

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И РАСЧЁТ ВЕСА ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ВОСОПЛАМЕНИТЕЛЯ ДЛЯ АРТИЛЛЕРИЙСКОГО ЗАРЯДА

незначительно отличающуюся от функции распределения Ферми-Дирака.

### **Заключение**

Предложен метод количественного описания возбужденных состояний электронов многоатомных систем с учетом ширины энергетических уровней. Показано, что атом лития, помещенный в поле большой интенсивности, сравнимое с интенсивностью поля в самом атоме, может перейти в возбужденное состояние с полной энергией, меньшей энергии основного состояния, и пребывать в таком состоянии неограниченно долго. Обнаружены неограниченно долго живущие возбуждения в двух-, трех- и четырехатомных кластерах в полях реально достижимых интенсивностей при расстояниях между атомами вблизи 3, 6 и 13 боровских радиусов. Состояния кластеров с расстояниями между атомами вблизи 6 боровских радиусов обладают наименьшими значениями действительной части полной энергии. Они стабильны и при отсутствии внешних возбуждений. Другие состояния кластеров с расстояниями между атомами вблизи 3 и 13 боровских радиусов также обладают неограниченно большим временем жизни, но только в условиях внешних воздействий. На примере металлического лития показано, что в рамках зонной теории

можно вычислить и функцию распределения электронов, следовательно, проводить описание и кинетических свойств материала. При этом не суть важно, каким является это возбуждение: тепловым, электромагнитным, вакуационным, примесным, или вызвано другим нарушением строгой периодичности кристаллической решетки.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Янавичус, А. Водородные волновые функции, учитывающие ширину уровня // А. Янавичус, В. Шучуров. - Литовский физический сборник. - 1968, т. 8, №1-2. С. 47-51.
2. Попов, А.В. Решение спектральной задачи для электронов в атоме, учитывающей ширину энергетических уровней // А.В. Попов. - Оптика и спектроскопия. - 2002, т. 93, №1. С. 5-7.
3. Попов, А.В. Конденсат возбужденных состояний в бериллии // А.В. Попов. - ФТТ. - 2008, т. 50, №8. С.1530-1534.

*Д.ф.-м.н., проф. В.В. Попов - Алтайский Государственный технический университет, кафедра общей физики, pva379@mail.ru, (385-2)29-08-52; д.т.н., проф. П. Ю. Гуляев - Югорский государственный университет, кафедра физики, templog858@ntsru.info, (2367) 35-75-95; д.ф.-м.н., проф. Б.В. Семкин - Алтайский Государственный технический университет, кафедра естествознания и системного анализа, (385-2)29-09-66.*

УДК: 531.571 + 531.57

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И РАСЧЁТ ВЕСА ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ВОСОПЛАМЕНИТЕЛЯ ДЛЯ АРТИЛЛЕРИЙСКОГО ЗАРЯДА

Леонов Г.Н.

Рассмотрены физические процессы при воспламенении артиллерийских зарядов. Для отечественного дымного пороха приведено стехиометрическое соотношение для его горения. На основе решения сопряжённой задачи теплопроводности приведена методика оценочного расчёта веса дополнительного воспламенителя.

**Ключевые слова:** артиллерийский заряд, дополнительный воспламенитель, дымный ружейный порох, продукты горения, кондуктивно-очаговое зажжение

При делении арт.выстрела на периоды первым периодом является так называемый предварительный период. Он длится от начала срабатывания капсюля воспламенителя и воспламенения основного заряда до момента начала движения снаряда, т.е. до момента форсирования. При баллистическом проектировании арт.выстрела рассчитывается форма, размеры (сгорающий свод) и вес

заряда. Давление форсирования, как правило, задается по соображениям последующего согласования с экспериментальными данными отстрела. Все, что связано в предварительном периоде с воспламенением, зачастую определяется весьма приближенно. Поэтому итоговая доработка выстрела во многом определяется экспериментальной отработкой, т.е. стрельбами. При этом исходят из

минимизации разброса основных баллистических характеристик при различных начальных температурах от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$  для выстрелов среднего и крупного калибров. В тоже время, конструкция воспламенительного узла может иметь весьма сложное строение. На способ организации воспламенения в арт. выстреле определяющее влияние оказывает калибр выстрела, тип пороха (его форма и природа), переменностью основного заряда, тип огнестрельного оружия и выстрела в целом. Стрелковое оружие и пушки малого и частично среднего калибра (до 115 мм) имеют так называемы унитарные патроны и выстрелы. При этом, стрелковое вооружения и пушки калибра до 40 мм в качестве воспламенительного узла имеют только капсюли, капсюли-воспламенители и капсюли-втулки. В орудиях калибра 76 мм и выше применяются дополнительные воспламенители. Конструкция воспламенительных узлов в орудиях калибра 76 мм и выше значительно усложняется. Но наиболее сложный воспламенительный узел имеют минометные заряды.

Так как предварительный период рассматривается до момента форсирования, то для снарядов унитарного заряжания большое значение для оценки давления форсирования имеет усилие разпатронирования выстрела. Это связано с тем, что пуля или снаряд унитарного патрона запрессовывается или завальцовывается в гильзу. Поэтому давление форсирования не может быть меньше соответствующего усилия разпатронирования. Так для 7,62 мм патрона усилие разпатронирования составляет не менее  $200 \div 250$  кгс, что соответствует давлению от 440 до 550 атм. Для 30 мм пушек ТИПА АО-18 усилие разпатронирования соответствует давлению не менее 700 атм. Поэтому предварительный период в различных системах огнестрельного оружия унитарного заряжания будет различен.

К этому необходимо добавить тот факт, что механизм воспламенения кардинально меняется для зарядов с дополнительным воспламенителем по сравнению с капсюльным. Капсюльное воспламенение всегда определяет одновременное воспламенение заряда в целом. В первую очередь происходит зажжение пороховых элементов, расположенных непосредственно у капсюля. Остальная часть заряда воспламеняется от продуктов горения заженной части заряда по механизму конвективного горения. Кроме того, необходимо иметь в виду и тот факт,

что при срабатывании капсюля или капсюльной втулки возникает сильная ударная волна, которая приводит к уплотнению невоспламенной части заряда и возникновению зазора (некоторого объема) между дном гильзы и уплотненным зарядом. При этом происходит деформация пороховых элементов, что приводит к дегрессивности поверхности горения, а также к возможному появлению трещин в пороховых элементах при отрицательных температурах. Это, в свою очередь, совместно с неодновременностью воспламенения заряда в целом, приводит к отклонению реального газоприхода в основном периоде от расчетных, который, как правило, рассчитывается для идеальных форм пороховых элементов и для мгновенного и одновременного по всему объема заряда воспламенения.

В качестве дополнительного воспламенителя применяются различные сорта дымного (чёрного) пороха (ДП) типа ДРП (дымный ружейный порох) и КЗДП (крупнозернистый дымный порох) или пористые пироксилиновые пороха типа П-200 (пористость  $\sim 20-25\%$ ), П-300 (пористость  $\sim 30-35\%$ ) и т.п. Некоторые геометрические данные для различных марок отечественных дымных порохов приведены в табл. №1. Внешне ДП имеет вид зерен или гранул неправильной формы, поверхность которых графитована. Удельная плотность гранул ДП в зависимости от партии пороха и его марки может колебаться от 1,6

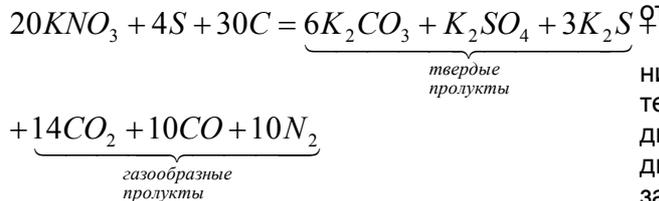
до  $1,93 \frac{\rho_p}{\text{см}^3}$ . Так как ДП является механической смесью, то структура гранул имеет гетерогенную структуру и, соответственно, при горении наблюдается значительное отклонение от геометрического закона горения.

Таблица 1

Марка	$d_{cp}, \text{мм}$	$S \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{кг}$
КЗДП-1	7,5	$\sim 0.6$
КЗДП-2	4,5	$\sim 0.7$
КЗДП-3	2,6	$\sim 1.2$
ДРП-1	1,5	$\sim 2.7$
ДРП-2	1,0	$\sim 3.7$
ДРП-3	0,7	$\sim 5.3$
ДРП-4	0,5	$\sim 7,0$

Отечественные ДП, состоят из 75% калийной селитры ( $\text{KNO}_3$ ), 15% древесного угля и 10% серы. Ввиду гетерогенности струк-

туры гранул и зерен ДП, они обладают большой гигроскопичностью, и в них всегда присутствует вода сверх указанных компонент. Причем вода действует неблагоприятно на ДП, т.к. ухудшает воспламеняемость гранул и уменьшает скорость горения, ухудшает механические свойства и т.д. Так как удельная плотность зерен ДП может колебаться в широких пределах от  $1.6 \text{ гр/см}^3$  до  $1.93 \text{ гр/см}^3$ , то насыпная (гравиметрическая) плотность с утряской может достигать почти  $1 \text{ гр/см}^3$ . Стехиометрическое соотношение между исходным составом и продуктами горения для отечественных ДП можно представить в виде:



Весовая доля газообразных продуктов составляет  $\sim 0.44$ , а твердых  $\sim 0.56$ . Объем газообразных продуктов горения на 1 кг ДП составляет порядка 285 литра, из которых  $\sim 117$  л.  $\text{CO}_2$ ,  $\sim 82,5$  л.  $\text{CO}$ . Калорийность ДП, также как их геометрические размеры не является величиной постоянной и может колебаться в пределах от 660 до 730  $\text{ккал/кг}$ . Максимальная температура горения достигает  $2400^\circ \text{K}$ , сила пороха также не является величиной постоянной и колеблется около величины  $26000 \text{ кгс} \cdot \text{м/кг}$ . Показатель адиабаты для газообразных продуктов  $\frac{\tilde{n}_\delta}{\tilde{n}_\nu} \approx 1.23$ , а газовая постоянная для них  $R \approx 24.0 \text{ кгс} \cdot \text{м/кг} \cdot \text{град}$ . Расчетные теплоемкость и теплопроводность газообразных продуктов сгорания соответственно равны  $\tilde{n}_\delta \approx 0,32 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ ,  $\tilde{n}_\nu \approx 0,26 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ ,  $\lambda \approx 2,78 \cdot 10^{-7} \frac{\text{ккал}}{\text{см} \cdot \text{град}}$ .

Ввиду сложной гетерогенной структуры к-фазы различные авторы приводят различные данные по закону горения ДП. Обычно в самом общем случае на основе экспериментальных приводится зависимость в виде  $u = u_1 P^\nu$ . Но опыты автора с ДП различных

марок показывает, что зависимость линейной скорости горения от давления очень мала и показатель в законе горения в первом приближении можно принять  $\nu = 0$ , а саму скорость принять равной  $u \approx 50 \frac{\text{мм}}{\text{сек}}$ . С учетом

того, что поверхность горения ДП трудно строго описать аналитически, то данное значение вполне приемлема для предварительных расчетов и описания закономерностей горения и газоприхода дополнительного воспламенителя из ДП. При этом конкретные законы газообразования дополнительного воспламенителя из ДП необходимо определять экспериментально для каждой конкретной марки и партии ДП в интервале давления от 1 атм. до 100 атм.

Теплофизическая картина воспламенения основного заряда при наличии дополнительного воспламенителя определяется двухфазностью продуктов горения ДП. Твердые частицы определяют очаговый характер зажжения пороховых элементов основного заряда в непосредственной близости от воспламенительного узла, т.к. фильтрация твердых частиц на значительную глубину заряда, особенно из зеренных порохов, затруднена. Теплофизика воспламенения в очагах определяется тепловым контактом твердых частиц с пороховыми элементами. Это задает кондуктивный характер теплопередачи по граничным условиям 4-го рода (сопряженная задача). Остальная часть заряда воспламеняется газообразными продуктами горения и воспламенителя, и продуктами горения заженной и воспламененной части основного заряда. Теплофизика воспламенения газообразными продуктами происходит по конвективному механизму с граничными условиями 3-го рода. На основе большого числа экспериментальных данных считается, что твердые частицы играют определяющую роль в воспламенении пороховых элементов основного заряда. При рассмотрении и моделирования воспламенения основного заряда необходимо различать два про одновременно протекающих процесса – это локальные процессы зажжения пороховых элементов (точечный процесс) и процесс воспламенения всей поверхности основного заряда (объемный процесс). Локальный процесс зажжения определяется, прежде всего, конденсированной фазой продуктов горения ДП. Этот процесс можно назвать кондуктивно-очаговым механизмом воспламенения.

Кондуктивно-очаговое воспламенение твердыми частицами обладает минимальным

временем воспламенения пороха метательного заряда. Так как твердые частицы имеют высокую температуру порядка  $2400^{\circ}K$ , то в месте контакта температура пороха будет значительно выше температуры поверхности при горении пороха. Математическая формулировка кондуктивно-очагового воспламенения твердыми частицами на границе раздела фаз имеет следующий вид

$$\begin{cases} T_{мс}(0, \tau) = T_{нор}(0, \tau); \\ -\lambda_{мс} \frac{\partial T_{мс}(0, \tau)}{\partial \tau} = -\lambda_{нор} \frac{\partial T_{нор}(0, \tau)}{\partial \tau} \end{cases}$$

Начальные условия будут иметь вид:

$$T_{мс}(x, 0) = 2400^{\circ}K; T_{нор}(x, 0) = T_0.$$

На границе раздела между твердыми частицами и порохом (граница раздела фаз  $x=0$ ) равновесное значение температуры должно с самого начала процесса теплообмена, т.е. для любого момента времени:

$$T_{мс}(0, \tau) = T_{нор}(0, \tau) = 2400 \frac{K}{1 + K}.$$

$$\text{Здесь } K = \sqrt{\frac{\lambda_{мс} c_{мс} \rho_{мс}}{\lambda_{нор} c_{нор} \rho_{нор}}}.$$

В первом приближении можно принять  $K \approx 1$ . Таким образом в месте контакта температура будет порядка  $1200^{\circ}K$ , что много выше температуры поверхности горения НЦ-порохов. Это приводит к почти мгновенному зажжению пороха основного заряда в местах контакта твердых частиц продуктов горения дополнительного воспламенителя из дымного пороха с порохом основного заряда. Таким образом, кондуктивно-очаговой механизм воспламенения является процессом с минимальным временем задержки зажжения в очагах контакта.

Для оценки веса воспламенителя за основу можно принять конвективный механизм воспламенения. Кондуктивно-очаговый механизм воспламенения основного заряда применим лишь к части заряда, т.к. твердые частицы оседают лишь на части основного заряда вблизи ДП. В тоже время газообразные продукты горения ДП будут контактировать со всеми пороховыми элементами основного заряда. Чтобы зажечь пороховые элементы, необходимо нагреть их поверхность до определенной температуры и создать прогретый слой вблизи поверхности, соответствующий

текущему давлению. Тепло на разогрев будет отбираться от газообразных продуктов горения ДП. Так как на разогрев может уходить лишь часть выделившегося тепла, иначе будет происходить резкое падение давления, то необходимо оценить его. Опытные данные по теплоотдаче от горения пороха в манометрической бомбе во все поверхности позволяют оценить это количество тепла. Оно составляет порядка 10% от выделившегося тепла. Сначала необходимо оценить величину прогретого слоя и количество тепла в прогретом слое. Из тепловой теории горения конденсированных систем и порохов известно, что в прогретом слое стационарно горящего пороха на единицу поверхности количество тепла можно оценить формулой

$$q_0 = \frac{\lambda}{u} (T_s - T_0) \text{ или } q_0 = \frac{\lambda}{u_1 P} (T_s - T_0).$$

Здесь:  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности;  $T_s$  - температура поверхности горения стационарно горящего пороха (P- idem);  $T_0$  - начальная температура пороха заряда; и - линейная скорость горения (P- idem). Все тепло в прогретом слое будет равно:  $q_{\Sigma} = q_0 \cdot S_{\Sigma}$ .

Здесь  $S_{\Sigma}$  - суммарная начальная поверхность всех пороховых элементов заряда.

В качестве примера рассмотрим унитарный выстрел и его метательный заряд к 76,2 мм пушке, состоящий из зерненного пироксилинового пороха. Заряд и некоторые параметры заряжения имеют следующие значения: вес заряда  $\omega_0 = 1,074$  кг; геометрические параметры зерна: сгорающий свод  $2e_1 \approx 0,95$ , диаметр каналов зерна  $d_k \approx 0,45$  мм, длина зерна  $l \approx 9,75$  мм. Для расчетов в первом приближении можно взять линейный закон скорости горения для пироксилиновых порохов, равный

$$u = 0,0084 \cdot P \left[ \frac{см}{сек} \right], \text{ давление } [атм]. \text{ Коэффициент теплопроводности для пироксилиновых порохов равен}$$

$$\lambda \approx 5,3 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{кал}{с \cdot см \cdot град} \right]. \text{ Калорийность}$$

$$\text{дымного пороха равна } q_{дв} = 670 \left[ \frac{кал}{гP} \right]. \text{ Сво-}$$

бодный объем каморы  $W_{\text{ка}} \approx 970 \text{ см}^3$ . Общая поверхность рассматриваемого заряда равна  $\sim 6580 \text{ см}^2$ . Перепад температур можно приближенно оценить  $T_s - T_0 \approx 300^0$ . С учетом сказанного полное тепло в прогретом слое можно представить в виде простого соотношения:  $Q_{\Sigma} \approx \frac{12,5 \cdot 10^4}{P} [\text{кал}]$ . Максимальное давление от горения ДВ из ДП равно  $P_{\text{вм}} \frac{f_{\text{с}} \omega_{\text{с}}}{W_{\text{св}} - \alpha_{\text{с}} \omega_{\text{с}}}$ . Прогретый слой необходимо рассчитывать для давления с учетом тепловых потерь на нагрев всех пороховых элементов, т.е.  $P_{\text{с}} \approx 0,9 \cdot P_{\text{вм}}$ . Полное количество тепла, выделившееся при горении ДП из ДП равно:  $Q_{\text{с}} = q_{\text{с}} \cdot \omega_{\text{с}}$ . Здесь  $q_{\text{с}} = 670 \text{ гр}$  - калорийность ДП. Количество тепла, которое пойдет на прогрев пороха равно  $Q \approx 0,1 \cdot Q_{\text{с}}$ . Для оценки веса воспламенителя необходимо найти отношение  $\bar{Q} = \frac{Q}{Q_{\Sigma}}$ . Весу воспламенителя должно соответствовать значение  $\bar{Q} \geq 1$ . Данные расчета по оценке веса воспламенителя приведены в табл.2

Таблица 2

$\omega_{\text{с}} [\text{гр}]$	10	20	25	30	35
$P_{\text{вм}} [\text{атм}]$	26	54	68	82	96
$P_{\text{с}} [\text{атм}]$	21	49	61	74	86
$\bar{Q}$	0,1	0,5	0,8	1,2	1,6

### Выводы.

Экспериментальные данные по всем артиллерийским метательным зарядам среднего и крупного калибра различных конструкций и для порохов различной природы показывают, что отношение  $\frac{\omega_{\text{с}}}{\omega_0}$  изменяется в пределах от 0,01 до 0,04. Из таблицы 2 видно, что при  $\bar{Q} = 1,2$  соотношение  $\frac{\omega_{\text{с}}}{\omega_0} \approx 0,028$ , т.е. попадает в экспериментальный интервал от 0,01 до 0,04. Следовательно, данный подход

дает возможность в первом приближении оценивать дополнительный воспламенитель из дымного пороха для зарядов среднего и крупного калибра.

После оценки веса дополнительного воспламенителя и ДП, необходимо выбрать марку дымного пороха, который наиболее приемлем для разрабатываемого заряда. Марка ДП определяется природой пороха, сгорающим сводом пороховых элементов, конструкцией заряда в целом. При некоторых конструкциях переменных зарядов отдельного заряжения дополнительный воспламенитель может делиться на две или три части. Причем каждая часть может состоять из различных марок дымных порохов. Марка ДП в первом приближении может быть определена по сгорающему своду пороха основного заряда по формуле:  $d_{\text{он}} = (1 \div 1,2) \cdot e_1$ . Для рассматриваемого примера размеры ДП ориентировочно равны

$$d_{\text{он}} = (1 \div 1,2) \cdot 0,475,$$

т.е.  $d_{\text{он}} = (0,475 \div 57)$  мм. В соответствии с табл.1 в качестве марки ДП могут быть выбраны либо марка ДРП-4, либо марка ДРП-3.

Место расположения и вид дополнительного воспламенителя должен выбираться, исходя из баллистического проектирования основного заряда. Прежде всего необходимо учитывать форму пороховых элементов, т.е. трубчатый или зерненный порох выбран в качестве основного заряда. Кроме того, в зависимости от калибра орудия, типа заряжения, дополнительный воспламенитель может быть разделен на две части – нижний и верхний воспламенитель. Соотношение весов между нижним и верхним частями дополнительного воспламенителя примерно равна  $\sim 2:1$ . Кроме того, на основе натуральных испытаний в качестве нижнего и верхнего воспламенителя могут быть применены различные марки ДРП. Причём сгорающий свод ДП верхней части воспламенителя должен быть меньше сгорающего свода ДП в его нижней части. В отдельных случаях конструкция дополнительного воспламенителя может содержать комбинации центральной воспламенительной трубки с нижней и верхней частями дополнительного воспламенителя. Сгорающий свод в центральной воспламенительной трубке должен быть больше, чем в нижней и верхней частях дополнительного воспламенителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зельдович, Я.Б. К теории горения порохов и взрывчатых веществ./ Я.Б. Зельдович ЖЭТФ, т.12.,вып.11/12, с.498-524.
2. Мержанов, А.Г. К теории стационарного горения пороха./ А.Г. Мержанов, Ф.И. Дубовицкий ДАН СССР, 1959 г.,т.129, №1, с.153-156.
3. Вилунов, В.Н. К математической теории стационарной скорости горения конденсированного вещества./В.Н. Вилунов ДАН СССР, 1961 г. т.136, №1, с.136-139.
4. Гальвиц, У. Артиллерийские пороха и заряды. / У. Гальвиц М., Из-во ОП, 1950 г., 194с.
5. Серебряков, М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет./ М.Е. Серебряков М., Оборонгиз, 1962 г., 703с.
6. Горст, А.Г. Пороха и взрывчатые вещества. / А.Г. Горст М., Машиностроение, 1978 г., 207с.
7. Новожилов, Б.В. Нестационарное горение твердых ракетных топлив./ Б.В. Новожилов.- М., Наука, 1973 г., 176с.
8. Зельдович, Я.Б. Теория нестационарного горения пороха. / Я.Б. Зельдович, О.И. Лейпунский, В.Б.Либрович.- М., Наука, 1975 г., 131с.
9. Леонов, Г.Н. Особенности механизма горения бездымных порохов при высоких давлениях. / Г.Н. Леонов Материалы Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», г.Томск, Из-во ТГУ,2002 г., с.88-89.
10. Андреев, К.К. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ./ К.К. Андреев -М., Наука, 1966 г., 346 с.
11. Зарко, В.Е. Исследование профиля температуры в газовой фазе стационарно горящего пороха./ В.Е. Зарко, Г.Н.Леонов, В.Г.Григорьев-Физика горения и методы её исследования. ЧГУ, г.Чебоксары, 1975 г., с.27-37.
12. Зельдович Я.Б.,Ривин М.А., Франк-Каменецкий Д.А. Импульс реактивной силы пороховых ракет/Я.Б. Зельдович, М.А. Ривин, Д.А.Франк-Каменецкий М., Оборонгиз, 196 с.

*Леонов г.н., д.ф-м.н., профессор, тел.290742, leonov-gn-dfmn@mail.ru, каф. высшей математики и математического моделирования Алтайского государственного технического университета им. И.И.Ползунова.*

УДК: 536.46: 533.6

## ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ НИТРОЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ ПОРОХОВ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Леонов Г.Н.

Впервые приведены аналитические зависимости для температуры поверхности порохов  $T_s = T(p)$  на основе нитроцеллюлозы в интервале давлений от 100 до 4000 атм. На основе этих зависимостей приведены формулы для линейных скоростей горения НЦ-порохов  $u = u(p)$  и энергий активации терморазложения нитроцеллюлозы в широком интервале давлений.

**Ключевые слова:** НЦ-пороха, терморазложение, температура поверхности, энергия активации, линейная скорость горения, закон скорости горения к-фаза, функция Аррениуса

### Введение

Пороха на основе нитроцеллюлозы (НЦ-пороха), имеют широкое применение. Именно с рассмотрения горения НЦ-порохов стала развиваться теория горения конденсированных систем (к-систем) [1,2,3]. Среди характеристик НЦ-порохов несколько являются определяющими, имеющими большое практическое значение. К ним относятся линейная скорость горения, температура горения и температурный коэффициент скорости горения. Правильное понимание механизма горения НЦ-порохов позволяет проследить влияние рецептурных, сырьевых, технологических и иных факторов на эти характеристики горения, и прежде всего на скорость горения. Именно линейная скорость горения, наряду с

формой, размерами пороховых элементов и весом заряда, определяет динамику газо-энергетического прихода. Температура горения полностью определяется рецептурой пороха. Температурный коэффициент скорости горения определяется рецептурой, температурой горения, начальной температурой пороховых элементов, энергией активации терморазложения, а также технологией изготовления.

### Рассмотрение механизма горения

Линейная скорость горения, как правило, задается в виде закона скорости горения  $u = u(P)$ , т.е. зависимостью скорости горения от давления, при котором происходит горение. Знание закона горения позволяет варьировать формой и размерами пороховых