

**Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ технической физики  
им. акад. Е.И.Забабихина, Снежинск, Россия**

***ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С  
ПРОМЫШЛЕННЫМ ВВ***

***Ю.А. Аминов, В.И. Волков, В.П. Воронина, Г.В. Коваленко,  
Н.С. Еськов, Ю.Р. Никитенко***

***Международная «Математическая конференция 5  
лабораторий»***

***Вена, Австрия, 19-24 июня, 2005***

## **Введение**

**В докладе представлены результаты численного моделирования экспериментов по исследованию свойств смесового промышленного взрывчатого вещества ПЖВ-20У.**

**В единой манере удалось описать следующие эксперименты с ПЖВ-20У:**

- определение зависимости скорости детонации от диаметра для открытых цилиндрических зарядов;**
- разлет медных оболочек, метаемых детонирующими цилиндрическими зарядами в оболочке;**
- определение ударно-волновой чувствительности ВВ.**

**Получено хорошее согласие расчетных результатов с экспериментальными данными.**

**Расчеты проводились по гидродинамическому комплексу МАХ.**

**Комплекс МАХ позволяет рассчитывать сложные двумерные течения с учетом кинетики физико-химических превращений.**

# ПОСТАНОВКА РАСЧЕТОВ

## Уравнения состояния инертных материалов

Для инертных материалов использовалось уравнение состояния типа Ми-Грюнайзена:

$$P = P_x + \gamma \rho (E - E_x), \quad P_x = \frac{\rho_0 c_0^2}{n} (\delta^n - 1), \quad E_x = \frac{c_0^2}{n} \left( \frac{\delta^{n-1} - 1}{n-1} + \frac{1}{\delta} - 1 \right)$$

Здесь  $P$  - давление,  $E$  - удельная внутренняя энергия, ( $P_x$ ,  $E_x$  - холодные составляющие),  $\rho_0$ ,  $c_0$  - плотность и скорость звука в несжатом веществе,  $\delta = \rho / \rho_{0k}$ ,  $\rho_{0k}$  - кристаллическая плотность,  $\gamma$  и  $n$  - константы.

Значения параметров уравнения состояния для инертных материалов.

Вещество	$\rho_0$ г/см <sup>3</sup>	$\rho_{0k}$ г/см <sup>3</sup>	$c_0$ км/с	$\gamma$	$n$
фторопласт	2.19	2.19	1.7	1.883	6.4
медь	8.9	8.937	3.60	2.67	6.0

## Уравнения состояния ПЖВ-20У

- Для **нереагирующего ВВ** использовалось уравнение состояния типа Ми-Грюнайзена со значениями параметров:  $\rho_{0k}=1.7975$  г/см<sup>3</sup>;  $c_0=3$  км/с;  $n=6.35$ ;  $\gamma=1.2366$ .
- Для **продуктов взрыва** использовалось уравнение состояния В.Ф. Куропатенко(\*) с параметрами:  $D_{0k}=5.6$  км/с,  $\alpha=0.35$ . При начальной плотности  $\rho_0=1.2$  г/см<sup>3</sup> расчетные значения скорости детонации и давления в точке Чепмена-Жуге составляли  $D_{CJ}=4.86$  км/с;  $P_{CJ}=8.1$  ГПа.
- Для описания разложения ВВ ПЖВ-20У применялась разработанная во ВНИИТФ **двухстадийная полуэмпирическая модель макрокинетики детонации**. Модель основана на гипотезе горячих точек, подтвержденной в многочисленных экспериментах с гетерогенными ВВ.

\* Уравнение состояния продуктов детонации плотных ВВ. Физика горения и взрыва, 1989, т.25, №6, с. 112-117

## Модель разложения ВВ

Кинетическое уравнение имеет следующий вид:

$$\frac{d\xi}{dt} = \begin{cases} -W \cdot \frac{\rho_{BB}}{\rho_{0k}^{1/3} \cdot \rho_{ПВ}^{2/3}} \cdot \left(\frac{1-\xi}{\theta}\right)^{2/3} \cdot \exp(-E_a / 3E_t^*) \cdot U(\sigma), & \frac{\theta \cdot \xi}{\rho_{BB}} > \frac{1-\xi}{\rho_{ПВ}}; \\ -W \cdot \left(\frac{\rho_{BB}}{\rho_{0k}}\right)^{1/3} \cdot \xi^{2/3} \cdot \exp(-E_a / 3E_t^*) \cdot U(\sigma), & \frac{\theta \cdot \xi}{\rho_{BB}} \leq \frac{1-\xi}{\rho_{ПВ}}. \end{cases}$$

$$W = W_0 \left( \alpha + \frac{\beta}{1 + \exp(\lambda(\mu - \xi))} \right), \quad U(\sigma) = \operatorname{arctg}(a\sigma + b\sigma^m).$$

$\sigma = P/P_{CJ}$ ;  $P_{CJ}$  – давление в точке Чепмена-Жуге;

$E_a$  – эффективная энергия активации;

$E_t^*$  – тепловая составляющая удельной внутренней энергии ВВ на фронте волны;

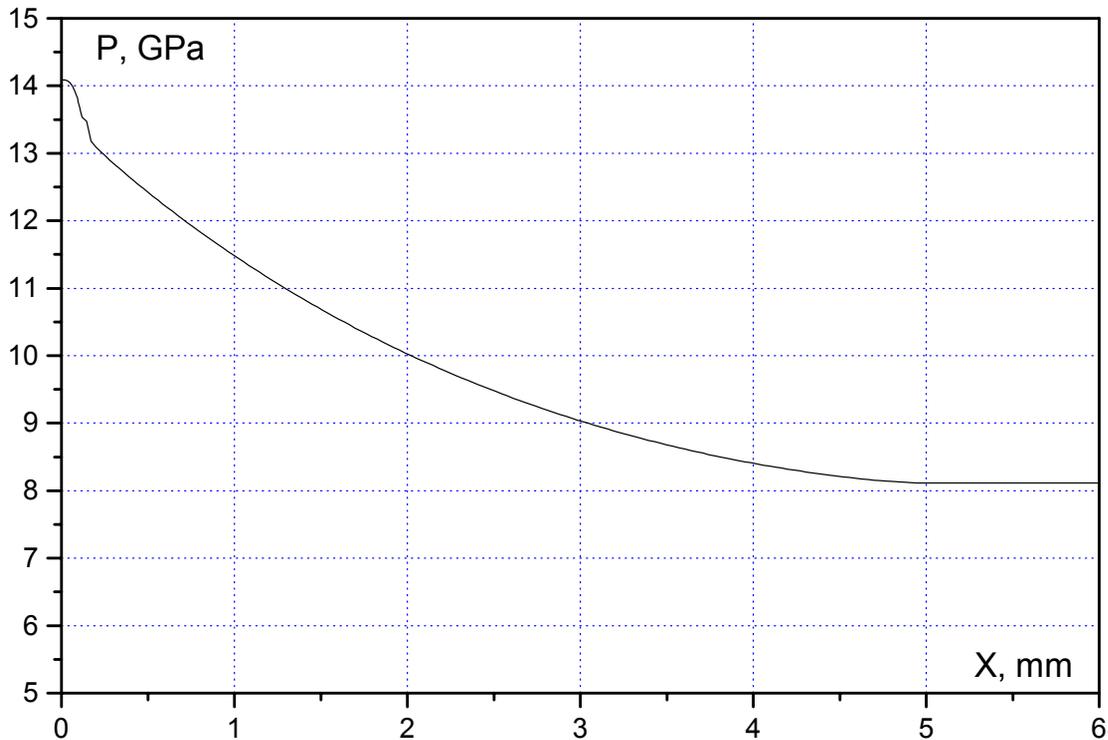
$U(\sigma)$  – безразмерная "скорость" фронта горения;

Множитель  $\exp(E_a / 3E_t^*)$  связан с числом горячих точек, которые активируются иницирующей ударной волной.

Первая стадия модели описывает разгорание очагов реакции, вторая – поверхностное горение ВВ после объединения очагов.

### Параметры модели кинетики.

$W_{\phi}$ , мкс <sup>-1</sup>	$E_{\phi}$ , кДж/г	$a$	$b$	$m$	$\theta$	$\alpha$	$\beta$	$\lambda$	$\mu$
11.37	0.15	0.108	1.1	4.6	0.25	0.125	0.875	35	0.8



Расчетный профиль давления при стационарной детонации ПЖВ-20У.

❖ Расчетная ширина зоны реакции ПЖВ-20У составляет ~5 мм.

## Расчет открытых цилиндрических зарядов



➤ ПЖВ-20У с  $\rho_0=1.2$  г/см<sup>3</sup>

➤  $d$  – диаметр зарядов, длина зарядов равна  $10d$ .

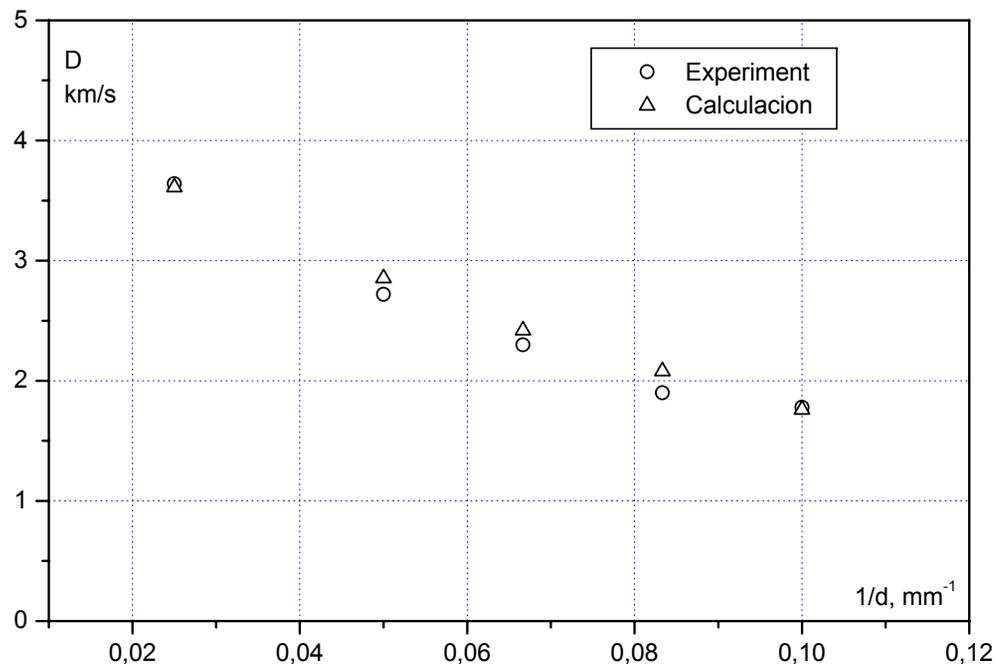
➤ Инициатор диаметра  $d$  из мощного ВВ толщиной 20 мм.

➤ Иницирование - в круге диаметром 6 мм.

➤ Наружные поверхности расчетной системы – свободные границы.

$d=10$ мм	$L$ , мм	17÷41	41÷66	66÷95
	$D_{эксн}$ , км/с	2.09	1.76	1.78
	$D_{расч}$ , км/с	2.08	1.85	1.76
$d=12$ мм	$L$ , мм	17÷48	48÷81	81÷113
	$D_{эксн}$ , км/с	2.35	1.95	1.90
	$D_{расч}$ , км/с	2.31	2.10	2.08
$d=15$ мм	$L$ , мм	16÷56	56÷98	98÷145
	$D_{эксн}$ , км/с	2.85	2.27	2.30
	$D_{расч}$ , км/с	2.63	2.44	2.42
$d=20$ мм	$L$ , мм	18÷73	73÷134	134÷194
	$D_{эксн}$ , км/с	3.12	2.74	2.72
	$D_{расч}$ , км/с	3.13	2.85	2.85
$d=40$ мм	$L$ , мм	22÷145	145÷269	269÷390
	$D_{эксн}$ , км/с	3.81	3.68	3.64
	$D_{расч}$ , км/с	3.88	3.61	3.61

**Скорости детонации в открытых зарядах ПЖВ-20У.**

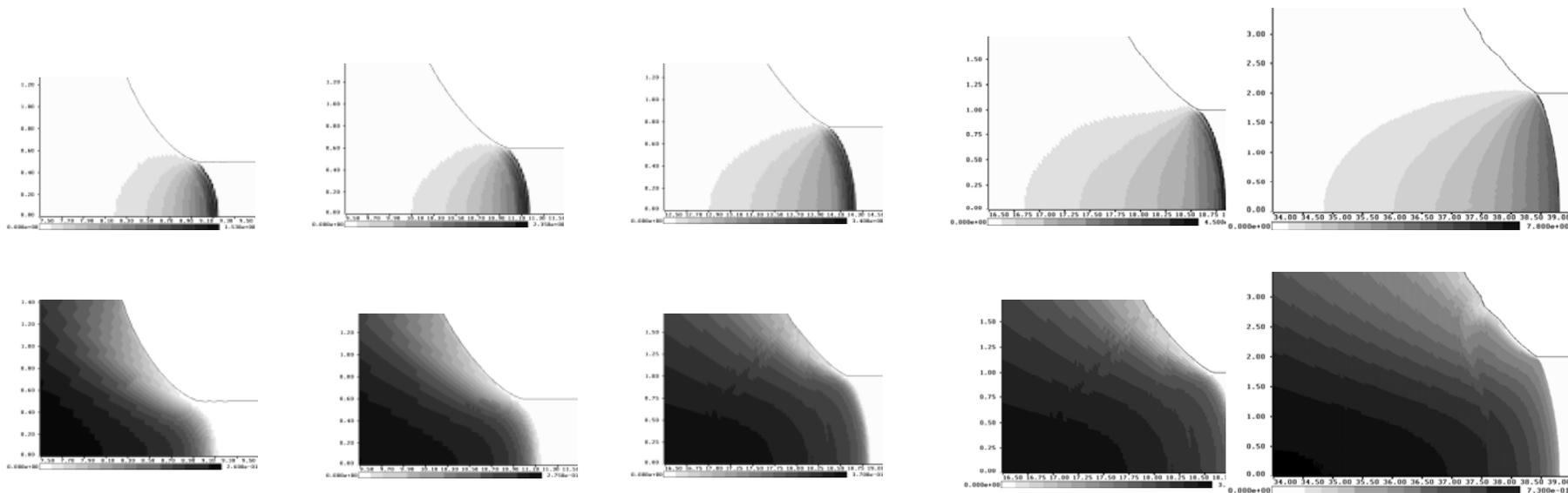


### Зависимость скорости детонации от диаметра заряда ПЖВ-20У.

➤ Наибольшее отличие расчета и эксперимента составляет 9.5%. Оно наблюдается для заряда диаметром 12 мм.

➤ Для обеих зависимостей экстраполяция на  $d = \infty$  дает значение  $D_{\infty} = (4.0 \div 4.5)$  км/с.

## Расчетное распределение давления и концентрации ВВ для установившегося процесса в зарядах ПЖВ-20У



**$d=10$  мм**

**$t=46.0$  мкс**

**$d=12$  мм**

**$t=50.0$  мкс**

**$d=15$  мм**

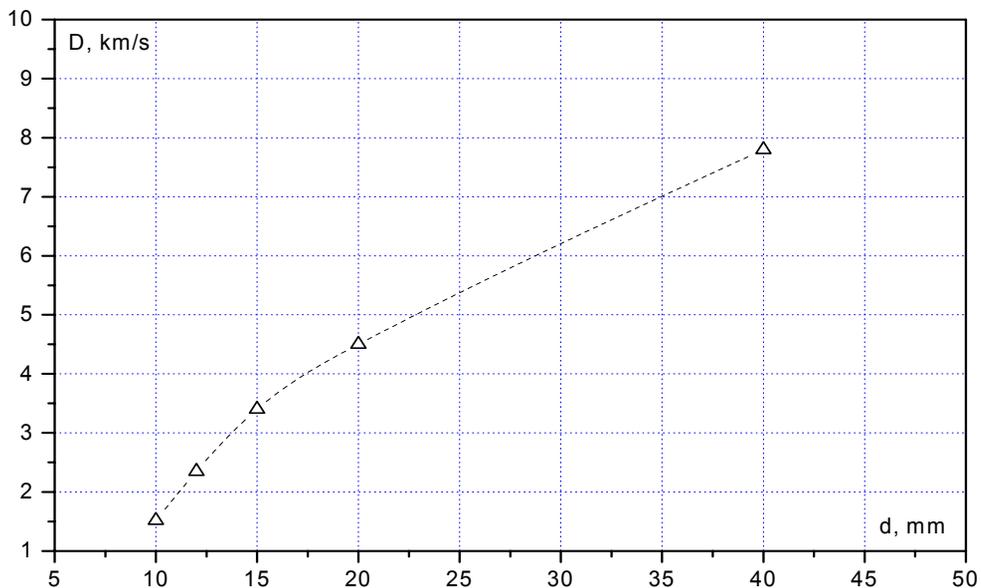
**$t=56.0$  мкс**

**$d=20$  мм**

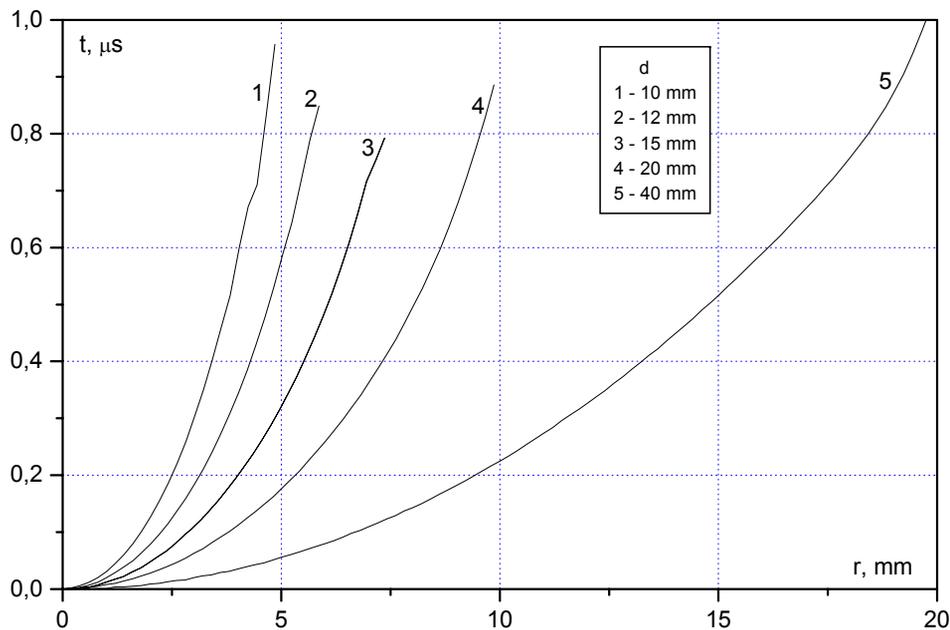
**$t=64.0$  мкс**

**$d=40$  мм**

**$t=106.0$  мкс**



**Расчетное давление на фронте волны в ПЖВ-20У.**

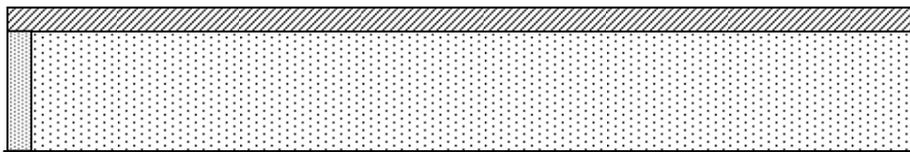


**Выход детонационной волны в зарядах ПЖВ-20У.**

<i>d</i> , мм	<i>P<sub>f</sub></i> ГПа	1- $\xi$ , %
<b>10</b>	<b>1.52</b>	<b>26.0</b>
<b>12</b>	<b>2.35</b>	<b>27.5</b>
<b>15</b>	<b>3.40</b>	<b>30.0</b>
<b>20</b>	<b>4.50</b>	<b>37.0</b>
<b>40</b>	<b>7.80</b>	<b>73.0</b>

**Давление на фронте волны и выгорание в открытых зарядах ПЖВ-20У.**

## Заряды в оболочке



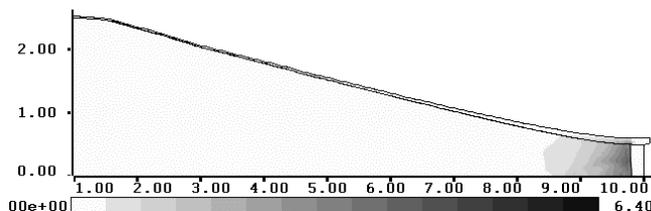
Геометрия расчета заряда ПЖВ-20У в оболочке.

▪ Три расчета с  $d=10, 20$  и  $40$  мм при  $\rho_0=1.2$  г/см<sup>3</sup>.

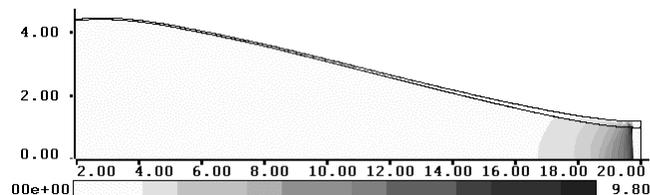
▪ Толщина стенки трубки составляет  $0.1d$ .

▪ Инициирование - в круге диаметром  $3$  мм.

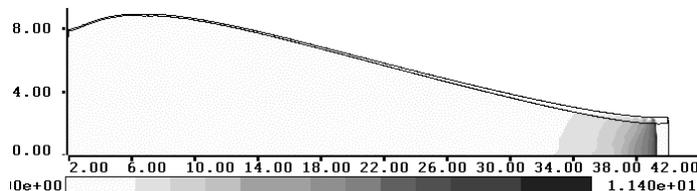
$d=10$  мм  
 $t=30$  мкс



$d=20$  мм  
 $t=50$  мкс



$d=40$  мм  
 $t=92$  мкс



➤ Отставание фронта на боковой границе относительно центральной точки составляет  $\sim 0.015d$ .

➤ Расчетное выгорание ВВ составляет  $50\%$ ,  $68\%$  и  $84\%$  в системах с  $d=10, 20$  и  $40$  мм соответственно.

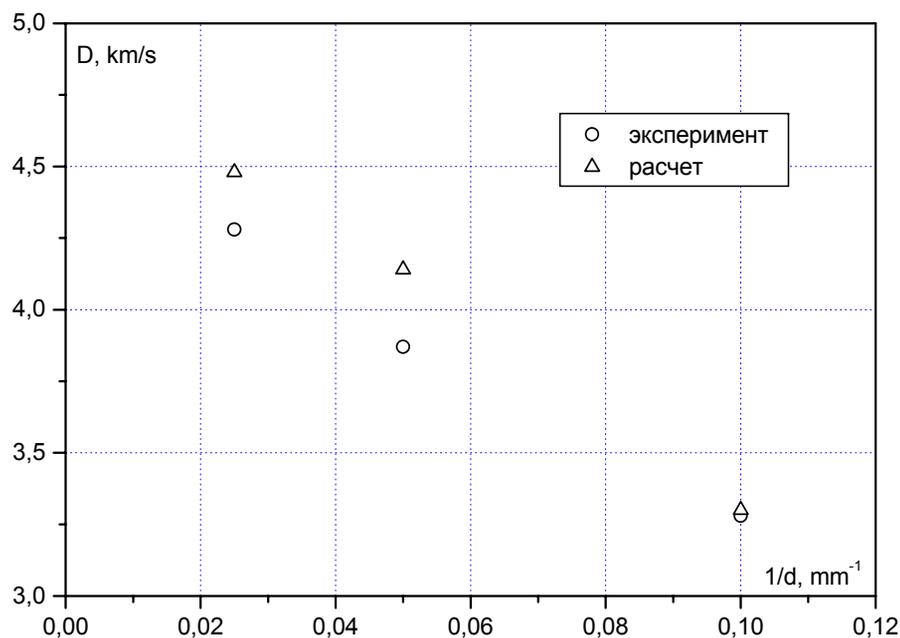
Расчетное давление в зарядах ПЖВ-20У с оболочкой.

$d$ мм	$D$ , км/с		$R_f$ , мм		$P_f$ , ГПа	
	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент
10	3.30	3.28	49	36	6.4	–
20	4.14	3.87	167	122	9.8	6.7*
40	4.48	4.28	357	250	11.4	7.5*

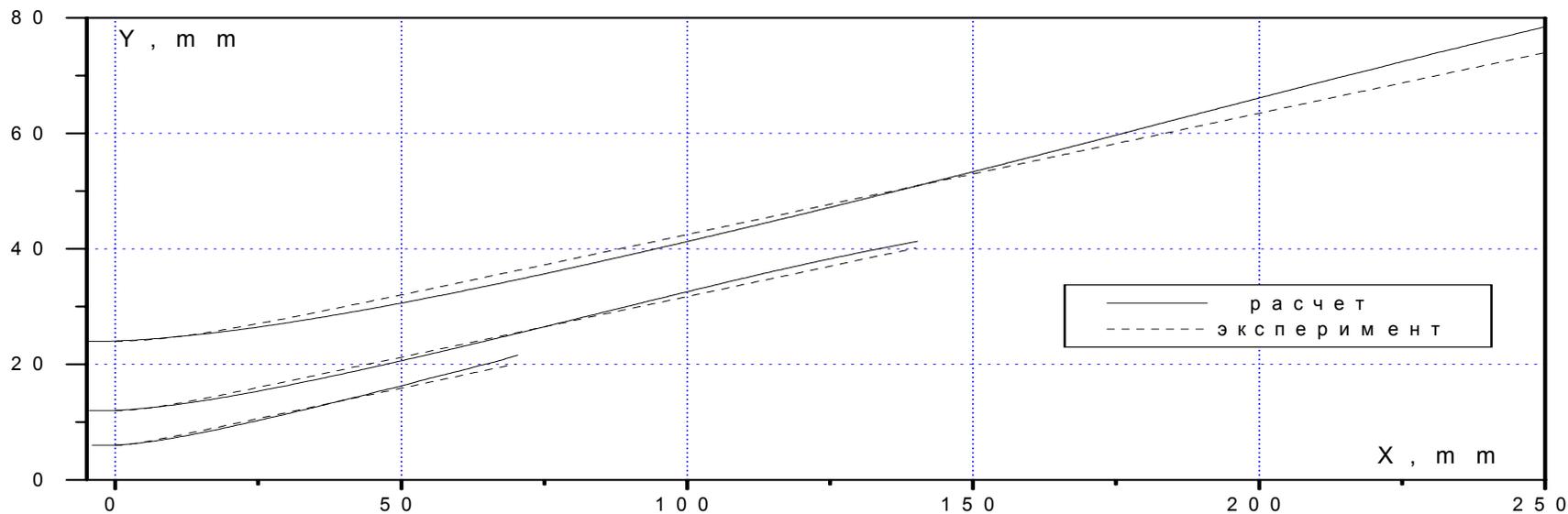
**Параметры детонации в зарядах ПЖВ-20У в оболочке**

$R_f$   $P_f$  – радиус кривизны и давление на фронте детонации.

\* – эффективное давление Чепмена-Жуге.

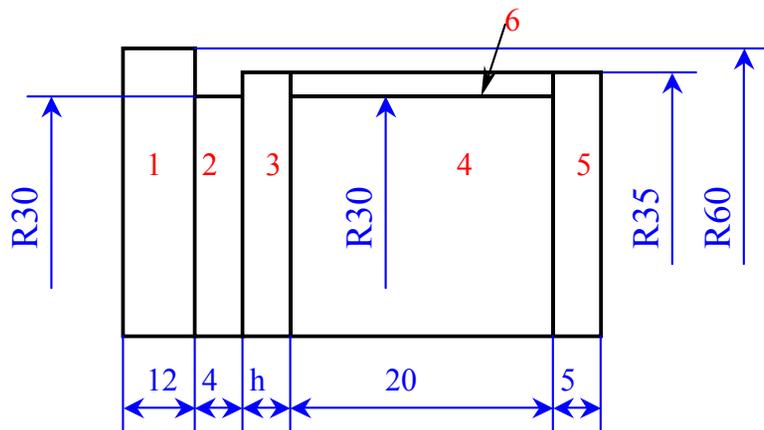


**Скорость детонации для зарядов в оболочке**



**Наружная поверхность медной оболочки для зарядов ПЖВ-20У  $d=10, 20$  и  $40$  мм**

## Система типа gap-test

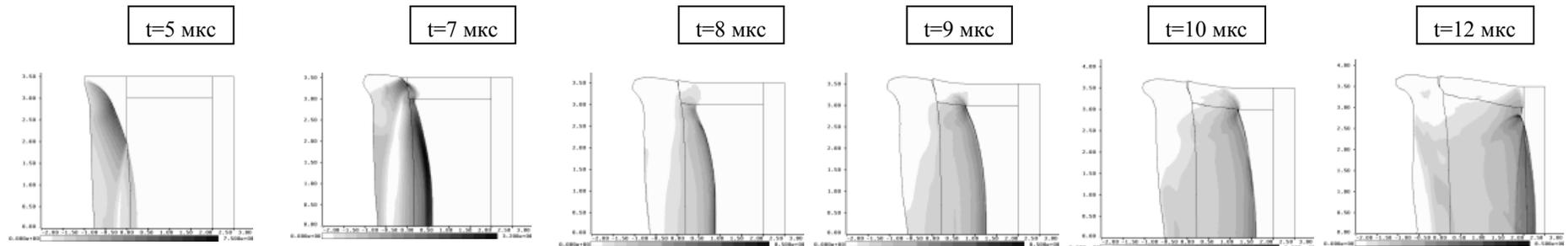


- 1 – крышка
- 2 – активное ВВ
- 3 – диск из фторопласта
- 4 – заряд ПЖВ-20У
- 5 – диск из фторопласта
- 6 – корпус из пенопласта

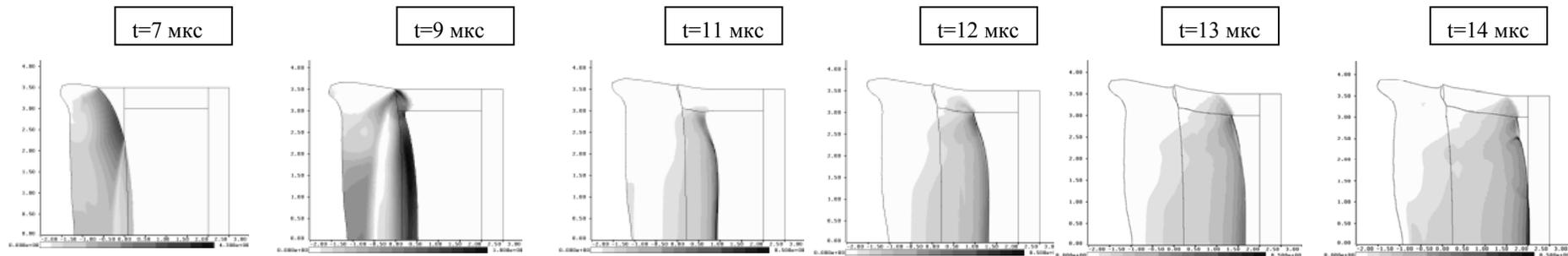
Геометрия расчетов системы типа gap-test

- Иницирование в активном ВВ в круге диаметром 3 мм.
- Заряд ПЖВ-20У с плотностью  $\rho_0=1.2$  г/см<sup>3</sup>.
- Задавались три значения толщины  $h$  инертной преграды, расположенной между активным ВВ и образцом ПЖВ-20У:  $h=10, 15$  и  $20$  мм.

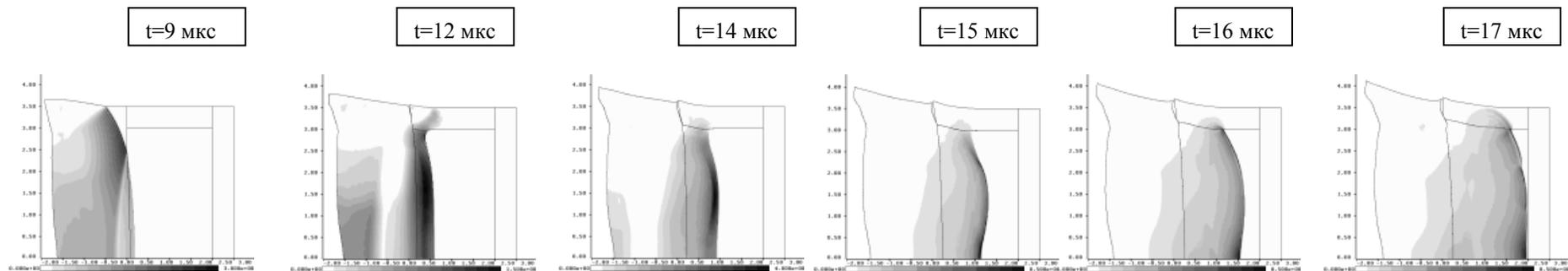
# Эволюция расчетных профилей давления в системе gap-test



$h=10$  mm

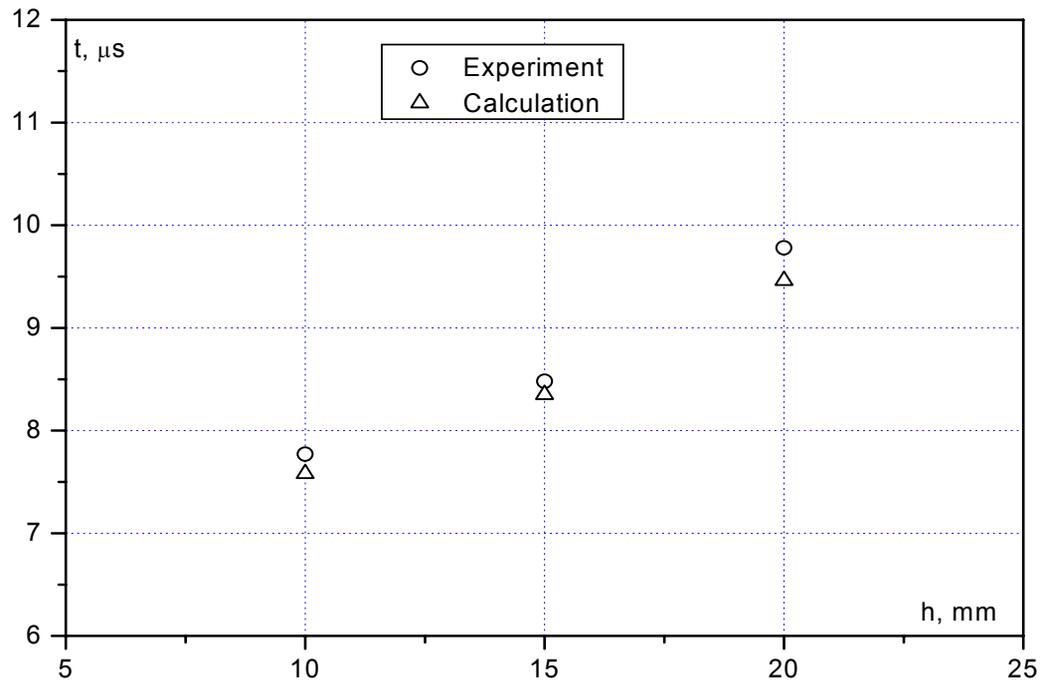


$h=15$  mm



$h=20$  mm

$h$ , мм	$\tau$ , мкс	
	Расчет	Эксперимент
10	7.58	7.77
15	8.35	8.48
20	9.46	9.78



**Время прохождения волны по ПЖВ-20У в расчетах и экспериментах типа gap-test.**

## **ВЫВОДЫ**

- **Получено хорошее согласие расчетных результатов с экспериментальными данными по скорости детонационной волны в цилиндрических зарядах ПЖВ-20У различных типов, а также по инициированию ПЖВ-20У расходящимися ударными волнами разной интенсивности.**
- **С достаточной точностью воспроизводится конфигурация наружной поверхности цилиндрических оболочек на конечной стадии распространения детонации. Это свидетельствует о достаточной верности используемого уравнения состояния продуктов детонации.**
- **В расчетах получена форма фронта детонационной волны и ударно-волновые параметры для зарядов ПЖВ-20У, используемых в экспериментах различных типов. Расчетный профиль давления стационарной детонационной волны в ПЖВ-20У согласуется с экспериментальным.**
- **При соответствующей калибровке по экспериментальным данным модель разложения ВВ может быть применена для описания других взрывчатых составов.**