

УДК 623.52

Анипко О.Б., Бирюков И.Ю.

### МЕТОДЫ ТЕРМОДИНАМИКИ, ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ВНУТРЕННЕЙ БАЛЛИСТИКИ

Основной частью бездымных порохов является пироксилин, получаемый путем нитрации клетчатки. Существенным недостатком пироксилинового пороха является изменение его свойств при длительном хранении в результате улетучивания спирто-эфирного растворителя и разложения под воздействием азотной и азотистой кислот, образующихся в результате автокаталитической реакции при массопереносе азота из пороха в окружающую среду. Для связывания части активных молекул в пороха добавляют стабилизаторы, которые, однако, полностью не исключают происходящие процессы, а лишь снижают их скорость. Причем, учитывая ограничения объема вводимого стабилизатора, их действие простирается на определенный период эксплуатации заряда, по истечении которого автокаталитическая реакция возобновляется с нарастающей скоростью.

Процесс образования кислот и их взаимодействие с порохом идет в относительно тонком слое у поверхности пороховых элементов. При этом, содержание азота в слое у поверхности порохового элемента снижается, что соответственно приводит к снижению локальной концентрации. Возникающий таким образом градиент концентраций приводит к массопереносу азота из глубинных слоев к поверхности, что осуществляется путем молекулярной диффузии (рис. 1).

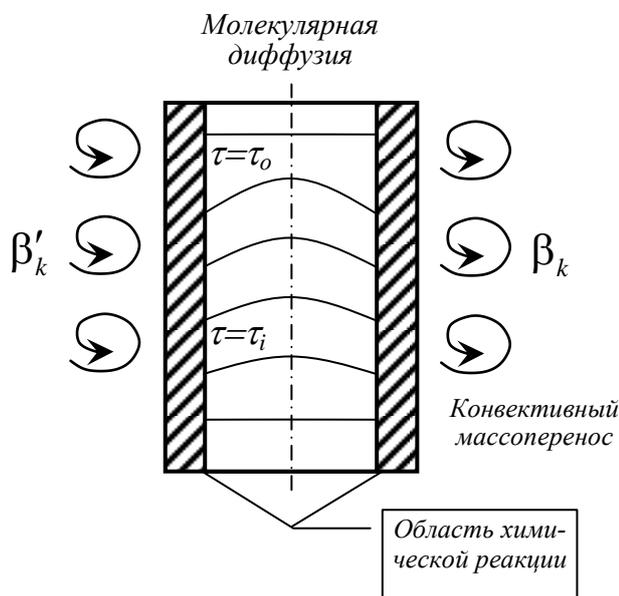


Рисунок 1 – К анализу процессов при старении порохов

Тогда, согласно I-му закону Фика, количество продиффундировавшего вещества  $M$

$$M = D \frac{dc}{dn} F, \quad (1)$$

где  $D$  – коэффициент молекулярной диффузии,  $F$  – поверхность массопереноса.

Следует отметить, что коэффициент молекулярной диффузии  $D$  существенно зависит от температуры:

$$D_t = D_o \left( \frac{T}{T_o} \right)^{1+n}, \quad (2)$$

где  $D_t$  – коэффициент молекулярной диффузии при температуре  $T$ . Для азота  $n = 0,9$  [1]. Таким образом суточные изменения температуры на (15...20) °С изменяют значение  $D$  на величину до 15 % от величины  $D_o$ .

В целом, рассматривая процессы автокаталитической реакции компонентов пороха, молекулярной диффузии в нем и конвективного массопереноса в окружающую среду можно заключить, что определяющими скорость разложения пороха процессами являются два первых из перечисленных. Причем, скорости этих процессов взаимосвязаны, поскольку истощение азота в поверхностном слое создает градиент его концентрации – движущую силу диффузионного массопереноса. Однако, на разных этапах хранения порохового заряда соотношение между скоростями этих процессов различно.

Нитроклетчатка, представляющая собой основу пироксилиновых порохов характеризуется неплавкостью, вследствие чего она разлагается при всех температурах в твердом состоянии [2]. Кроме этого, нитроклетчатка имеет физически сложную структуру с развитой поверхностью и химически неоднородна. В работе [2] отмечается, что скорость газообразования и ее изменение существенно зависят оттого, удаляются продукты распада или остаются над клетчаткой. Это соответствует абсолютному изменению константы скорости на величину до 75 %, значение которой составляет  $k = 10^{18,0} \exp(-43000/RT)$ .

Таким образом, для оценки продолжительности эксплуатации зарядов необходимо решить задачу молекулярной диффузии азота и летучих компонентов из глубинных слоев пороха к его поверхности с учетом влияния колебаний температуры на коэффициент переноса. Вместе с этим, параллельно, необходимо решать задачу химической кинетики для оценки количества реагирующего вещества на поверхности порохового элемента, что позволит определять градиент концентрации на каждом этапе времени. До тех пор, пока поток вещества, переносимый молекулярной диффузией ( $M_D$ ) будет больше, чем количество реагирующего вещества в единицу времени ( $M_k$ ), скорость разложения будет определяться кинетической константой, а когда  $M_D \leq M_k$ , то коэффициентом молекулярной диффузии  $D$ .

В целом, разложение пороховых зарядов в процессе их эксплуатации представляет собой комплексную проблему (рис. 2), которая кроме задачи оценки сроков эксплуатации, включает задачу определения баллистических характеристик имеющих метательных зарядов и изменения свойств порохов.

Такая задача может быть решена на основе комплексного применения экспериментальных методов и обратной задачи внутренней баллистики.

Применяемые экспериментальные методы должны отличаться простотой и доступностью, а также единством методической базы. Исходя из этого к ним следует отнести экспериментальное определение начальной скорости ( $v_o$ ) и крешерного давления ( $P_{кр}$ ).

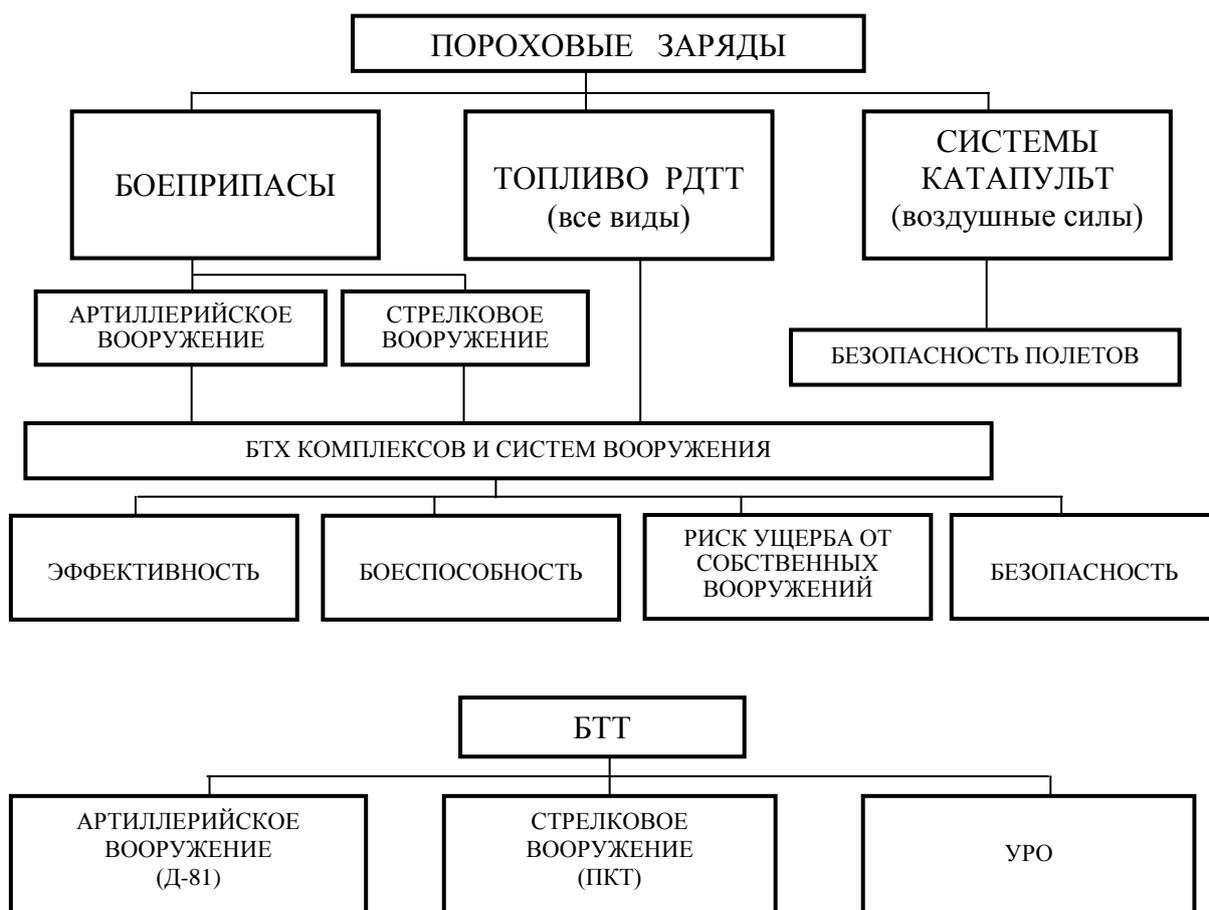


Рисунок 2 – Масштаб проблемы старения пороховых зарядов в целом для БТ

На основе этих экспериментальных данных при условии, что конструктивные параметры ствольной системы известны, на основе решения обратной задачи внутренней баллистики (ОбрЗВБ) могут быть оценены сила пороха ( $f$ ), его теплотворная способность ( $Q_v$ ), скорость горения ( $U_1$ ).

Система уравнений, описывающая связь между физико-химическими и механическими процессами при выстреле включает [3] уравнение пиродинамики

$$PS(l\psi + l) = f\omega\psi - \frac{\theta}{2} \varphi\omega v^2, \quad (3)$$

Закон скорости горения пороха

$$U = U_1 P, \quad (4)$$

Закон газообразования

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{S_1}{\Lambda_1} \frac{S}{\Lambda} U, \quad (5)$$

и закон движения снаряда

$$PS = \varphi m \frac{dv}{dt} \quad \text{или} \quad PS = \varphi m v \frac{dv}{dl}, \quad (6)$$

где  $P$  – давление;  $S$  – площадь поперечного сечения канала ствола;  $f$  – сила пороха;  $m$  – масса снаряда;  $U$  – скорость горения пороха;  $\varphi$  – коэффициент фиктивности массы;  $v$  – скорость снаряда;  $t$  – время.

Решение прямой задачи предполагает определение на основе соотношений  $P = f(\ell)$ ;  $v = f^1(\ell)$ ;  $\rho_\alpha = Ft$  и  $v = F^1(t)$ , наибольшего давления  $P_m$  и дульную скорость  $v_d$ . Как известно, даже эта задача при ряде допущений и упрощений [3], может быть решена только полу-эмпирическими методами. Обратная задача по своей постановке является некорректной, поскольку данной паре параметров  $P_{кр}$  и  $v_o$  могут соответствовать бесконечное множество вариантов сочетаний конструктивных параметров ствольной системы и условий заряжания. Тот факт, что заряд применяется в конкретной ствольной системе, существенно облегчает решение обратной задачи, поскольку конструктивные параметры и частично условия заряжания известны. Однако, даже в этом случае систему уравнений необходимо доопределить, чтобы получить однозначное решение, поскольку, как отмечается в [4] аналитически решить обратную задачу внутренней баллистики не представляется возможным.

Поэтому, строго говоря, речь может идти лишь о хорошем согласовании данных, полученных расчетным путем (даже для математически строгого решения), с опытными данными.

В этой связи, более простые решения и более удобные выражения, полученные на основе ряда допущений с применением коэффициентов согласования, дающие результаты, удовлетворительно согласующиеся с опытными, могут быть вполне приемлемыми для решения конкретной прикладной задачи.

Будем считать, что в результате эксперимента получены значения  $P_{кр}$  и  $v_o$ , кроме этого задана ствольная система и оценена величина плотности пороха ( $\rho_n$ ) на данном этапе эксплуатации.

В соответствии с [5] дульное давление

$$P_A = \frac{gU_0^2}{2gX_0} \Pi(\eta), \quad (7)$$

где  $X_0$  – параметр, определяемый на основе конструктивных данных;  $\Pi(\eta)$  – параметр Гейденрейха.

С учетом того, что крешеры дают значения давления на  $\approx 20\%$  ниже достигаемого в канале ствола [6], будем считать

$$P_{\max} = 1,2 P_{кр} \quad (8)$$

Кроме того, для большинства ствольных систем давление воспламенения составляет величину  $P_v = 2,0 \dots 5,0$  МПа.

Таким образом функция изменения давления по длине канала ствола  $P(\ell)$  проходит через три точки  $P_D$ ;  $P_{max}$  и  $P_B$  (рис.3), величины которых опеределены.

Положение сечения канала ствола, где давление максимально  $X_m$ , опеределим в соответствии с [4] как

$$X_m = \frac{\chi \delta_0}{\frac{B(1+\theta)}{\left[1 + \left(\alpha \frac{1}{\delta}\right) \frac{P_{max}}{f}\right]^{-2\chi\lambda}}}, \quad (9)$$

где  $B$  – параметр заряжания, а  $\alpha$  – коволюм.

Далее задача сводится к отысканию функции  $P(X)$ , причем такой, что удовлетворяет условию

$$S \left[ \int_0^{X_m} P(X) dX + \int_{X_m}^{\ell_{\text{нб}}} P(X) dX \right] = Q_v \cdot \omega, \quad (10)$$

где  $\omega$  – масса заряда.

С другой стороны, учитывая, что площадь под кривой  $P(X)$  эквивалентна работе пороховых газов и если построение функции  $P(X)$  не требуется, то левая часть равенства (10) может быть опеределена через значение среднего давления (рис. 3), опеределяемого как

$$D\tilde{n}\delta = \frac{\varphi m \mathbf{U}_A^2}{2S\ell_L} \quad (11)$$

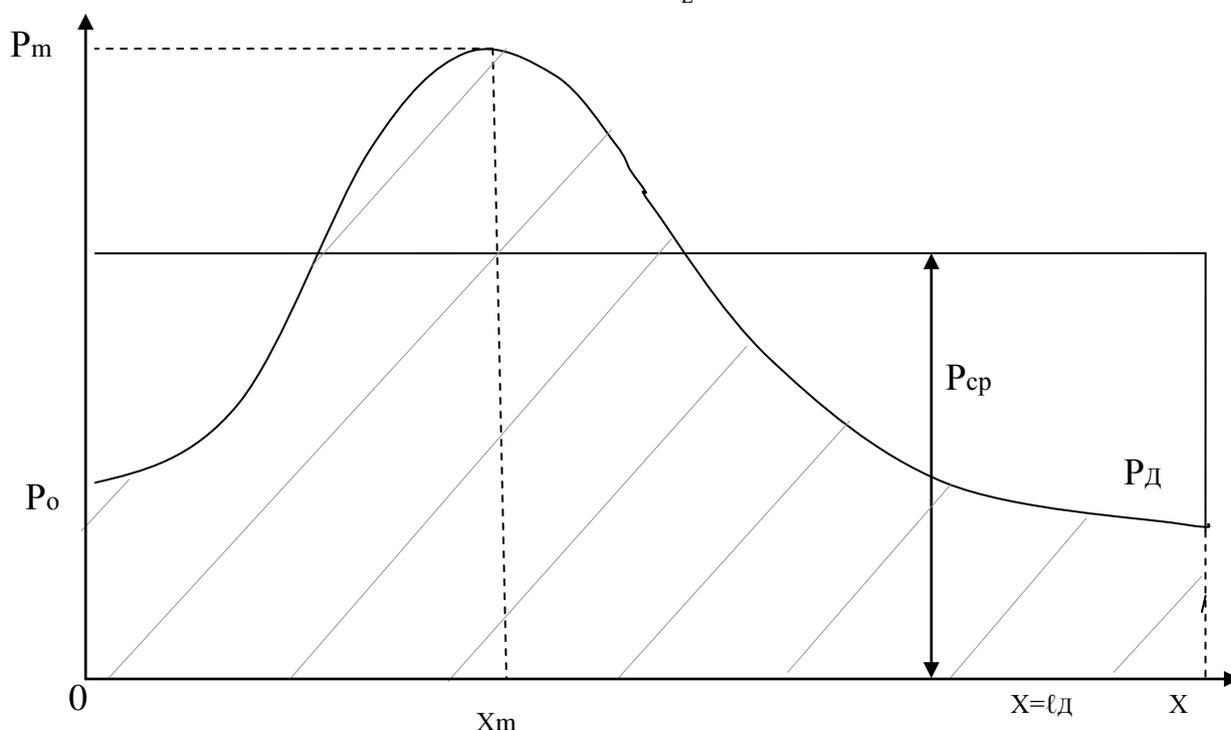


Рисунок 3

Полученное таким образом значение  $Q_v$  или  $\omega$  может быть основанием для оценки значений  $f$ ,  $\alpha$  и  $U$ , которые используются в решении уже прямой задачи внутренней баллистики для проверки правильности полученных оценок и корректируются до тех пор, пока расчетные значения с допустимой точностью не будут равны экспериментальным значениям  $v_0$  и  $R_{кр}$ .

В заключении следует отметить, что величины  $f$ ,  $\alpha$ ,  $U$ ,  $Q_v$  являются баллистическими характеристиками пороха, которые, в свою очередь, определяют максимальное давление пороховых газов  $P_m$  и скорость нарастания давления  $\frac{dp}{dt}$ . Эти характеристики зависят от природы пороха и связаны с его физико-химическими характеристиками, поэтому, получив зависимость хотя бы одной из них от времени эксплуатации порохового заряда представляется возможным определить баллистические характеристики выстрела, соответствующие данному этапу эксплуатации.

### Литература

1. Тепло- и массообмен. Справочник (под ред. Григорьева В.А., Зорина В.М.). – М., Энергоиздат. – 1982.
2. Андреев К.К. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. – М., Наука. – 1966.
3. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика. Оборонгиз. – 1949.
4. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика автольных систем и пороховых ракет. – М., Оборонгиз. – 1962.
5. Кувеко А.Е., Миропольский Ф.П. Внутренняя баллистика ствольных систем и ракетных двигателей твердого топлива. – ВВИА им. Жушвенко. – 1987.

Аніпко О.Б., Бірюков І.Ю.

### МЕТОДИ ТЕРМОДИНАМІКИ, ТЕПЛО- І МАСОПЕРЕНОСА ДЛЯ РІШЕННЯ ЗВОТНОЇ ЗАДАЧІ ВНУТРІШНЬОЇ БАЛІСТИКИ

Запропоновано підхід до визначення балістичних характеристик зарядів на різних етапах їхньої експлуатації на основі експериментальних даних і зворотної задачі внутрішньої балістики.