### Нестационарное горение заряда в РД. Обратная задача внутренней баллистики.

### **В.Н. Маршаков, А.Г. Истратов, В.М. Пучков** Г. Москва, ИХФ РАН, E-mail: marsh 35@mail.ru

2012 г.

### Схема МРД

1 – передняя крышка, 2 – основное сопло, 3 – корпус камеры, 4 – переднее фиксирующее кольцо с зубцами, 5 – пороховая трубка, 6 – датчик давления, 7 – заднее фиксирующее кольцо с зубцами, 8 –воспламенитель МБ-2, 9 – навеска ДРП, 10 – дополнительное сопло, 11 – задняя крышка, 12 – корпус вышибного устройства, 13 – пробка, 14 – кольцевая проточка с ДРП и МБ-2, 15 – мембрана, 16 – крышка вышибного устройства



### Стационарные режимы горения заряда



## $V d_t \rho = (V \mu / RT_b) d_t p = \rho u S - A \rho \sigma, \quad (\rho = p \mu / RT_b)$

- *u* = 0.062*p*<sup>0.57</sup> exp[(8.3- 0.27*p*<sup>0.57</sup>)·10<sup>-3</sup>·T<sub>0</sub>], [*u*] = см/с, [T] = град.С скорость горения в ППД не равна скорости горения в РД
  *ρ* = 1,6 г/см<sup>3</sup>, T<sub>B</sub> = 2260K, μ = 23,65 г/моль, *F* = RT<sub>B</sub>/μ = 7,94·10<sup>9</sup> см<sup>2</sup>/с<sup>2</sup> температура продуктов сгорания в РД из-за теплопотерь меньше T<sub>B</sub>
  Заряд : 4,0/0,8 14,8 см, диаметр шашки и канала, длина, S<sub>0</sub> = 247,3 см<sup>2</sup>. Камера: внутренний диаметр 4,4 см, длина 17см, V<sup>0</sup><sub>c</sub> = 80 см<sup>3</sup> Коэффициент истечения: *A* = *B*(γ)/*f*<sup>0.5</sup>, при γ = 1,23 *B*(γ) ≈ 0,65, *A* = 7,3·10<sup>-6</sup> см/с.
  Учет явления раздувания увеличения скорости горения при наличии потока
- продуктов вдоль поверхности горения заряда, учитывается коэффициентом эрозии:  $\varepsilon = u_{\varepsilon}/u$ , является функцией критерия Победоносцева  $\mathfrak{a} = S/F$ , где S – поверхность горения, F – проходное сечение камеры, численно примерно равное максимальной скорости обдувающего потока в м/с.  $\varepsilon$  меет место при  $\mathfrak{a}$  больше примерно 60.

## Стационарные режимы горения заряда



 $p_m = 20,74 \sigma^{-2.15}$  (метод наим. квадратов) (1) закон Бори :  $p_m = [(0 \mu S)/A \sigma]^{2.34} = 19.7 \sigma^{-2.34}$  (2)

$$p_m = [(\rho \, u_0 \, S_0) / A \, \sigma]^{-3.3} = 19, / \sigma^{-2.33}$$
(2)  
$$p_m = 18, 2 \, \sigma^{-2.34}$$
(3)

$$A^{I} = 7.68 \text{ г/cm}^{2} \cdot \text{c} \cdot \text{атм}, \quad A^{I} / A = \sim 1,04$$
  
 $p_{2} = 11,7\sigma^{-2.34}, \quad A^{I}$  (4)

## ЭРОЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ\*

В рамках представлений Я.Б. Зельдовича<sup>1</sup> и исследований В.Н. Вилюнова<sup>2</sup> увеличение скорости горения пороха при наличии обдувающего потока продуктов сгорания связывается с турбулизацией прилегающего к границе раздела фаз пограничного слоя. Решение задачи дает коэффициент раздувания (эрозионное соотношение) равным:

$$\varepsilon = u_{\varepsilon} / u = [K(I) + LI^2]^{0.5} = [1 + (\alpha g/m)^2]^{0.5},$$

где  $I = \sqrt{\xi g} / m$  – параметр Вилюнова,  $\xi$  - коэффициент сопротивления канала, а *g* и *m* – массовые скорости обдувающего потока и скорость горения топлива без раздувания.

Для цилиндрического канала получено:

### $\varepsilon = ch(\alpha x),$

где  $\mathfrak{x} = S / F$  – критерий Победоносцева и где S – поверхность горения заряда, а F – проходное сечение камеры.

\* Маршаков В.Н., Новожилов Б.В. Эрозионное горение порохов //Науч.-техн. сборник Боепрпасы. ГНЦ ФГУП «ЦНИИХМ». 2010, №1, С.34-39.

1. Зельдович Я. Б. К теории горения пороха в потоке газа //Физика горения и взрыва. 1971. Т. 7, № 4. С.463-476.

2. Вилюнов В.Н. К теории эрозионного горения порохов// Докл. АН СССР, 1961. Т. 136, № 2. С.381-383.

Показано, что полученная формула хорошо описывает известные экспериментальные результаты при значениях  $\alpha \approx 0.005 \div 0.0065$  при теоретическом его значении  $\alpha \approx 0.007$ . Оценка  $\varepsilon(\alpha)$  для нашего случая при  $\alpha = 0.006$  и максимально возможном  $\alpha = 78$  дает  $\varepsilon = ch(0.47) = 1.11$ . Отличие  $u_{\varepsilon}$  от u меньше чем на 10% находится в пределах разброса экспериментально измеренных скоростей.

PS

О.И. Лейпунский\* использовал выражение для коэффициента эрозии :

 $\varepsilon = 1 + a\mathbf{a}^2$ 

И.Г. Ассовский\*\* предложил пользоваться выражением в виде полинома:  $m = m_0^2 + ag + bg^2$ ,

где *m* – массовая скорость горения без обдува, *a* и *b* – пост. коэффициенты

\*Лейпунский О.И. // Дис... д-ра физ. – мат. наук. М.: ИХФ АН СССР, 1945. \*\* Ассовский И.Г.// Физика горения и внутренняя баллистика. М.: Наука. 2005. 358 с.

#### При расчете давления в камере явление раздувания не учитывалось.

Спады давления в МРД. Опыты с основным соплом  $\sigma_i = 0.47 \text{ см}^2$  и дополнительными соплами  $0.166 \le \sigma_{ad} \le 2.01 \text{ см}^2$  ( $0.632 \le \sigma_f \le 2.476 \text{ см}^2$ ).



Кривые с точками – эксперимент, сплошные кривые – расчет по ФТНГ [1].

### Расчетная скорость горения при спадах давления



*t,* моек

Вариант №	$p_i$ атм	<i>и</i> <sub><i>i</i></sub> см/с	$\frac{s_f}{cm^2}$	$\sigma_{_{\mathrm{exp}}}$	σ	$\sigma / \sigma_{exp}$	<i>t</i> <sub>c</sub> , мс	<i>t<sub>ch</sub></i> , мс	$\chi_i$
1 (34)	85	0.860	0.63	1.34	1.41	1.05	1.35	9.0 (5.1)	6.66
2 (33)	88	0.876	0.78	1.66	1.67	1.01	1.30	7.8 (4.9)	6.00
3 (26)	86	0.866	1.01	2.15	1.94	0.90	1.33	8.0 (5.0)	6.00
4 (23)	98	0.938	2.48	5.28	4.78	0.91	1.16	8.0 (3.9)	6.89

# Обратная задача внутренней баллистики (ОЗВБ)

T = const

$$\begin{split} \tau_{ch} \, d_t(p/p_i) &= u/u_i - \sigma(p/p_i) & pV = m(RT_b/\mu) & \tau = V/A \, f \, s_i \\ u/u_i &= \sigma(p/p_i) + \tau_{ch} \, d_t(p/p_i) \\ \pi p_{II} & t = 0 & (\tau_{ch} \, /p_i) \, d_t p_0 = 1 - \sigma \quad \varkappa \quad \tau_{exi} = (1 - \sigma) \, p_i \, / d_t p_0 \\ u/u_i &= \sigma(p/p_i) + (1 - \sigma) \, d_t p/d_t p_0 \end{split}$$

T = var

Уравнениеие сохранения массы

$$\tau_{ch} d_t(\rho/\rho_i) = (u/u_i) - \sigma(p/p_i)^{1/2} (\rho/\rho_i)^{1/2}, \quad \sigma = s_f/s_i, \ ch \ \tau = V/A f s_i; \quad (1)$$
$$u/u_i = \sigma(p/p_i)^{1/2} (\rho/\rho_i)^{1/2} + \tau_{ch} d_t(\rho/\rho_i)$$

### Уравнение сохранения энергии

 $\begin{aligned} \tau_{ch} d_t(p/p_i) &= \gamma [(u/u_i) - \sigma (p/p_i)^{3/2} (\rho/\rho_i)^{-1/2}] \\ \pi p_{\mu} t &= 0 \quad (\tau_{ch} / p_i) d_t p_0 = \gamma (1 - \sigma) \quad \mu \quad \tau_{ch} = \tau_{exi} = \gamma (1 - \sigma) p_i / d_t p_0, \\ u/u_i &= \sigma (p/p_i)^{3/2} (\rho/\rho_i)^{-1/2} + (1 - \sigma) d_t p / d_t p_0 \end{aligned}$ 

- \*Райзберг Б.А., Ерохин Б.Т., Самсонов К.П. Основы теории рабочих процессов в ракетных системах на твердом топливе.// М.: Машиностроение. 1972.
- \*\*Соркин Р.Е. Теория внутрикамерных процессов в ракетных системах на твердом топливе. Внутренняя баллистика.// М.: Наука. 1983.

Архипов В.А., Бондарчук С.С., Коротких А.Г. Сравнительный анализ методов измерения нестационарной скорости горения. // Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46. № 5. С. 82-87 и С. 88-96.



Рис.1. Результаты измерения нестационарной скорости горения твердого топлива ОЗВБ – методом.  $a - p_0 = 107 \text{ атм}, d_t p \Big|_{max} = 25 \text{ атм/мс}; \quad 6 - p_0 = 29 \text{ атм}, d_t p \Big|_{max} = 29,5 \text{ атм/мс}; \quad e - p_0 = 60,7 \text{ атм}, d_t p \Big|_{max} = 43 \text{ атм/мс}, (гашение – повторное воспламенение}; \quad e - p_0 = 78,7 \text{ атм}, d_t p \Big|_{max} = 76,5 \text{ атм/мс}, (гашение);$ 



Рис.1. Результаты измерения нестационарной скорости горения твердого топлива методом скоростной киносъемки.

 $a - p_0 = 63$  атм,  $d_t p \Big|_{\text{max}} = 40$  атм/мс;  $6 - p_0 = 27$  атм,  $d_t p \Big|_{\text{max}} = 21,6$  атм/мс, (гашение – повторное воспламенение);  $s - p_0 = 67$  атм,  $d_t p \Big|_{\text{max}} = 40,7$  атм/мс, (гашение – повторное воспламенение);  $s - p_0 = 75$ атм,  $d_t p \Big|_{\text{max}} = 79,8$  атм/мс, (гашение);

### Расчет скорости горения при T = const,

теоретическом и экспериментальном характерном времени камеры и различном виде кривой спада давления





Расчет скорости горения при T = const и T = var, теоретическом и экспериментальном характерном времени камеры и кривой спада давления представленной в табличном варианте



Расчет скорости горения при T = const и T = var, теоретическом и экспериментальном характерном времени камеры и кривой спада давления представленной в табличном варианте



### Отношение нестационарной к квазистационарной Скорости горения при T = const,



### Отношение нестационарной к квазистационарной скорости горения при т = const,



# Отношение нестационарной к квазистационарной скорости горения при T = var,



# Отношение нестационарной к квазистационарной скорости горения при T = var,



### Расчет соотношения газоприхода с газорасходом





Вид поверхностей горения:

- а –видеофильм, порох НБ, *d* = 12 мм, *p* = 1 атм., фронтальная съемка и «на просвет» ;
- b видеофильм, коллоксилин, *d* = 10 мм, T = 700 C, *p* = 1 атм.;
- с фотография, октоген, d =10 мм, p = 1 атм.;
- d –фотография, ПХА, *d* = 10 мм, *p* = 35 атм.;
- е фотография, пироксилин, *d* =10 мм, *p* = 5 атм.
  - *р* давление, *d* диаметр образца, везде атмосфера азот

Профиль поперечной волны, распространяющийся по боковой поверхности образца пороха НБ диаметром 12 мм.



# Горение образца коллоксилина, 1 атм, 90 гр.С



Литература

- Маршаков В.Н., Новожилов Б.В. Переходные режимы горения баллиститного пороха в полузамкнутом объеме. // Химическая физика, 2011, т. 30, № 1, стр.25-37.
- Новожилов Б.В., Маршаков В.Н. Обратная задача теории нестационарного горения // Химическая физика , 2011, т.30, № 12, с. 26-31.
- Маршаков В.Н., Новожилов Б.В. Эрозионное горение порохов //Науч.-техн. сборник. Боеприпасы / ГНЦ РФ «ЦНИИХМ». 2010, №1, стр.34-36
- Маршаков В.Н., Пучков В.М., Финяков С.В. Температурный коэффициент скорости горения нитроглицериновых порохов // Химическая физика, 2010, т. 29, № 11, стр.78-81.
- Маршаков В.Н., Мелик-Гайказов Г.В., Пучков В.М. Стационарные режимы горения заряда в модельном РДТТ // Сб. Горение и Взрыв, Выпуск 3 (под общей ред. С.М.Фролова), М.: Торус Пресс, 2010, стр. 177-183.
- Маршаков В.Н., Истратов А.Г. Потухание порохового заряда при переходном режиме в модельном ракетном двигателе // Сб. Горение и Взрыв, Выпуск 4,часть 3. (под общей ред. С.М.Фролова), М.: Торус Пресс, 2011. С. 249-254.
- Маршаков В.Н., Истратов А.Г. Пучков В.М. Потухание порохового заряда при переходном режиме в модельном ракетном двигателе. Часть II. // Сб. Горение и Взрыв, Выпуск 5, часть 2. (под общей ред. С.М.Фролова), М.: Торус Пресс, 2012. С. 238-242.