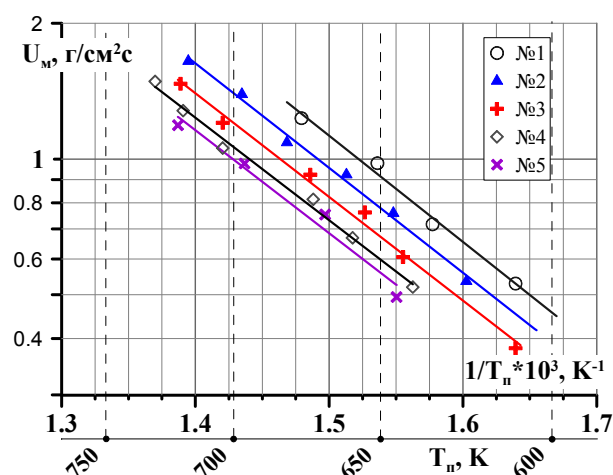


Рис. 4 - Зависимость массовой скорости горения от T_p образцов

Для выяснения причины этого, прежде всего, оценим реальность (правильность) полученных значений T_p и соответствие их результатам теплового баланса к-фазы.

Из табл. 3 видно, что значения Q_k составляют 37-47% от максимально возможного тепловыделения в к-фазе (Q^x) без её диспергирования при полном восстановлении NO_2 до NO . Следовательно, степень диспергирования к-фазы составляет 63-53%.

В соответствии с моделью горения порохов степень протекания вторичных экзотермических реакций, т.е. степень расходования NO_2 групп, меньше, чем степень первичного распада, т.е. образования NO_2 . Из табл. 3 видно, что для образцов 2-5 при 2 МПа и выше степень распада НГЦ и НЦ выше значений η для вторичных реакций. Следовательно, полученные величины T_p достаточно надежны, и отвечают условиям модели горения с ведущей вторичной реакцией в к-фазе.

При давлении 1 МПа расчетные значения η для первичной реакции разложения образцов 1, 2 и 3 несколько меньше величины η для вторичных реакций. Это может быть связано с тем, что использованные при расчете константы скоростей первичной реакции отрыва NO_2 от нитроэфиров, вероятно, могут быть несколько заниженными, так как они вычислены по начальным скоростям выделения всех газов, а не только NO_2 . Кроме того, часть НГЦ в реакционном слое в к-фазе может находиться (особенно при пониженном давлении) в парах, скорость распада которых, например, при $T_p = 630\text{K}$ ($p = 1$ МПа) в 2 раза выше, чем жидкого НГЦ.

Теперь рассмотрим вопрос, почему образцы 1 и 5, имея одинаковую температуру поверхности, отличаются (в 1,7-2 раза) по скорости горения.

Из формулы 2 следует, что степень первичного распада компонентов определяется константой скорости и временем существования реакционного слоя, которое равно $\sim 0,1 \cdot \chi/U^2$. Для обоих образцов значения константы скоростей первичного распада компонентов равны, так как равны T_p , а значения t для образца 5 значительно (в 3-4 раза) больше, чем для образца 1. Следовательно, для образца 1 степень распада компонентов будет меньше, чем для обр. 5 (отметим, что значения η для НГЦ в 1,1-1,8 раза выше, чем для НЦ, поскольку её константа разложения в 1,7-1,9 раза меньше, чем у НГЦ).

С увеличением давления значения η возрастают, например, для НГЦ в образце 1 при давлении 2, 3, 4 МПа они равны 63, 88 и 97% соответственно, а для образца 5 величина η близка к 100% (табл. 3). Однако, абсолютное количество разложившегося НГЦ или НЦ зависит не только от η , но и от их массовой доли (m) в образце и равно $m \cdot \eta$ (г/г пороха). Так, при давлении 2 МПа количество разложившегося НГЦ в образце 1 равно 0,43 г/г пороха, а в образце 5 - 0,29 г/г пороха. При давлении 3 МПа эти величины равны 0,61 и 0,29 соответственно. При дальнейшем увеличении давления это количество для образца 1 будет приближаться к 0,7, а для образца 5 - не изменится. Исходя из того, что скорость горения НГЦ значительно (в ~4 раза) выше, чем НЦ, следует, что скорость вторичных экзотермических реакций окисления (W), определяющая скорость горения, в ~16 раз выше, чем для НЦ ($U \sim \sqrt{W}$).

Остановимся также на некоторых отличиях образцов 1 и 5 по характеристикам температурного профиля в газовой зоне. Для образца 5 протяженность дымогазовой и всей газовой зоны значительно больше, особенно при пониженном давлении, чем для образца 1. В целом это связано с тем, что реакционная способность НГЦ выше чем НЦ и в частности с тем, что при распаде НЦ, обладающей отрицательным кислородным балансом, образуются сажиные частицы, которые эндотермически реагируют с CO_2 и H_2O , приводя к уменьшению скорости тепловыделения и расширению зон над поверхностью горения.

Заключение

Основной вывод работы состоит в том, что, несмотря на различную (до двух раз) скорость горения изученных образцов с различным соотношением НЦ с НГЦ, они имеют одинаковую величину температуры поверхности, которая выше температуры кипения НГЦ. Таким образом, для указанных образцов нет корреляции между скоростью горения и величиной T_p . Это связано с тем, что чем больше содержание в образце НГЦ, при горении которого скорость вторичных экзотермических реакций, определяющих скорость горения, выше, чем для НЦ, тем за меньшее время существования реакционного слоя ($t = 0,1 \cdot \chi/U^2$) при той же T_p , что и для образца с более низким содержанием НГЦ, выделяется необходимое количество тепла для распространения горения.

Кроме того, с увеличением в образцах количества НГЦ создаются более благоприятные условия для диспергирования реакционного слоя к-фазы, что препятствует дальнейшему росту температуры поверхности и скорости горения.

Однозначной зависимости скорости горения от температуры поверхности для широкого круга порохов, значительно отличающихся по составу и энергетике, трудно ожидать, так как величина T_p должна зависеть от многих факторов (наличие и количество дополнительных пластификаторов (ДНТ, ДБФ и др.), соотношение полимера с пластификаторами, присутствие в составе термостойких ВВ, катализаторов). Исследования в этом направлении необходимо продолжить.

Литература

1. Зенин, А. А. Процессы в зонах горения баллистических порохов: физические процессы при горении и взрыве – М.: Атомиздат, 1980. – 176 с.
2. Механизм горения низкокалорийных порохов: Успехи в специальной химии и химической технологии: Труды Всероссийской научно-технической конференции, посвящённой 75-летию основания Инженерного химико-технологического факультета РХТУ им. Д.И. Менделеева, -М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. 2010. – С. 300-305.
3. Денисюк, А.П. Особенности профиля температуры в волне горения низкокалорийных порохов / А.П. Денисюк, Е.З. Тве // Физика горения и взрыва. – 2011. – Т.47, № 2. – С. 66-73.
4. Ковальский, А.А. О горении нитроглицеринового пороха / А. А. Ковальский, Э. В. Конев, Б. В. Красильников // Физика горения и взрыва. – 1967. № 4. – С. 547-553.
5. Денисюк, А.П. Температурные профили при горении баллистического пороха с аномальной зависимостью скорости горения от давления / А. П. Денисюк, А. Е. Фогельзанг // Изв. ВУЗ. Химия и химическая технология. 1971. Т. 14, вып. 6. – С. 861-864.
6. Колесов, В.И. Влияние производных тетразола на горение ВВ и порохов: дис. ... канд. хим. наук / Василий Иванович Колесов – М.: РХТУ им. Д.И.Менделеева. 2001. – 136 с.
7. Особенности горения пороха с высоким содержанием нитроглицерина: Успехи в специальной химии и химической технологии: Труды Всероссийской научно-технической конференции, посвящённой 75-летию основания Инженерного химико-технологического

- факультета РХТУ им. Д.И. Менделеева, -М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. – 2010. – С. 311-316.
8. *Мержанов, А.Г.* О роли диспергирования при горении порохов // ДАН СССР. 1960. Т. 135, № 6. – С. 1439-1441.
 9. *Зенин, А.А.* Изучение распределений температуры при горении конденсированных веществ: дис. ... канд. физ.-мат. наук / А. А. Зенин – М.: ИХФ АН СССР. 1962. – 164 с.
 10. *Шао Цзыцян.* термодинамика пластификации нитратов целлюлозы нитратами ди- и три-этиленгликоля : дис. ... канд. хим. наук. / Шао Цзыцян – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. 1998. – 128 с.
 11. *Денисюк, А. П.* Взаимодействие углеродных материалов с пороховыми газами / А. П. Денисюк, Ю. Г. Шепелев // Физика горения и взрыва. 1989. № 4. – С. 25-32.
 12. *Андреев, К. К.* Термическое разложение и горение взрывчатых веществ / К.К. Андреев – М.: 1966. – 346с.
 13. *Lotmentsev, Yu.M.* Phase State of Nitro- celluloses Plasticized with Trinitroglycerin / Yu. M. Lotmentsev, D. V. Pleshacov // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1997. Vol.22. – p. 203-206.
 14. *Александров, В. В.* Кинетика тепловыделения в конденсированной фазе пироксилина при повышенных температурах / В. В. Александров, С. С. Хлевной // ПМТФ. 1970. №1. – С. 158-163.
 15. *Лурье, Б. А.* Кинетические характеристики первичной стадии термического распада органических нитратов / Б. А. Лурье, Б. С. Светлов // Кинетика и катализ. 1994. Т. 35, №2. – С. 165-175.
 16. *Аристова, З. И.* О прогреве поверхности горящего пороха / З. И. Аристова, О. И. Лейпунский // ДАН СССР. 1946. Т. II V, №6. – С. 507-509.

© **Е Зо Тве** – канд. техн. наук, докторант РХТУ им. Д.И. Менделеева, yezawhtwe@mail.ru; **А. П. Денисюк** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ХТВМС РХТУ им. Д.И. Менделеева, denisap@rctu.ru.