

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

***В.Н. Маршаков, А.Г. Истратов, В.М. Пучков***

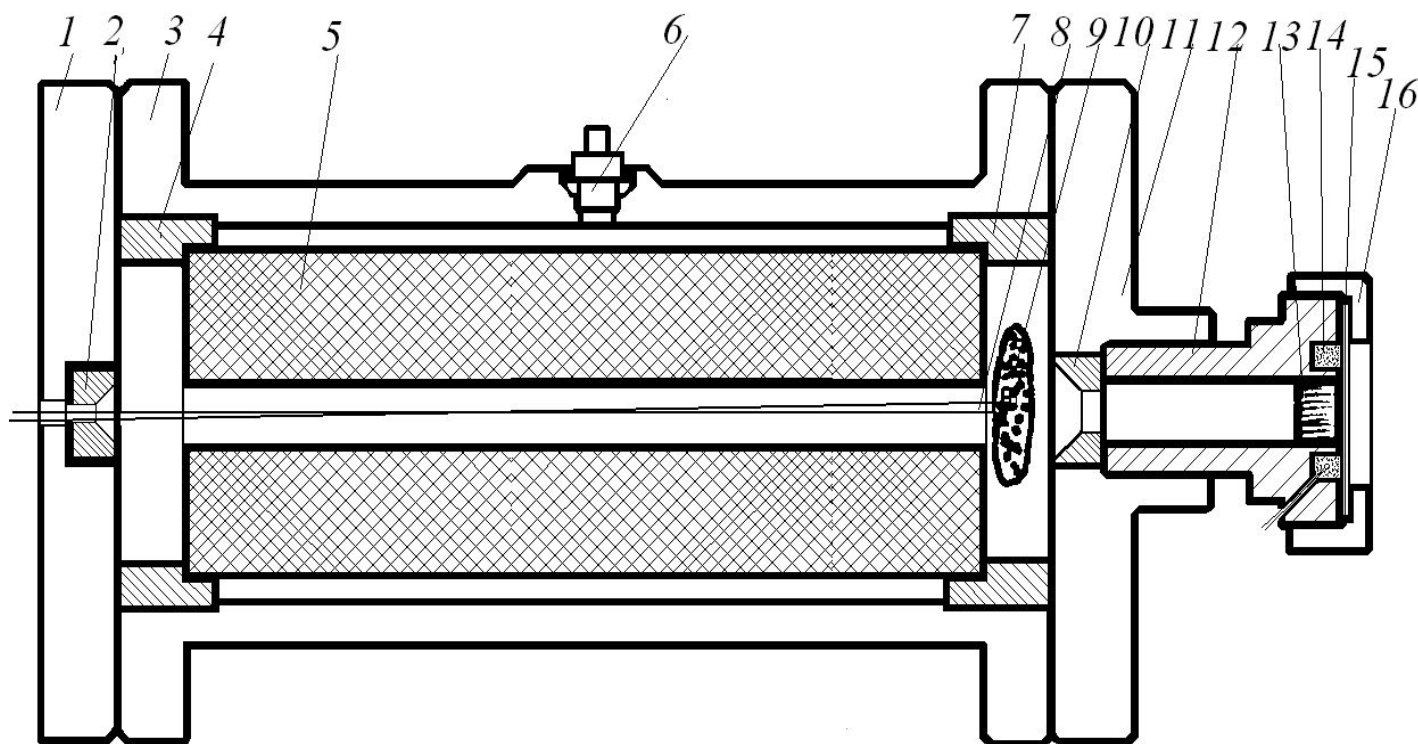
Г. Москва, ИХФ РАН,

E-mail: marsh\_35@mail.ru

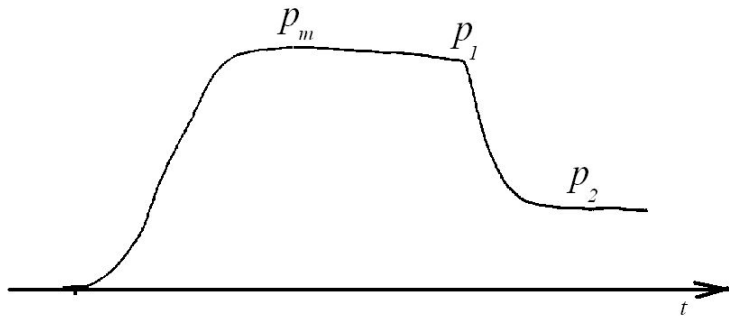
**2012 г.**

# 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



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

- $u = 0.062p^{0.57} \exp[(8.3 - 0.27p^{0.57}) \cdot 10^{-3} \cdot T_0]$ ,  $[u] = \text{см/с}$ ,  $[T] = \text{град.С}$   
 скорость горения в ППД не равна скорости горения в РД  
 $\rho = 1,6 \text{ г/см}^3$ ,  $T_B = 2260\text{К}$ ,  $\mu = 23,65 \text{ г/моль}$ ,  $F = RT_B / \mu = 7,94 \cdot 10^9 \text{ см}^2/\text{с}^2$   
 температура продуктов сгорания в РД из-за теплотерь меньше  $T_B$
- Заряд : 4,0/0,8 - 14,8 см, диаметр шашки и канала, длина,  $S_0 = 247,3 \text{ см}^2$ .  
 Камера: внутренний диаметр – 4,4 см, длина – 17см,  $V_c^0 = 80 \text{ см}^3$   
 Коэффициент истечения:  $A = B(\gamma) / f^{0.5}$ , при  $\gamma = 1,23$   $B(\gamma) \approx 0,65$ ,  $A = 7,3 \cdot 10^{-6} \text{ см/с}$ .
- 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  $\varkappa = S/F$ , где  $S$  – поверхность горения,  $F$  – проходное сечение камеры, численно примерно равное максимальной скорости обдувающего потока в м/с.  $\varepsilon$  имеет место при  $\varkappa$  больше примерно 60.

# Стационарные режимы горения заряда

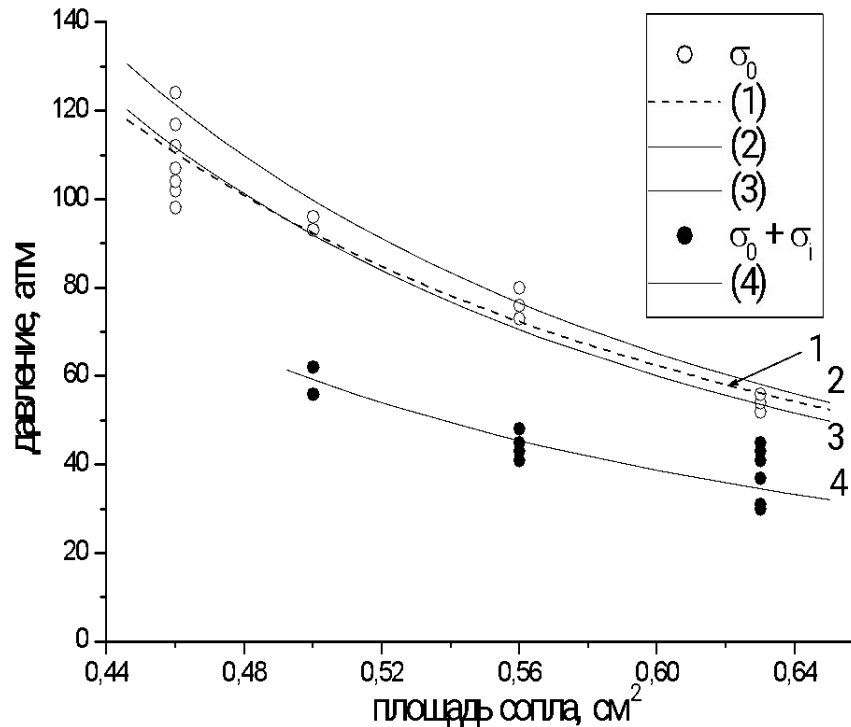


Рис.2 Зависимость давления в камере от площади сопла

$$p_m = 20,74 \sigma^{-2.15} \quad (\text{метод наим. квадратов}) \quad (1)$$

закон Бори :

$$p_m = [(\rho u_0 S_0) / A \sigma]^{2.34} = 19,7 \sigma^{-2.34} \quad (2)$$

$$p_m = 18,2 \sigma^{-2.34} \quad (3)$$

$$A^I = 7.68 \text{ г/см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{атм}, \quad A^I / A = \sim 1,04$$

$$p_2 = 11,7 \sigma^{-2.34}, \quad A^I \quad (4)$$

# 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:

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

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

Для цилиндрического канала получено:

$$\varepsilon = \text{ch}(\alpha \varepsilon),$$

где  $\varepsilon = S / F$  – 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 Боеприпасы. 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  $\varepsilon(\varkappa)$  для нашего случая при  $\alpha = 0.006$  и максимально возможном  $\varkappa = 78$  дает  $\varepsilon = \text{ch}(0.47) = 1.11$ .

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 :

$$\varepsilon = 1 + a\varkappa^2$$

И.Г. Ассовский\*\* предложил пользоваться выражением в виде полинома:

$$m = m_0 + ag + bg^2,$$

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

---

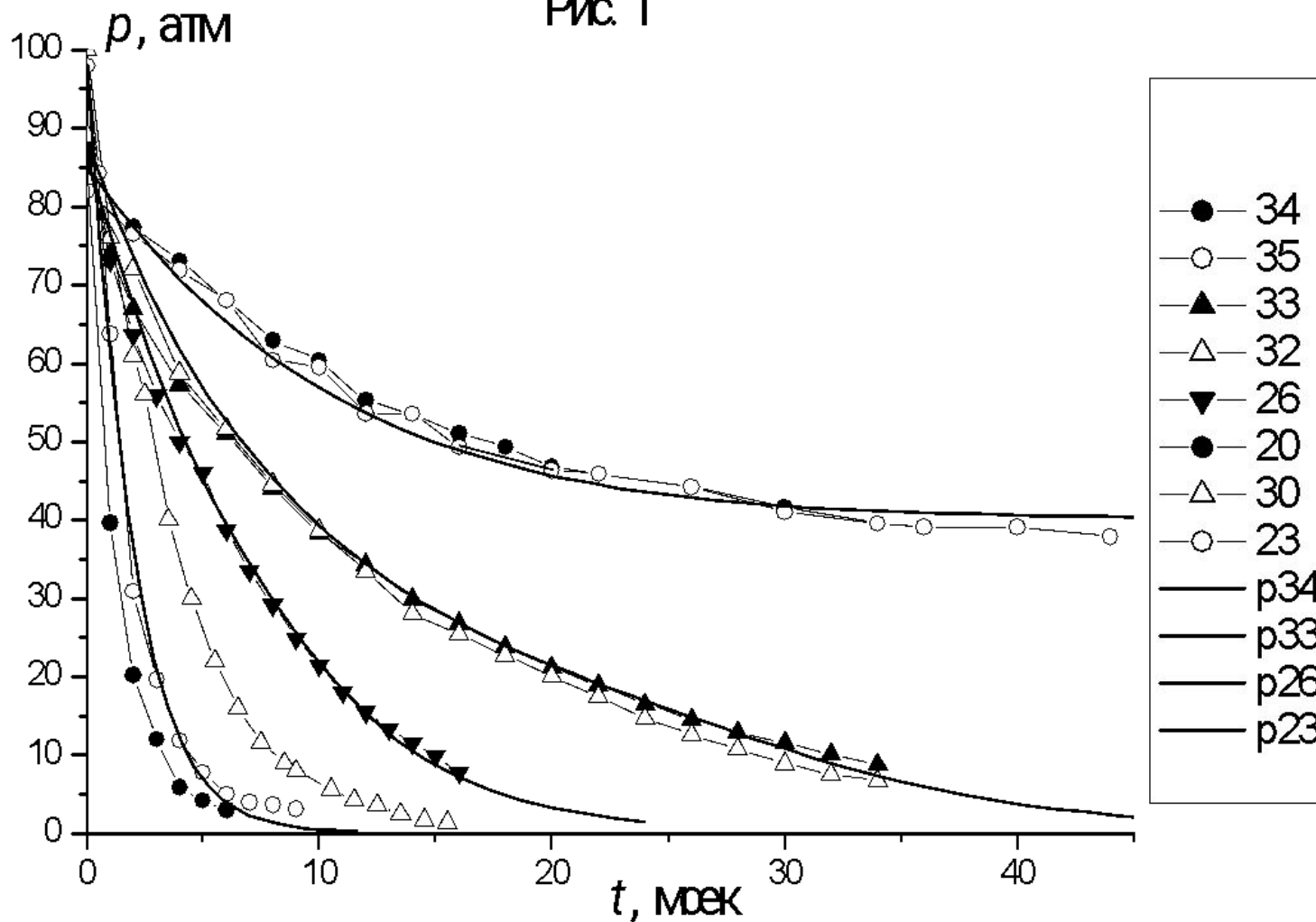
\*Лейпунский О.И. // Дис... д-ра физ. – мат. наук. М.: ИХФ АН СССР, 1945.

\*\* Ассовский И.Г.// Физика горения и внутренняя баллистика. М.: Наука. 2005. 358 с.

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

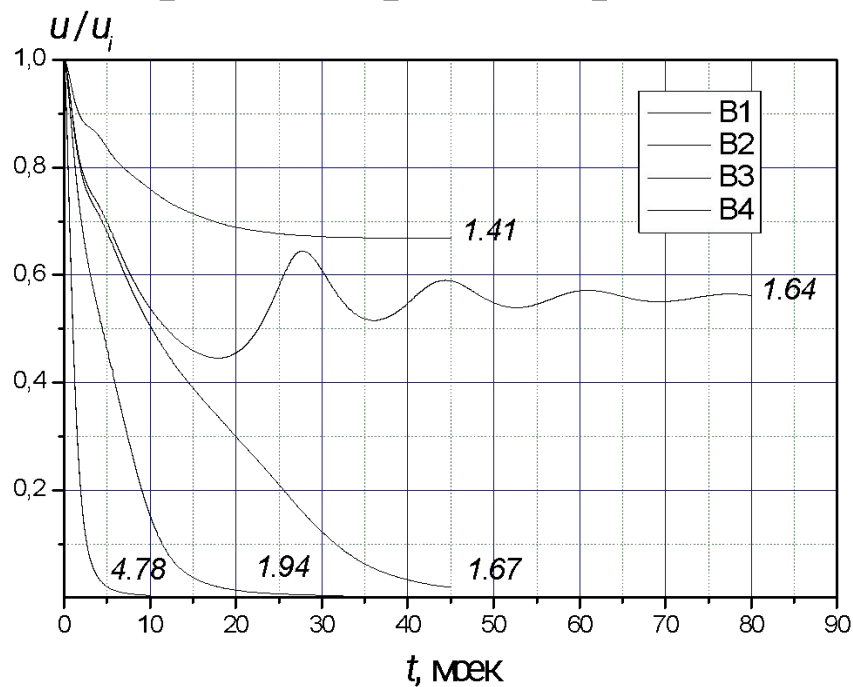
Спады давления в МРД. Опыты с основным соплом  $\sigma_i = 0.47 \text{ см}^2$  и дополнительными соплами  $0.166 \leq \sigma_{ad} \leq 2.01 \text{ см}^2$  ( $0.632 \leq \sigma_f \leq 2.476 \text{ см}^2$ ).

Рис. 1



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

# Расчетная скорость горения при спадах давления



Вариант №	$p_i$ атм	$u_i$ см/с	$s_f$ см <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{exp}}$	$\sigma$	$\frac{\sigma}{\sigma_{\text{exp}}}$	$t_c$ , мс	$t_{ch}$ , 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**

$$\tau_{ch} d_t(p/p_i) = u/u_i - \sigma(p/p_i) \quad pV = m(RT_b/\mu) \quad \tau = V/A f s_i$$

$$u/u_i = \sigma(p/p_i) + \tau_{ch} d_t(p/p_i)$$

при  $t = 0$   $(\tau_{ch}/p_i) d_t p_0 = 1 - \sigma$  и  $\tau_{exi} = (1 - \sigma) p_i / d_t p_0$

$$u/u_i = \sigma(p/p_i) + (1 - \sigma) d_t p / d_t p_0$$

**T = var**

Уравнение сохранения массы

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

$$u/u_i = \sigma(p/p_i)^{1/2} (\rho/\rho_i)^{1/2} + \tau_{ch} d_t(\rho/\rho_i)$$

Уравнение сохранения энергии

$$\tau_{ch} d_t(p/p_i) = \gamma[(u/u_i) - \sigma(p/p_i)^{3/2} (\rho/\rho_i)^{-1/2}] \quad (2)$$

при  $t = 0$   $(\tau_{ch}/p_i) d_t p_0 = \gamma(1 - \sigma)$  и  $\tau_{ch} = \tau_{exi} = \gamma(1 - \sigma) p_i / d_t p_0$ ,

$$u/u_i = \sigma(p/p_i)^{3/2} (\rho/\rho_i)^{-1/2} + (1 - \sigma) d_t p / d_t p_0$$

- \*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.

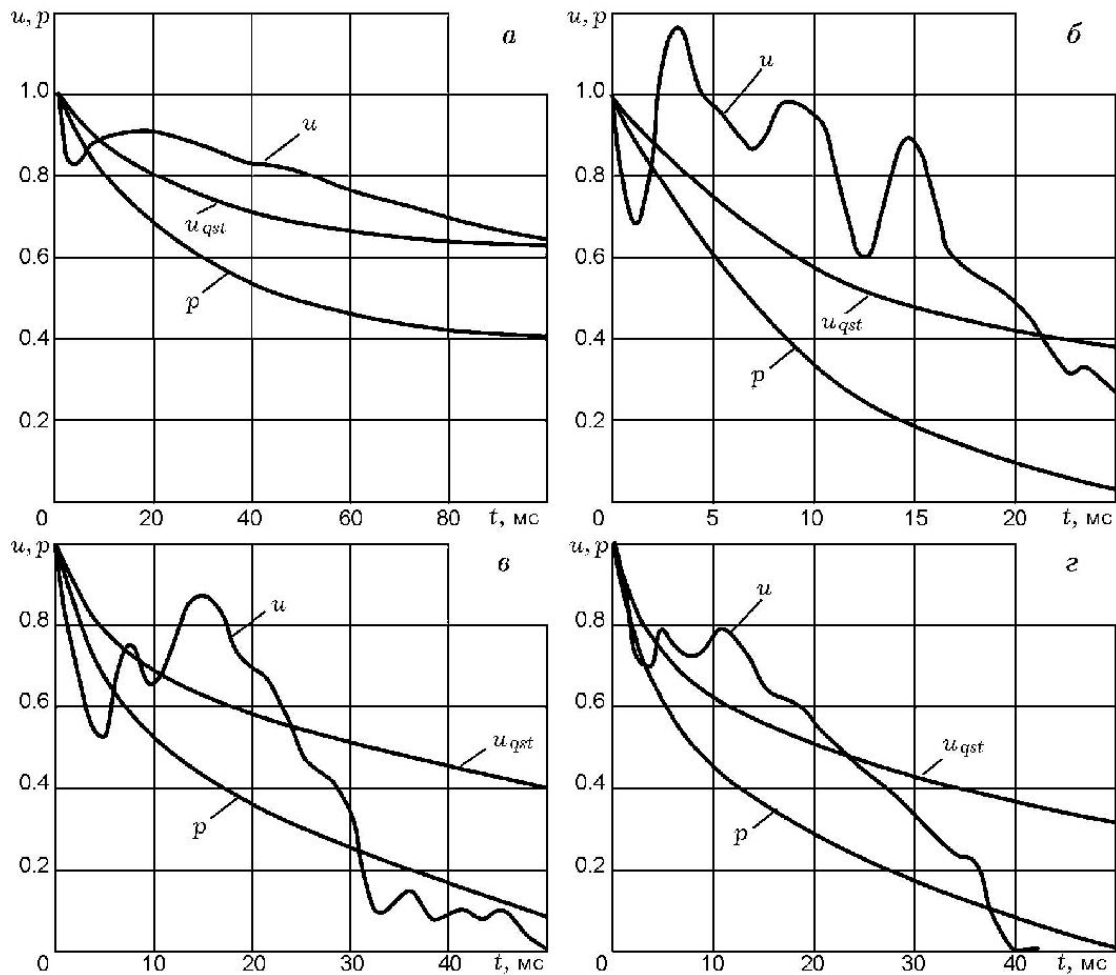
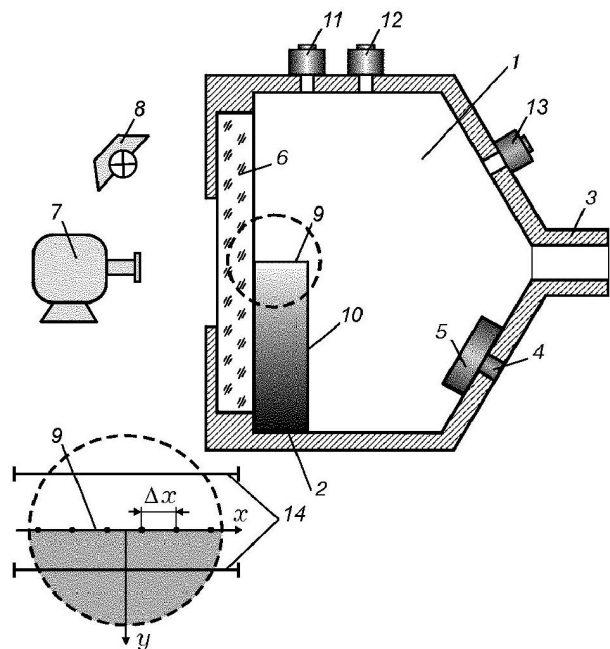


Рис.1. Результаты измерения нестационарной скорости горения твердого топлива ОЗВБ – методом.  
 а –  $p_0 = 107$  атм,  $d_t p \Big|_{\max} = 25$  атм/мс;    б –  $p_0 = 29$  атм,  $d_t p \Big|_{\max} = 29,5$  атм/мс;    в –  $p_0 = 60,7$  атм,  $d_t p \Big|_{\max} = 43$  атм/мс, (гашение – повторное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

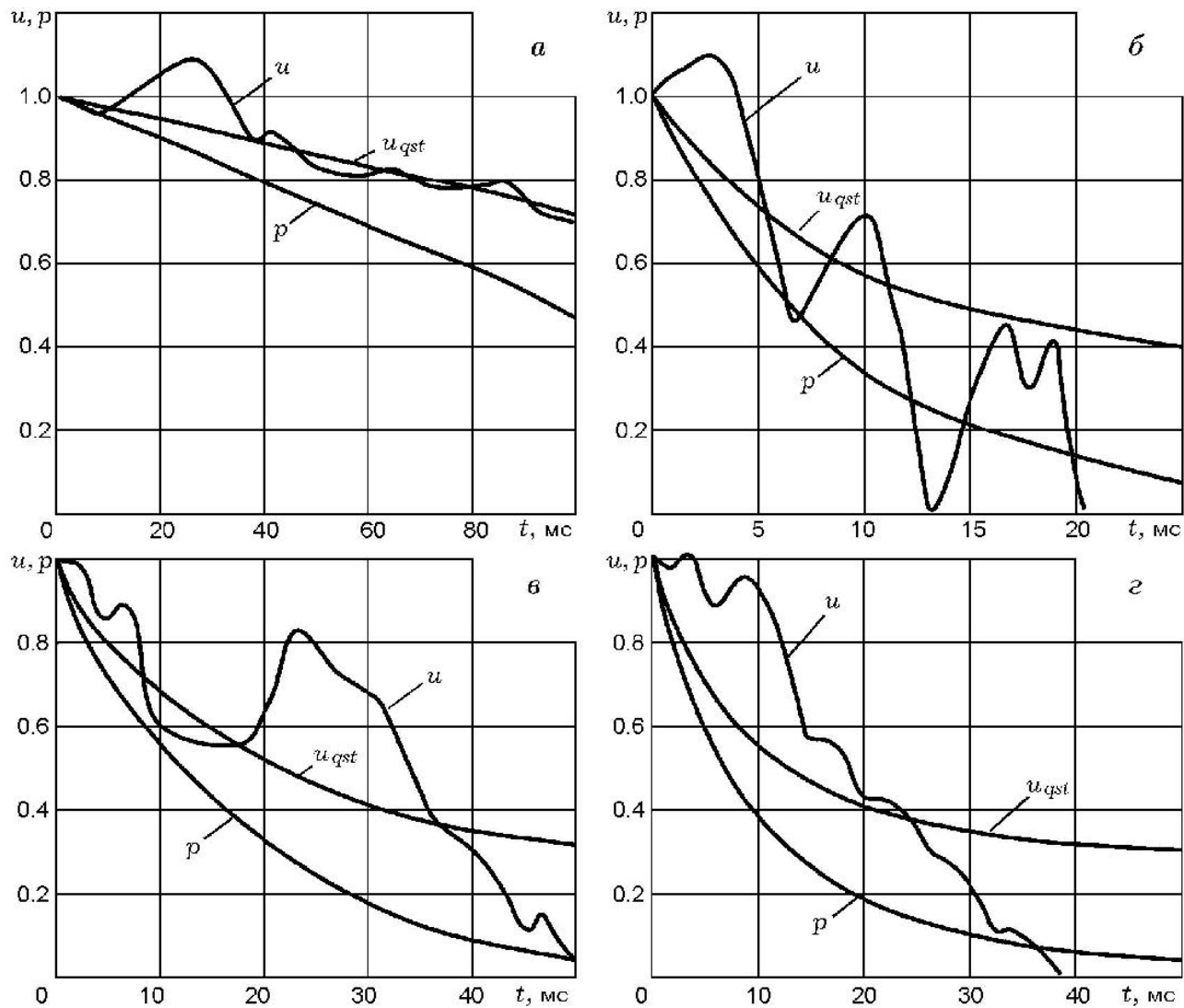
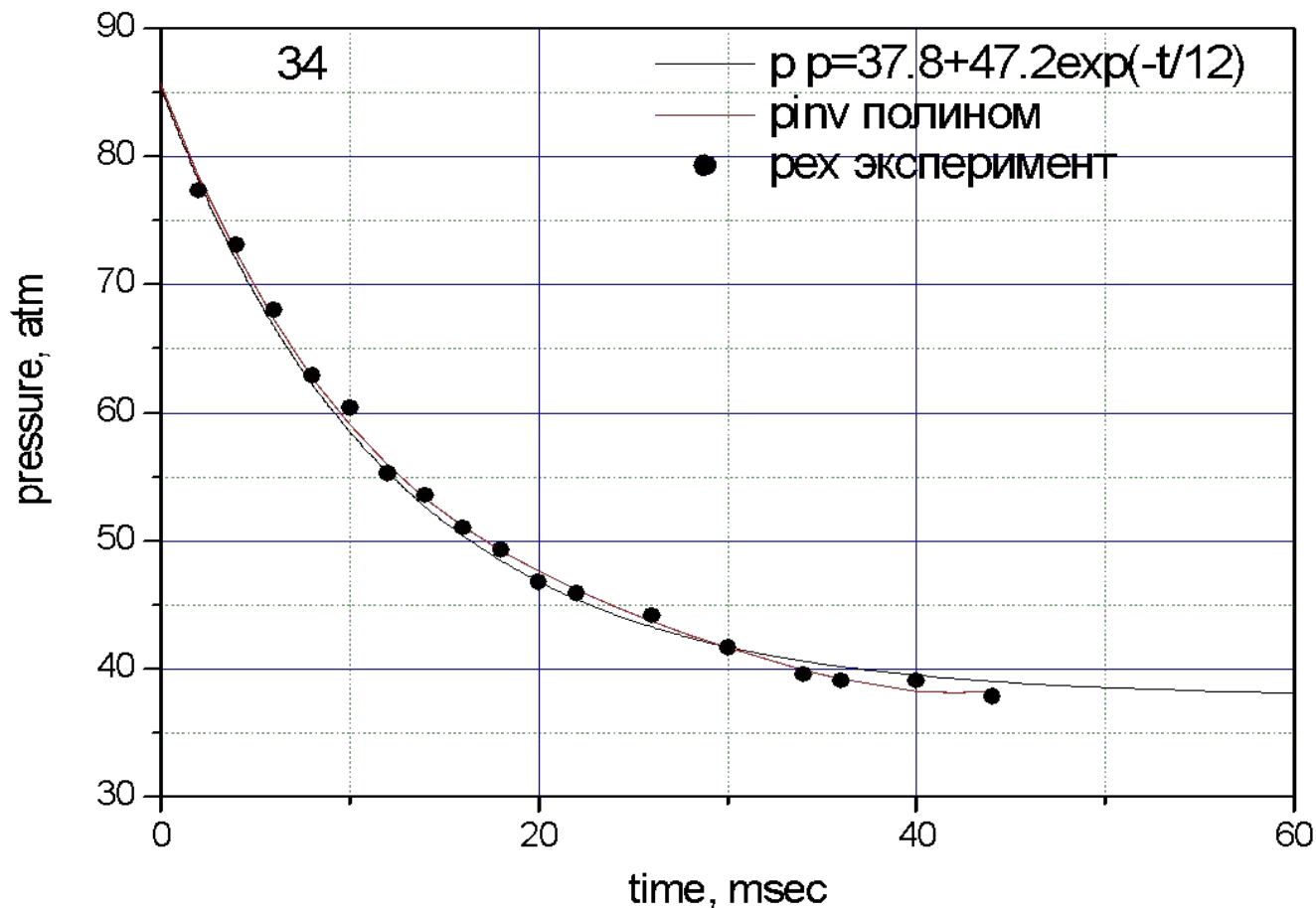
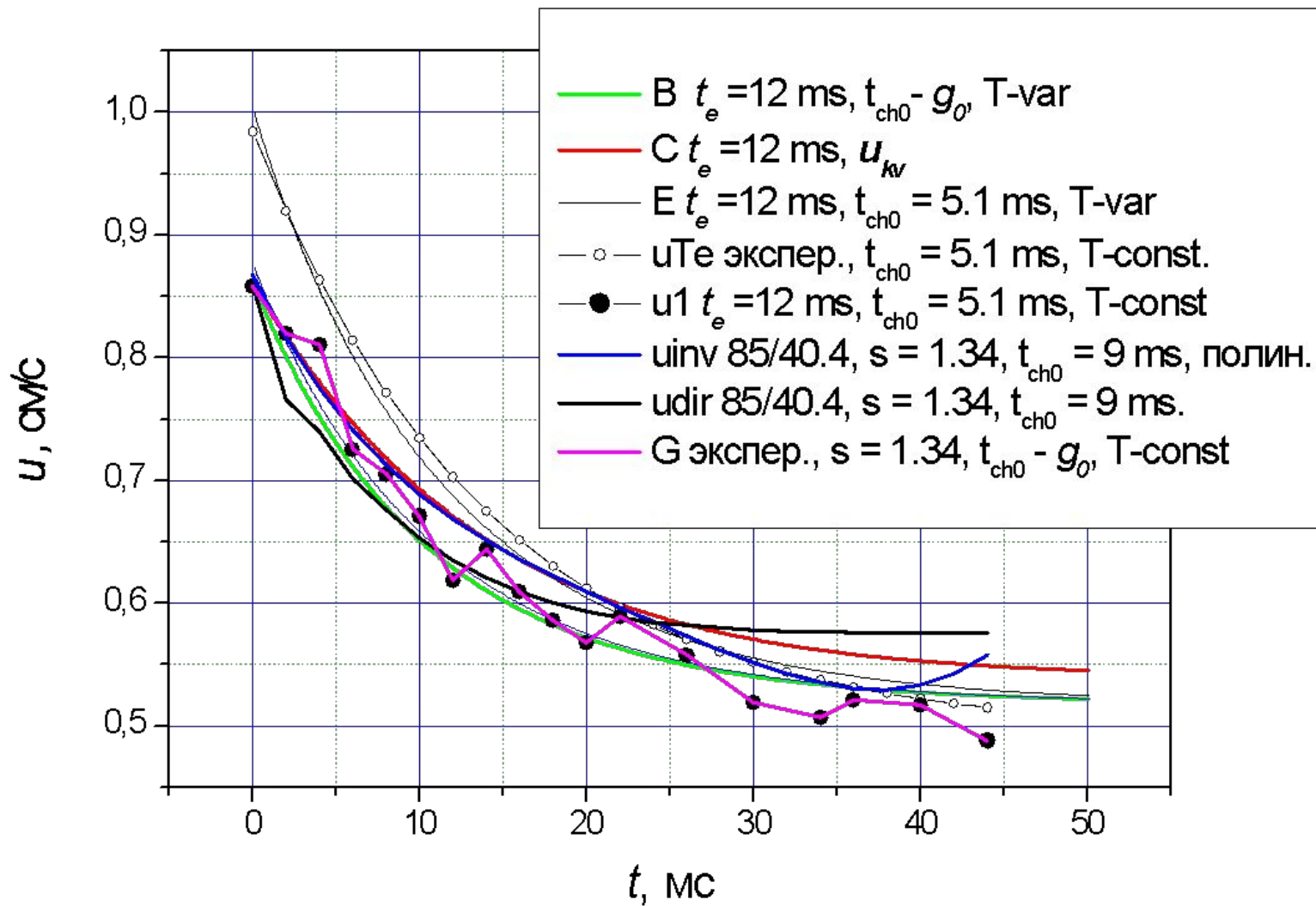


Рис.1. Результаты измерения нестационарной скорости горения твердого топлива методом скоростной киносъемки.

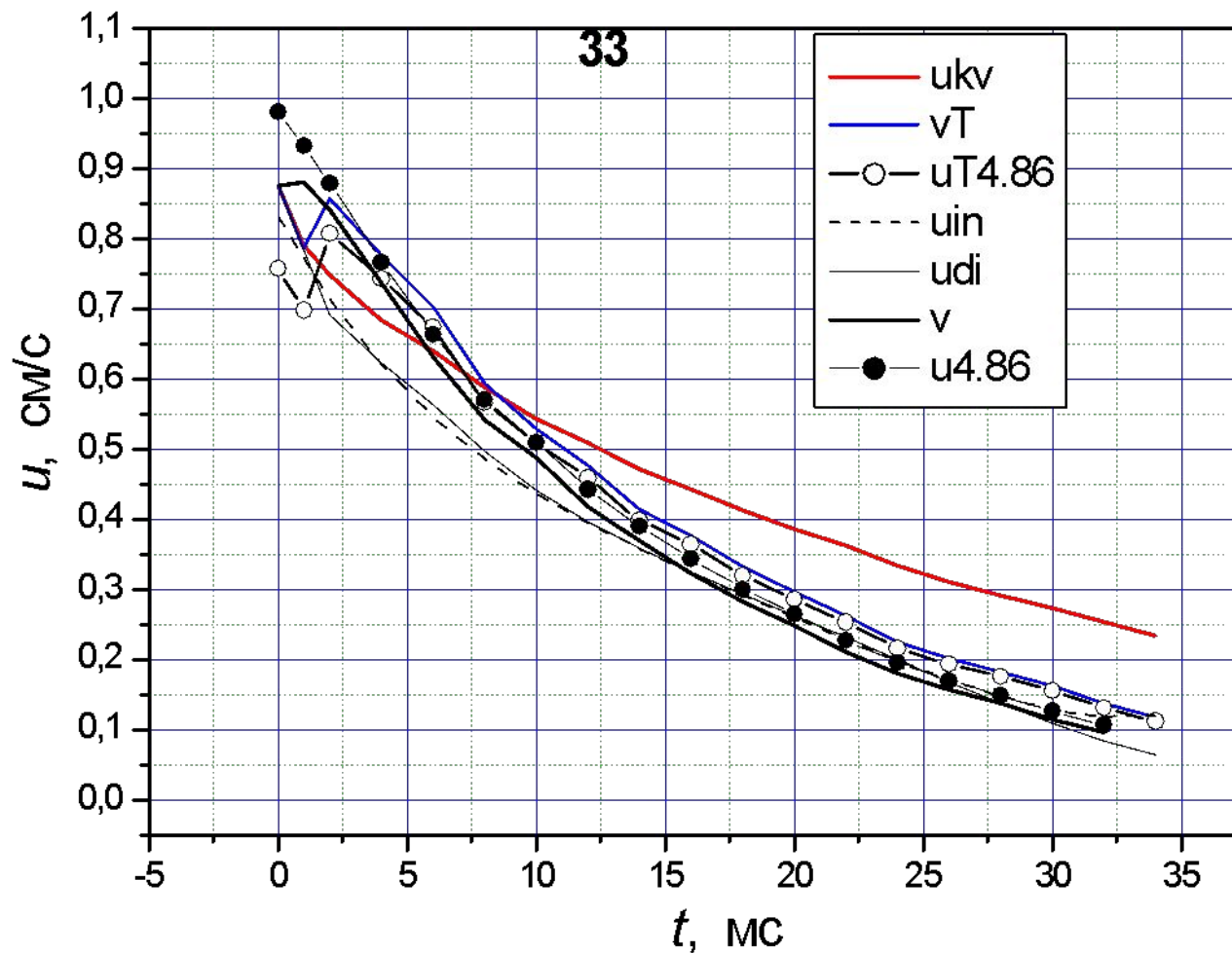
$a - p_0 = 63 \text{ атм}, d_t p|_{\text{max}} = 40 \text{ атм/мс}$ ;  $б - p_0 = 27 \text{ атм}, d_t p|_{\text{max}} = 21,6 \text{ атм/мс}$ , (гашение – повторное воспламенение);  
 $в - p_0 = 67 \text{ атм}, d_t p|_{\text{max}} = 40,7 \text{ атм/мс}$ , (гашение – повторное воспламенение);  
 $г - p_0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

# Расчет скорости горения при $T = \text{const}$ , теоретическом и экспериментальном характерном времени камеры и различном виде кривой спада давления

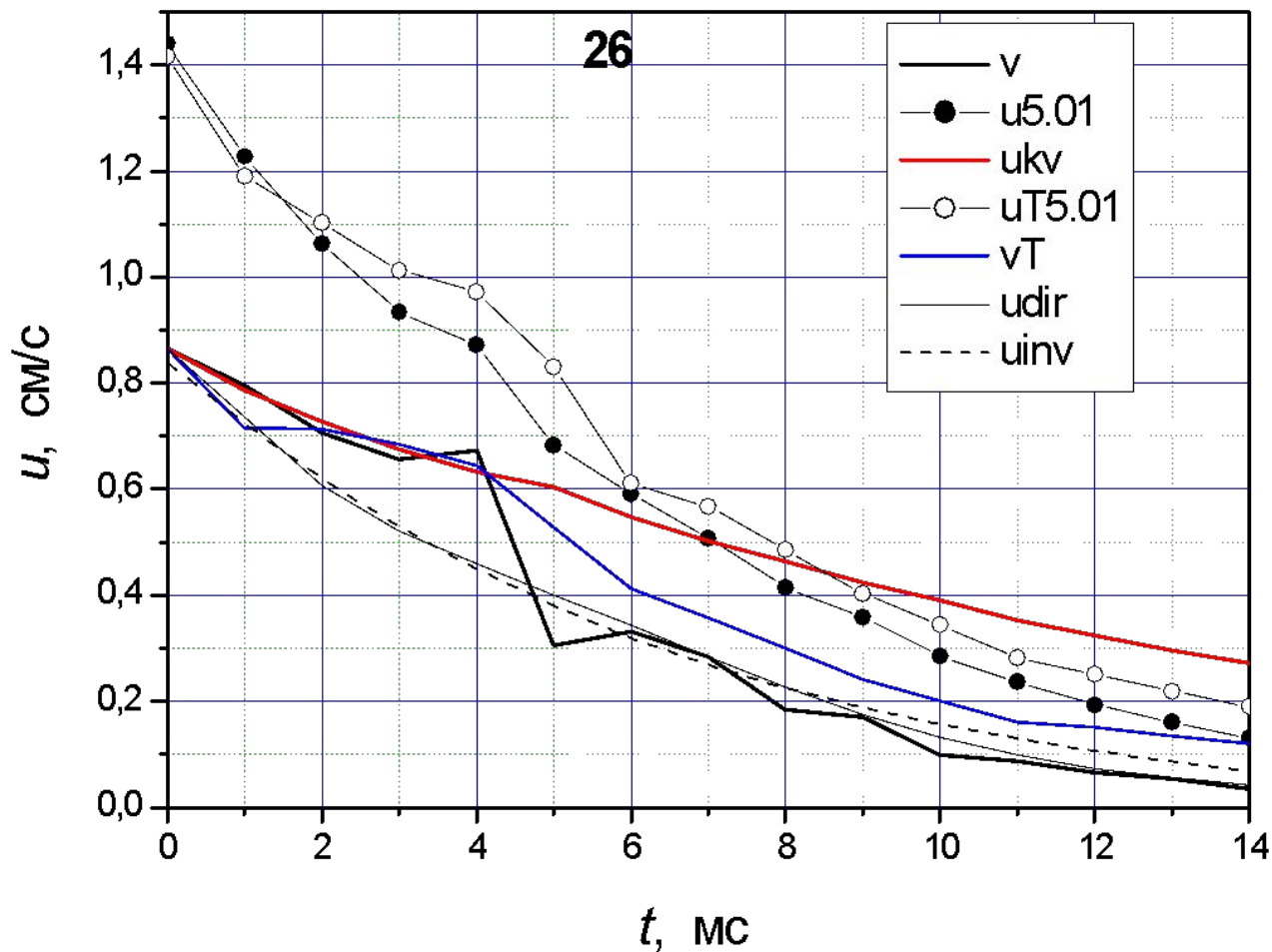




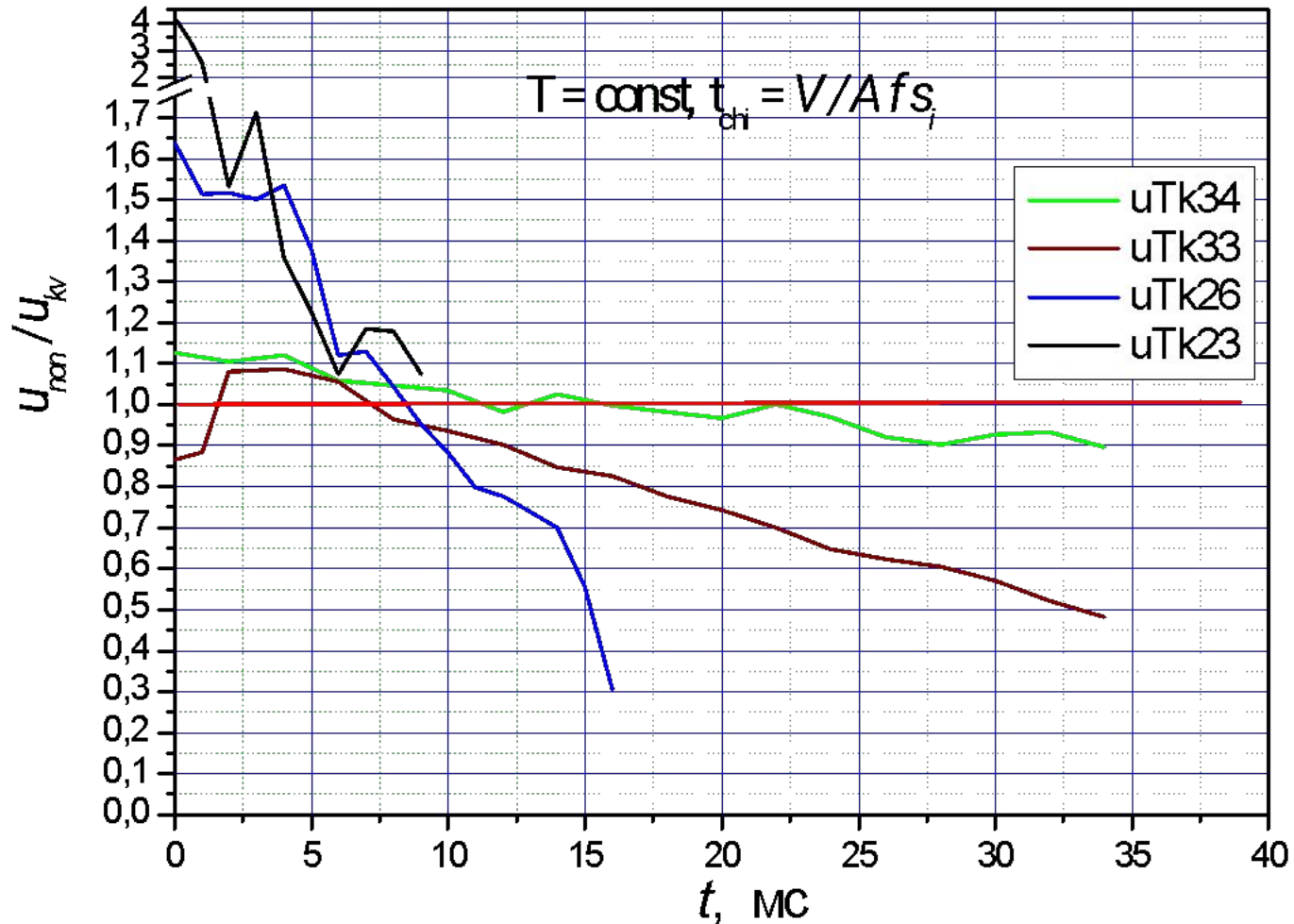
Расчет скорости горения при  $T = \text{const}$  и  $T = \text{var}$ ,  
теоретическом и экспериментальном характерном времени камеры  
и кривой спада давления представленной в табличном варианте



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

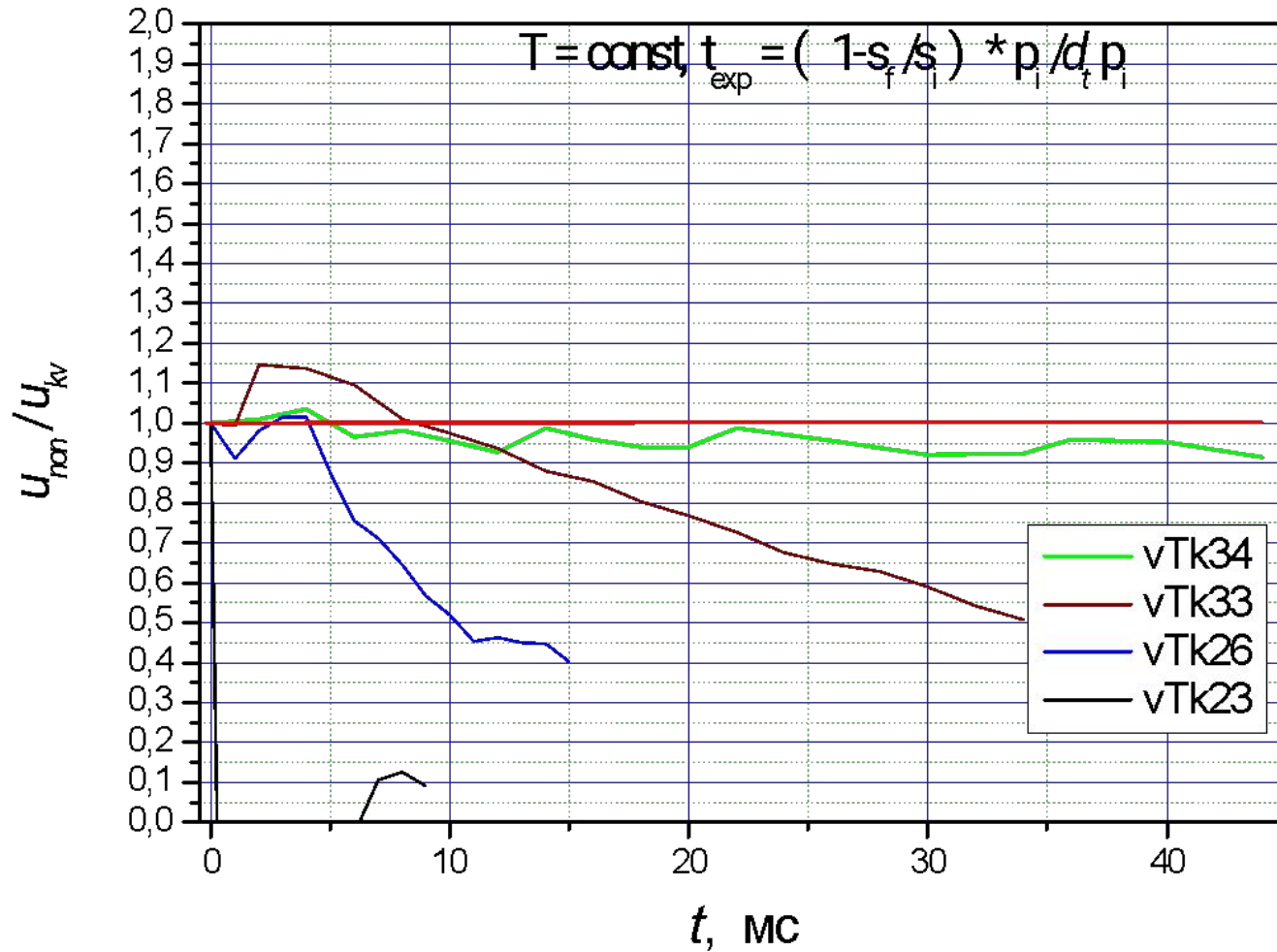


# Отношение нестационарной к квазистационарной скорости горения при $T = \text{const}$ , теоретическом и экспериментальном характерном времени камеры

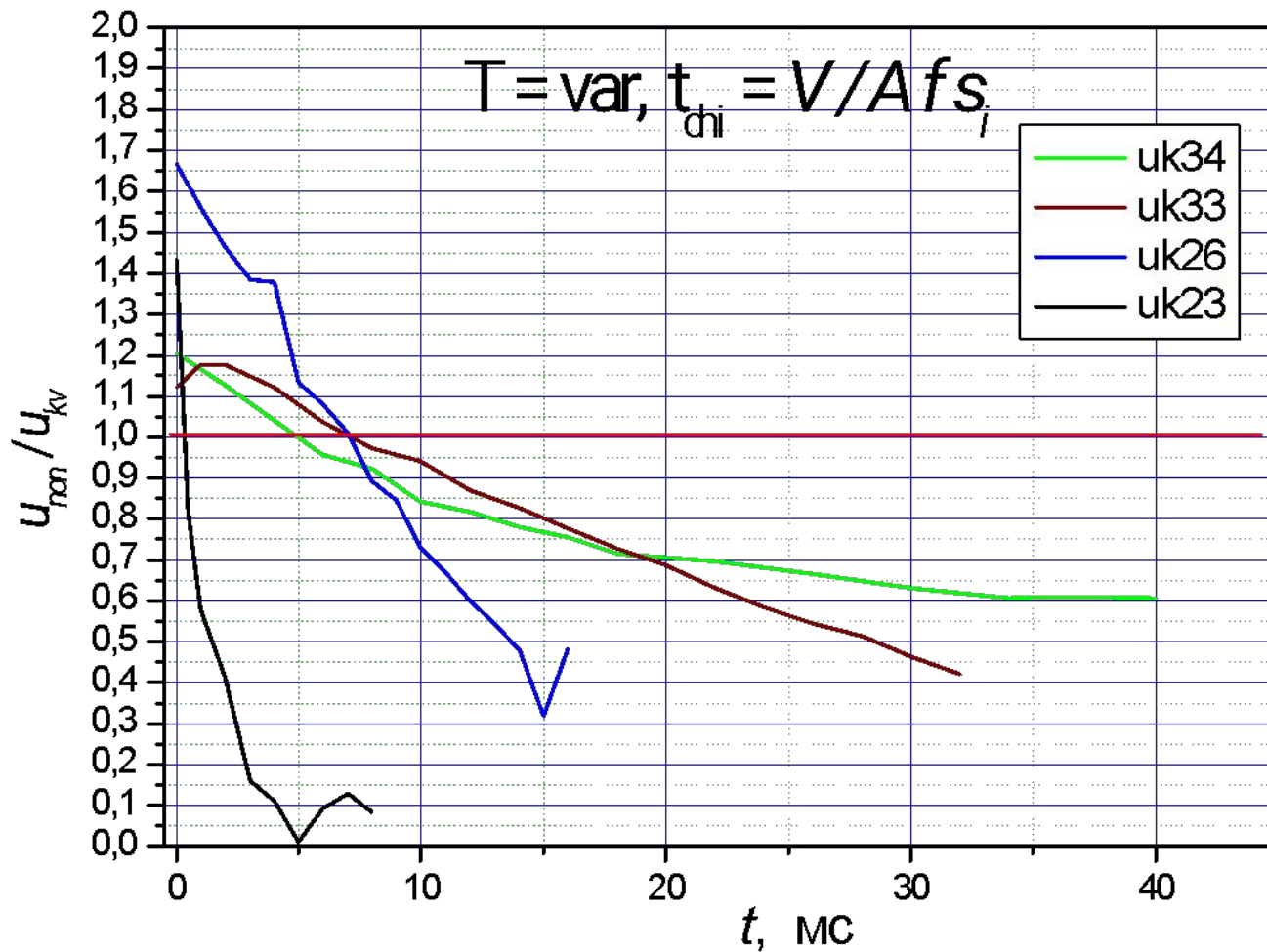




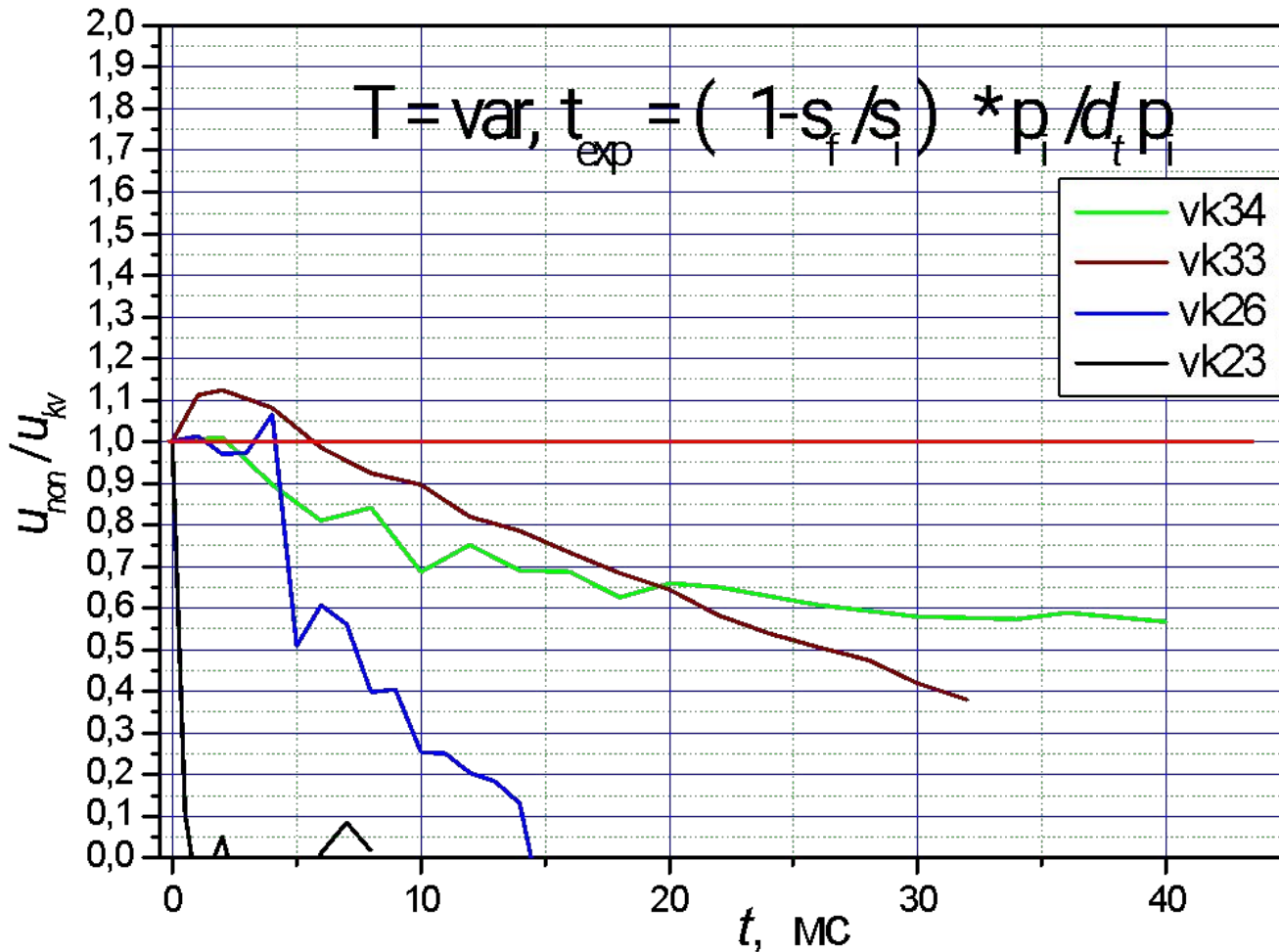
# Отношение нестационарной к квазистационарной скорости горения при $T = \text{const}$ , теоретическом и экспериментальном характерном времени камеры



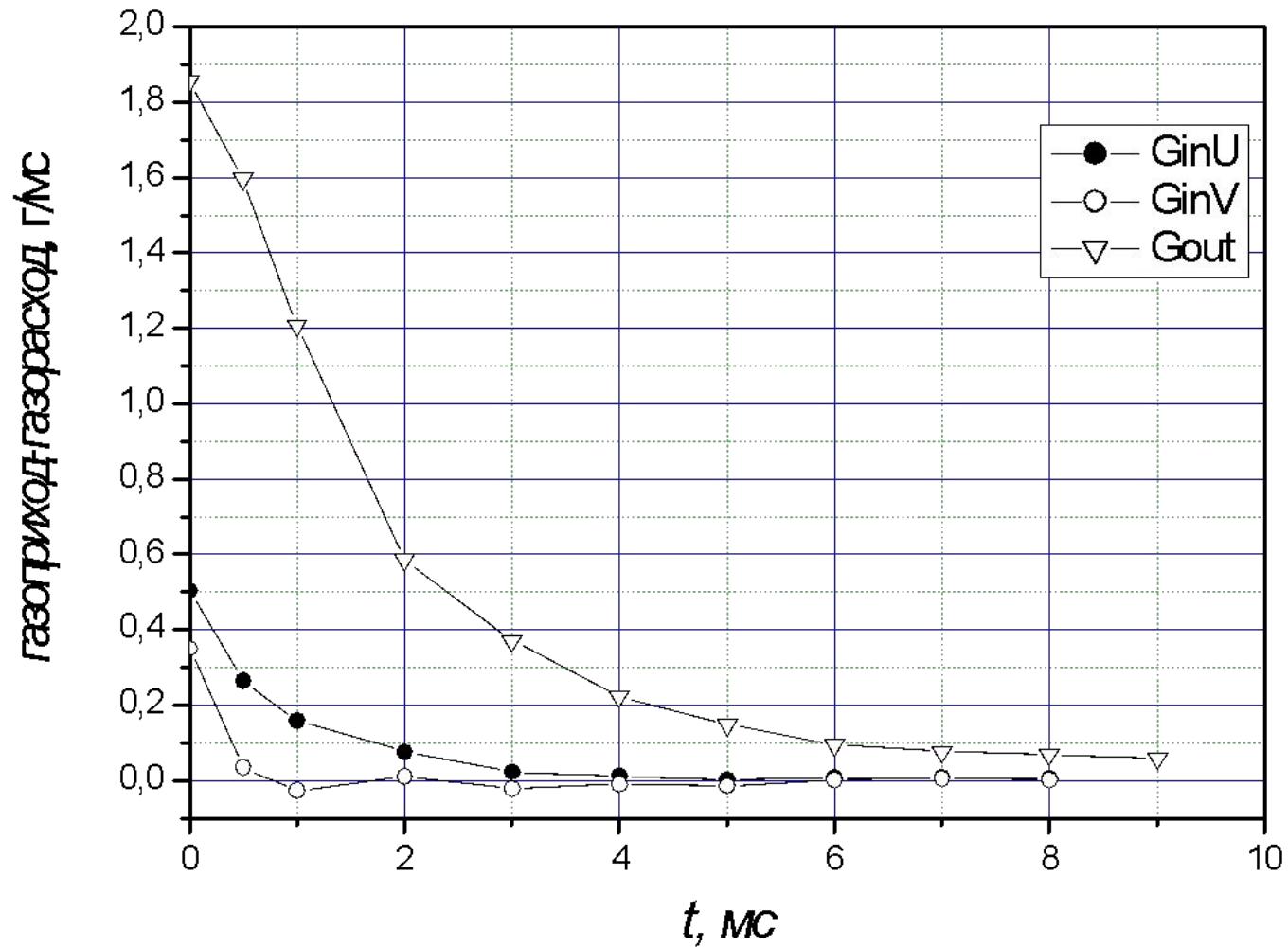
# Отношение нестационарной к квазистационарной скорости горения при $T = \text{var}$ , теоретическом и экспериментальном характерном времени камеры



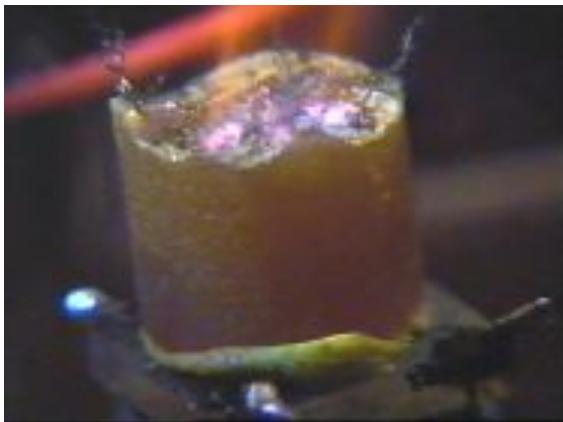
# Отношение нестационарной к квазистационарной скорости горения при $T = \text{var}$ , теоретическом и экспериментальном характерном времени камеры



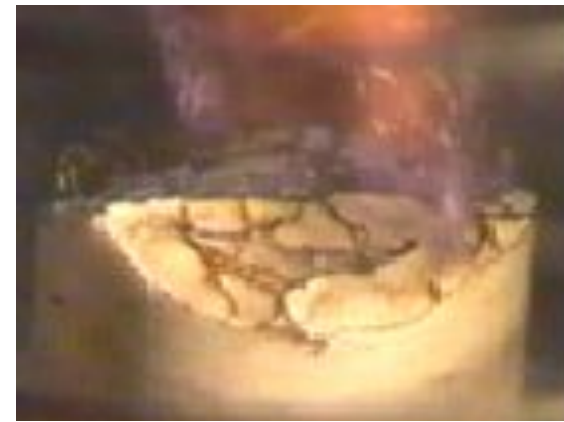
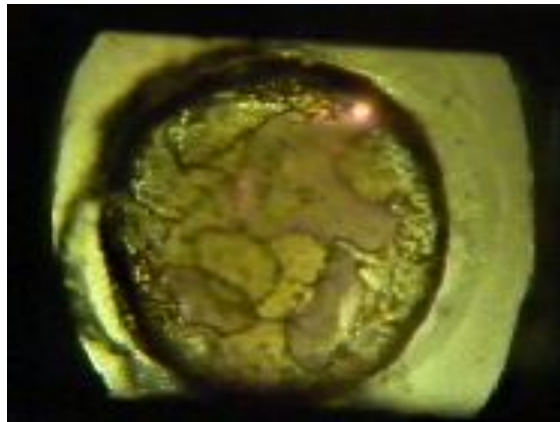
# Расчет соотношения газоприхода с газорасходом



a



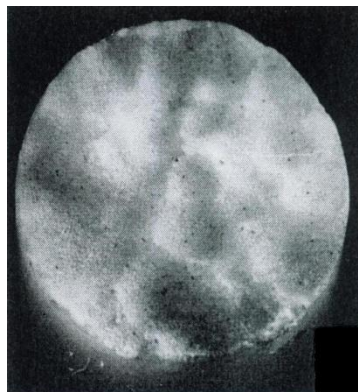
b



c



d



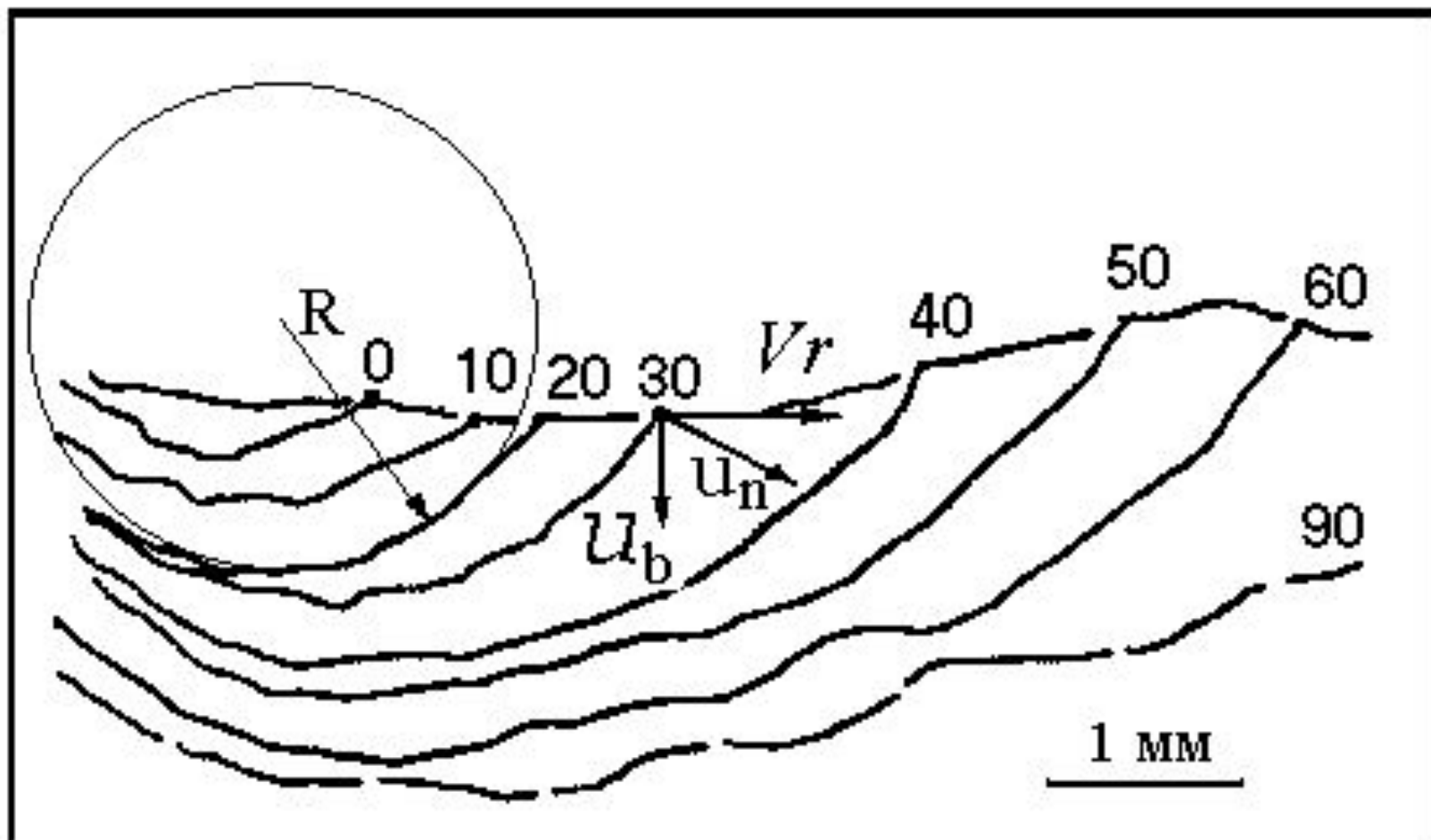
e



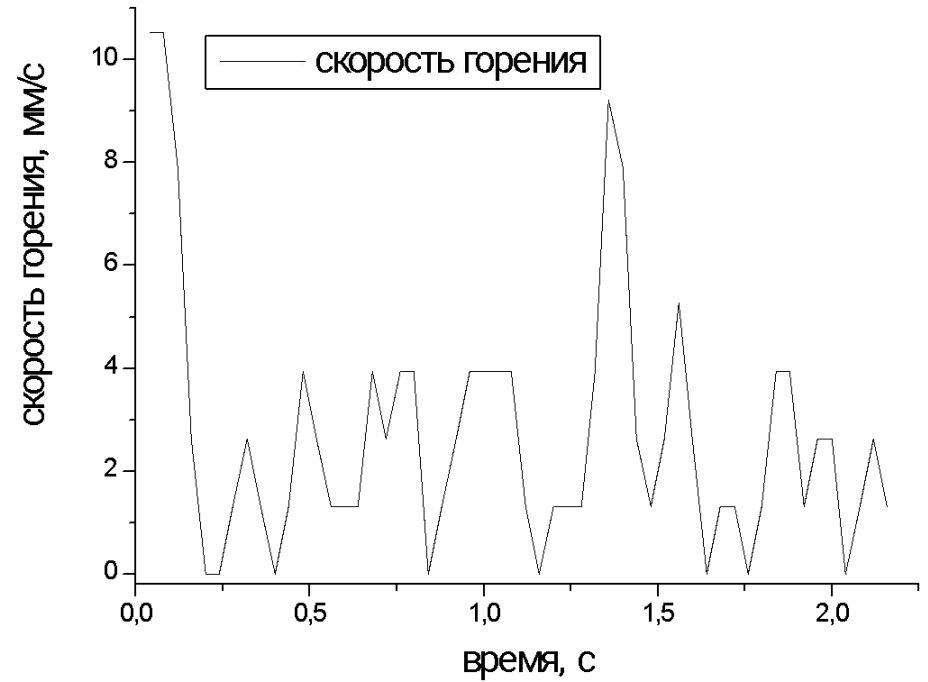
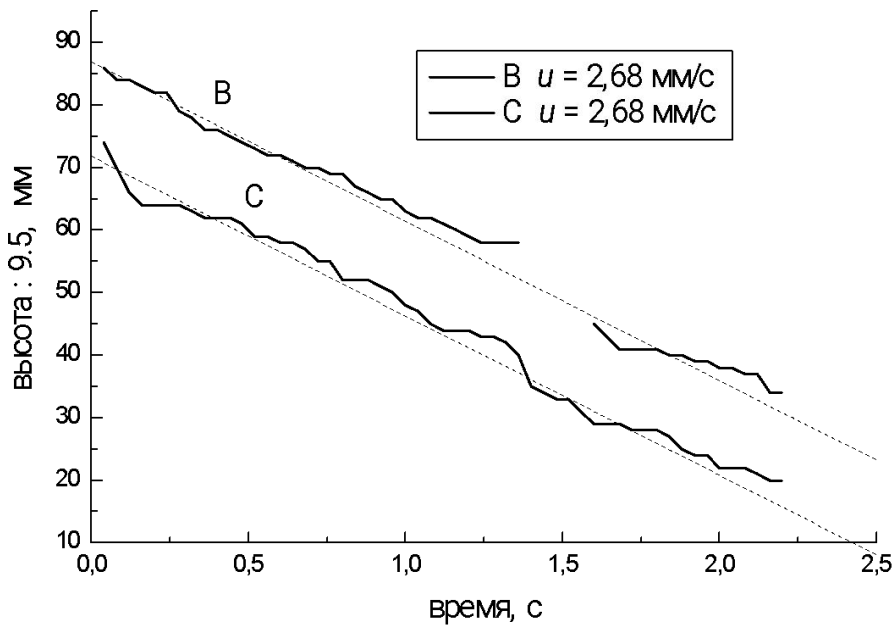
### Вид поверхностей горения:

- a – видеофильм, порох НБ,  $d = 12$  мм,  $p = 1$  атм., фронтальная съемка и «на просвет» ;
  - b – видеофильм, коллоксилин,  $d = 10$  мм,  $T = 700$  С,  $p = 1$  атм.;
  - c – фотография, октоген,  $d = 10$  мм,  $p = 1$  атм.;
  - d – фотография, ПХА,  $d = 10$  мм,  $p = 35$  атм.;
  - e – фотография, пироксилин,  $d = 10$  мм,  $p = 5$  атм.
- $p$  – 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.