



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Экспериментальные газодинамические исследования взаимодействия расходящихся детонационных волн

А.Г. Глущенко, А.Н. Аверин, А.Б. Сырцов, Я.М. Горопашный, А.С. Лобачев, М.С. Суров,
Н.Я. Шишкин, Д.А. Грибанов, С.М. Долгих, А.Ю. Гармашев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»

19 – 23 мая 2025 г.

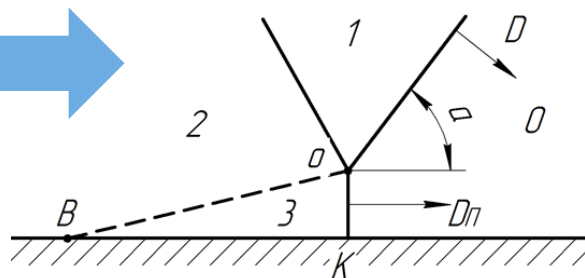
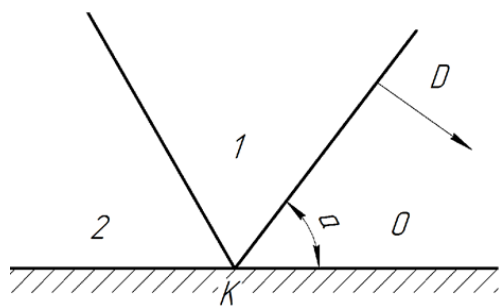
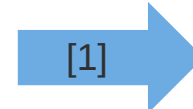
XVII Международная конференция «ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ»

Введение

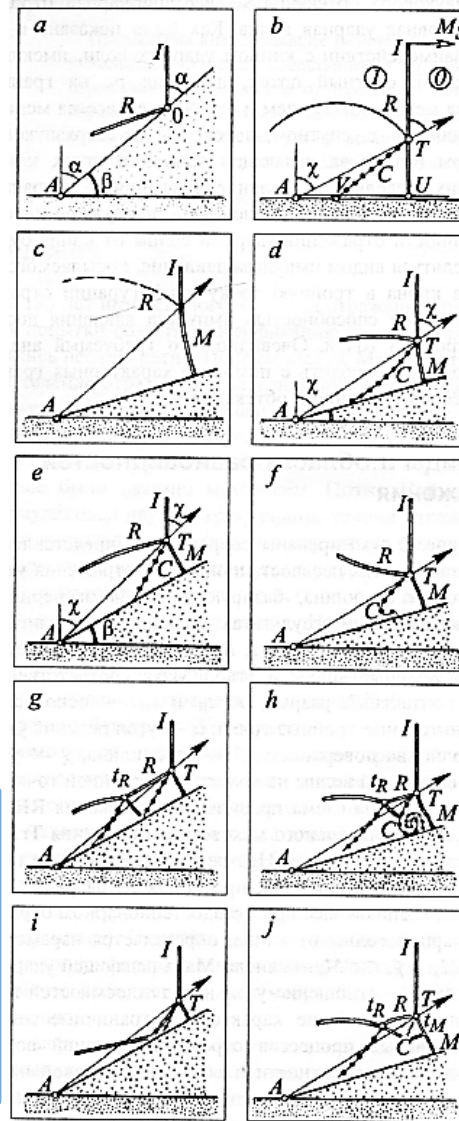


РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

В последнее десятилетие особое внимание уделяется вопросам адекватного численного моделирования физических процессов. В частности, в задачах газовой динамики при моделировании детонации ВВ зачастую используются уравнения состояния ПВ совместно с рядом эмпирических подгоночных параметров, подбираемых по специально поставленным газодинамическим экспериментам, что значительно уменьшает область применения таких моделей. Разработка моделей, корректно учитывающих кинетику детонационного превращения ВВ, позволяет использовать их для широкого круга прикладных задач. Для калибровки таких моделей полезно иметь экспериментальные данные по параметрам детонационного превращения ВВ в нестационарных режимах, т.е. в режимах, в которых временные производные плотности, давления и скорости отличны от нуля. Таким режимам детонации соответствуют недосжатые и пересжатые ДВ.



Конфигурация волн при косом соударении ни из какого математического расчета не следует, а должна быть угадана интуитивно или определена в опыте [2].



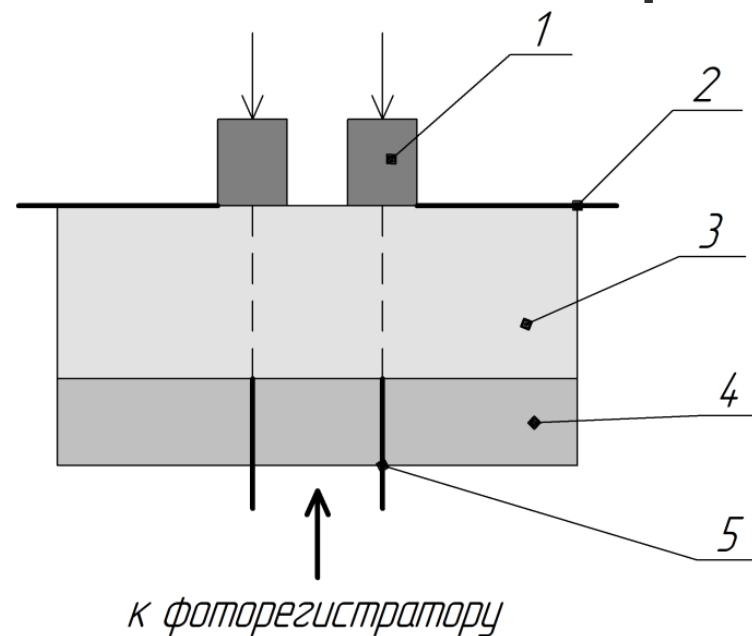
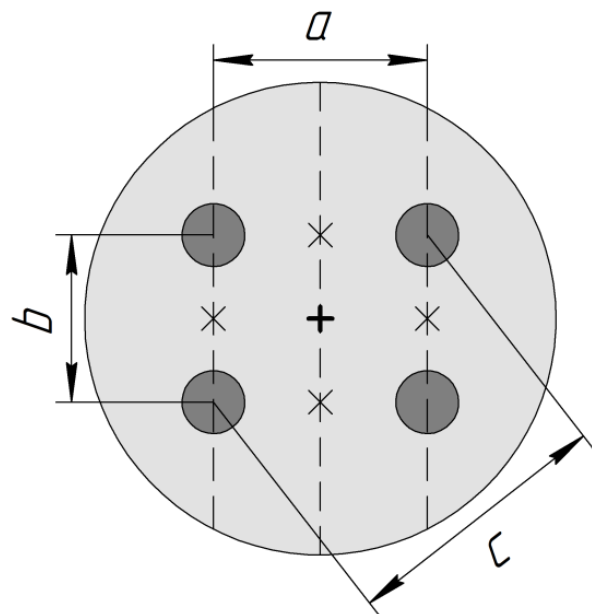
1 – Семенов А. Н. и др. // Классификация разновидностей отражения ударной волны от клина / ЖТФ 2009г. т. 79, №4. С. 46-51.

2 – Забабахин Е.И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва. – Снежинск: РФЯЦ ВНИИТФ, 1997.

Объекты исследований и постановка экспериментов



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



- 1 – инициатор из пластичного ВВ Ø8×10 мм,
2 – волоконно-оптический датчик;
3 – диск из ВВ на основе октогена Ø60 мм;
4 – диск из оргстекла;
5 – волоконно-оптический датчик.

× зона двойных столкновений ДВ

+ зона четверных столкновений ДВ

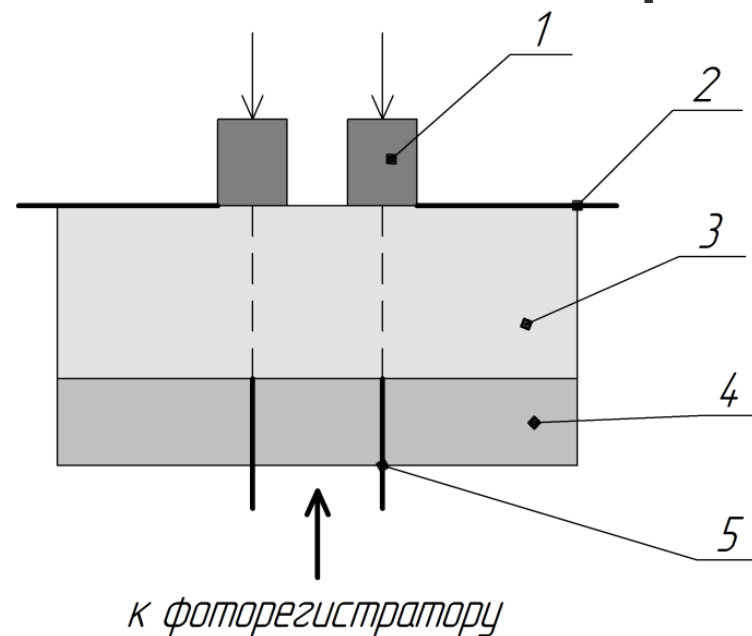
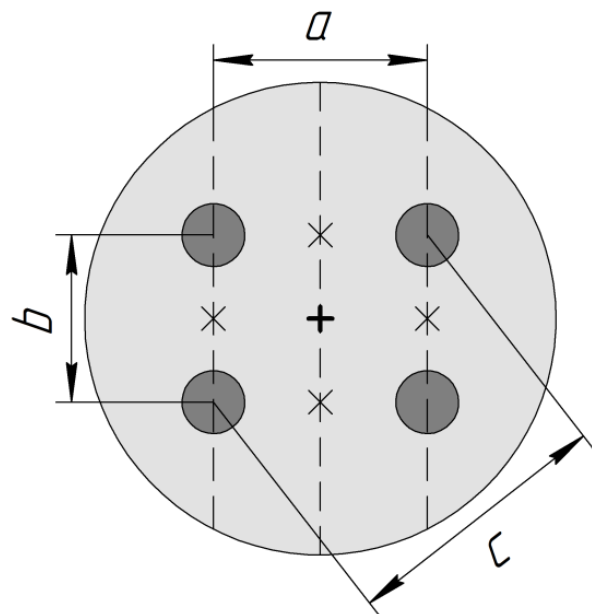
– – линия регистрации симметрии выхода ДВ

ВВ	ВВ на основе гексогена	ВВ на основе октогена
ρ_0 , г/см ³	1,62	1,87
$D_{дет.}$, км/с	8,4	8,6
УРС «холодного ВВ»	$D = 2,66 + 2,36U$	$D = 2,52 + 2,21U - 0,24U^2$
a, мм	27,20	-
b, мм	21,20	-
c, мм	34,49	-

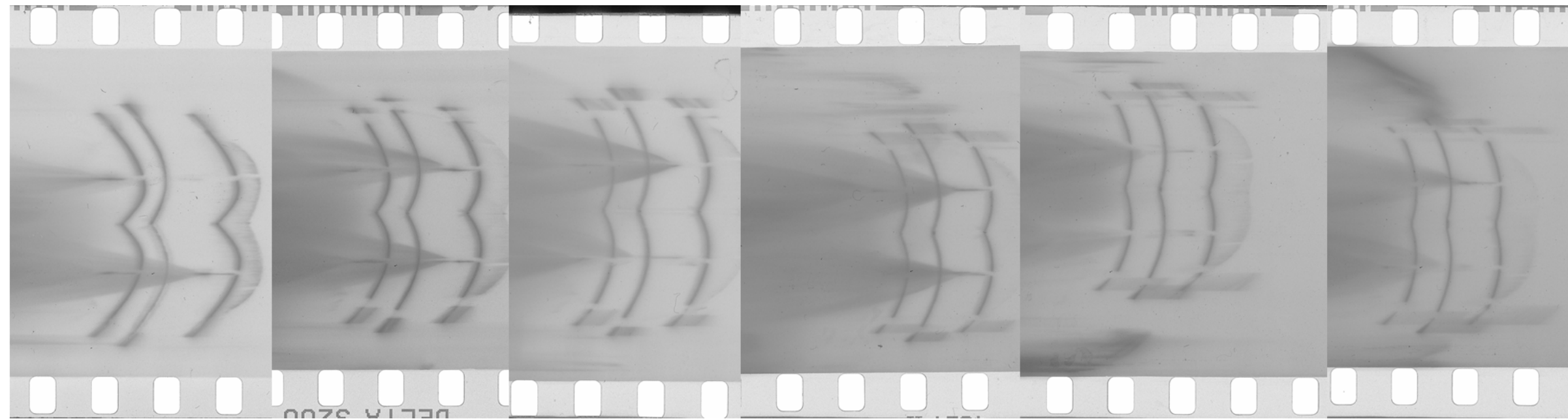
Объекты исследований и постановка экспериментов



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



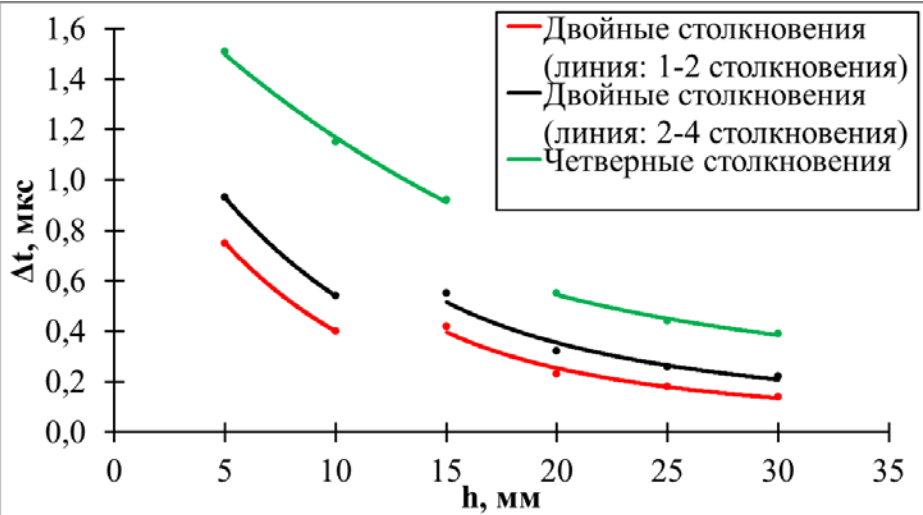
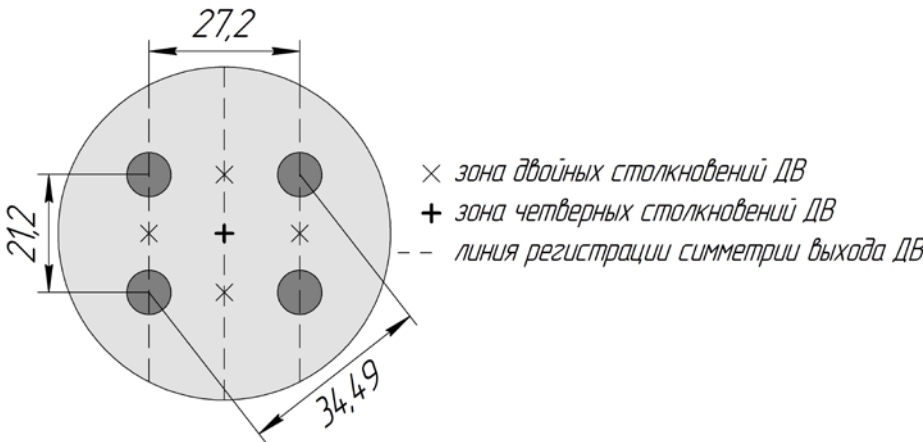
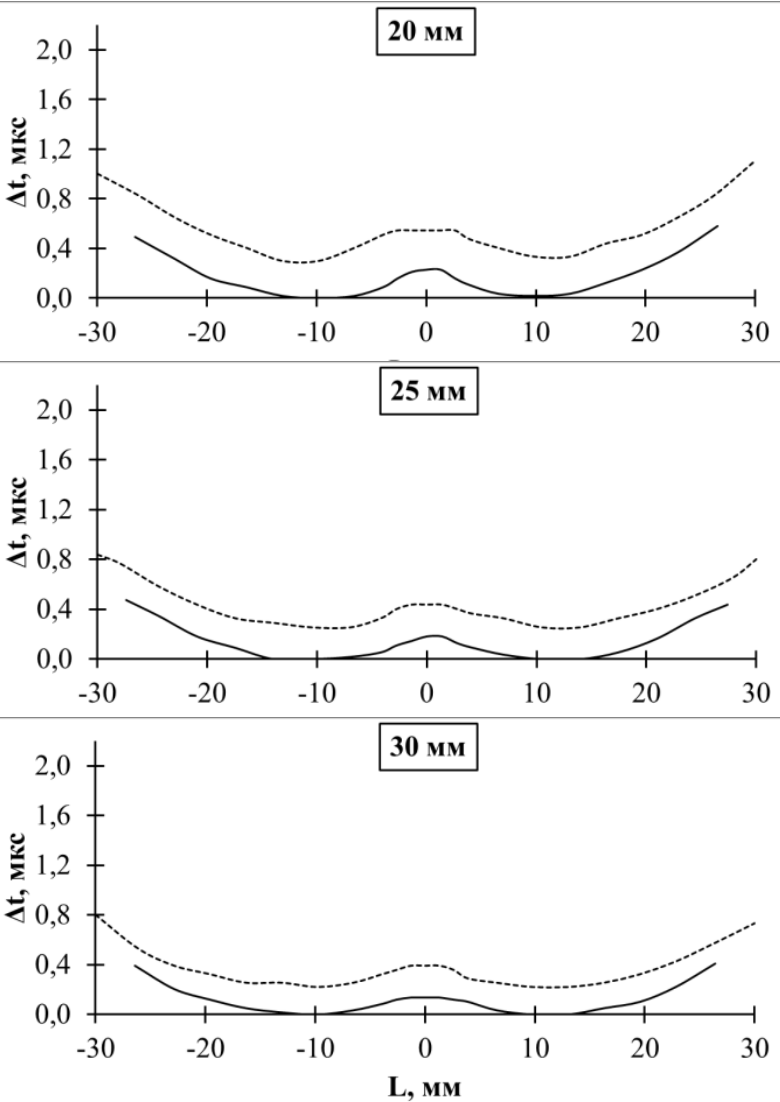
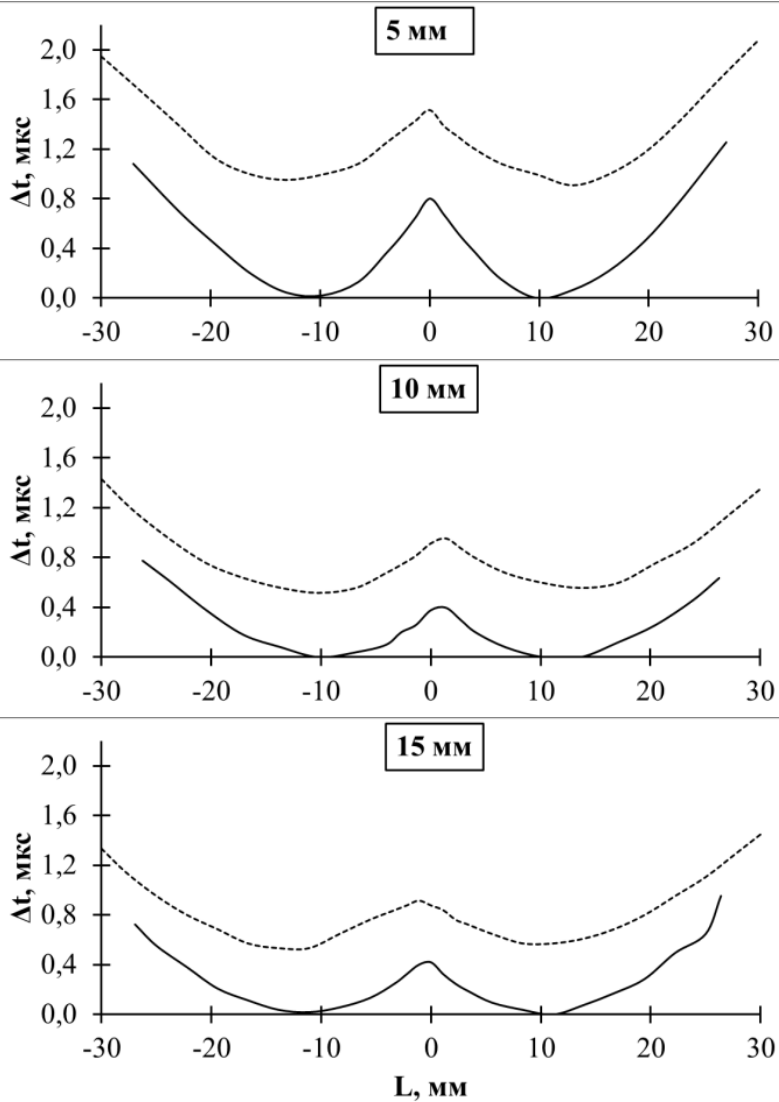
- 1 – инициатор из пластичного ВВ Ø8×10 мм,
- 2 – волоконно-оптический датчик;
- 3 – диск из ВВ на основе октогена Ø60 мм;
- 4 – диск из оргстекла;
- 5 – волоконно-оптический датчик.



Эволюция детонационного фронта при большом шаге инициаторов



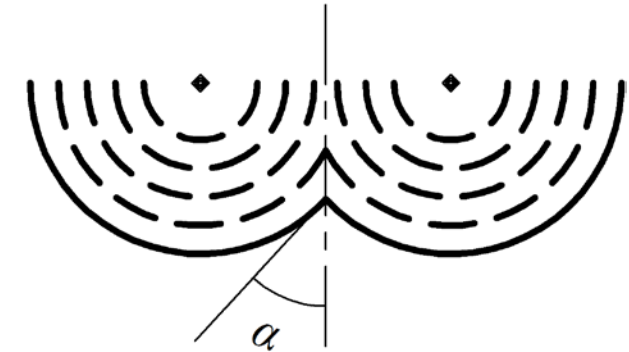
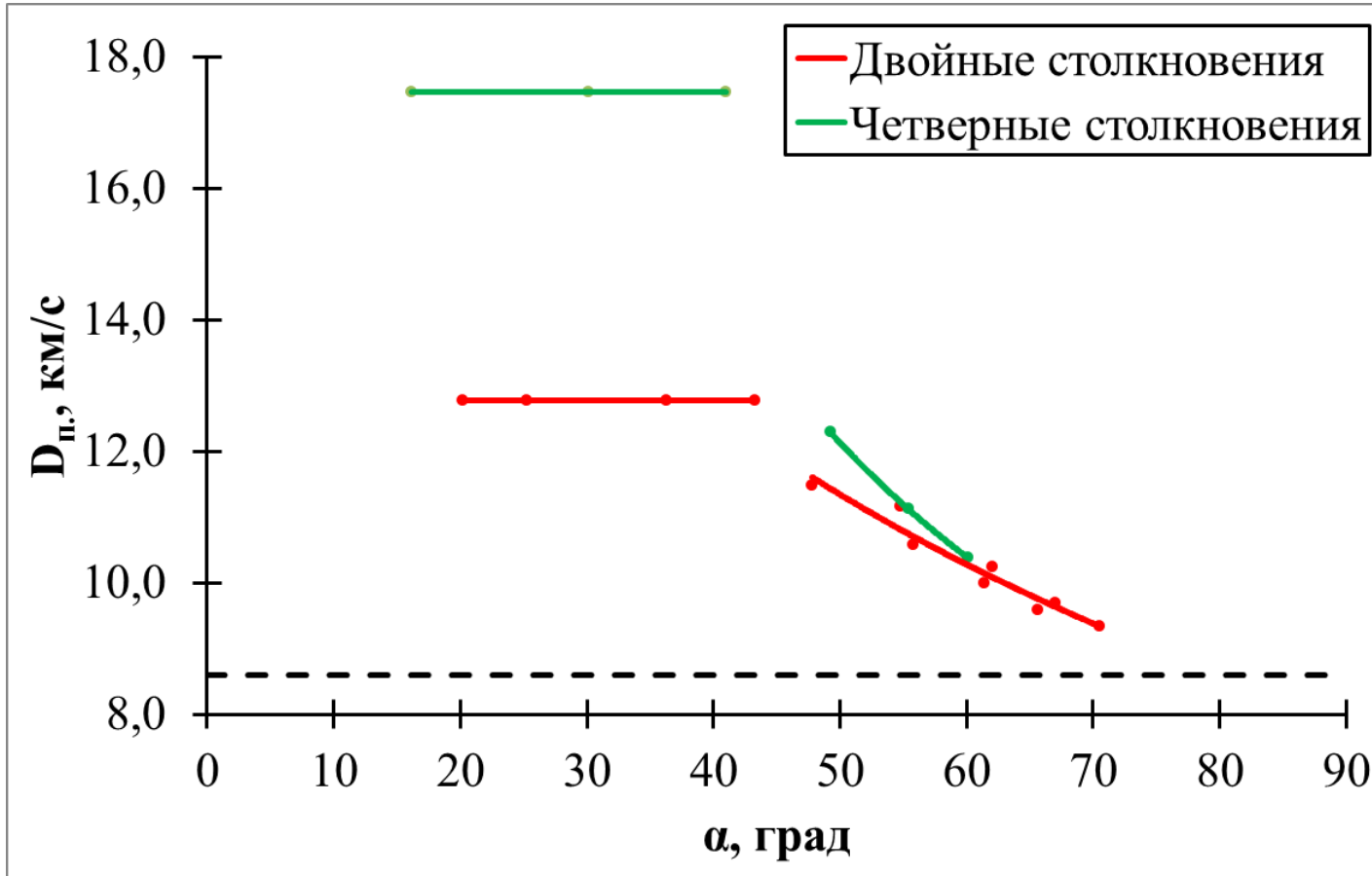
РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



Оценка скорости пересжатой детонации в зоне взаимодействия



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



Смена режимов взаимодействия ДВ происходит в диапазоне углов $\alpha = 43...48$ градусов. В этом случае происходит переход регулярного режима взаимодействия к нерегулярному.

При этом следует отметить несущественность влияния количества сталкивающихся волн на величину давления в зоне столкновений в нерегулярном (маховском) режиме взаимодействия.

В работе [3] показано, что в конденсированных ВВ переход регулярного режима взаимодействия ДВ к нерегулярному, сопровождающийся образованием волны Маха, происходит при углах $\alpha \geq 49^\circ$.

Сравнение с теоретическими оценками

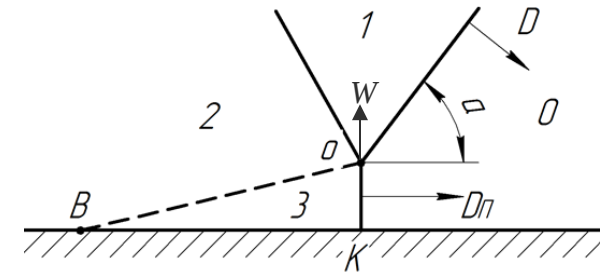
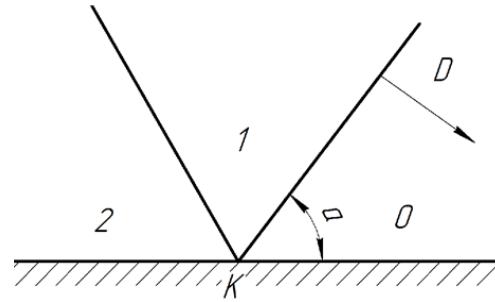


РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

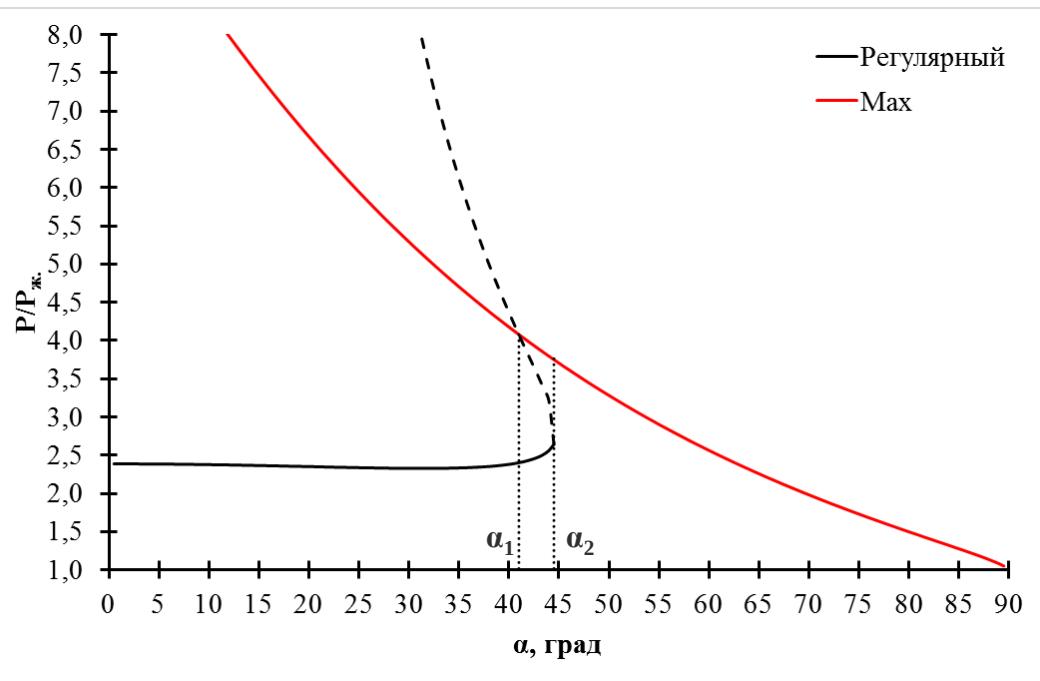
Уравнение состояния ПВ:

$$P = A\rho^n,$$

$$n = 3$$



[4]



$\alpha_1=41^\circ$, угол, при котором вертикальная скорость тройной точки переходит в область положительных значений.

$\alpha_2=44,5^\circ$, максимальный угол, при котором существует решение для регулярного режима. При этом угле число Маха в потоке за отраженной УВ становится равным единице.

Сравнение с теоретическими оценками



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Уравнение состояния ПВ:

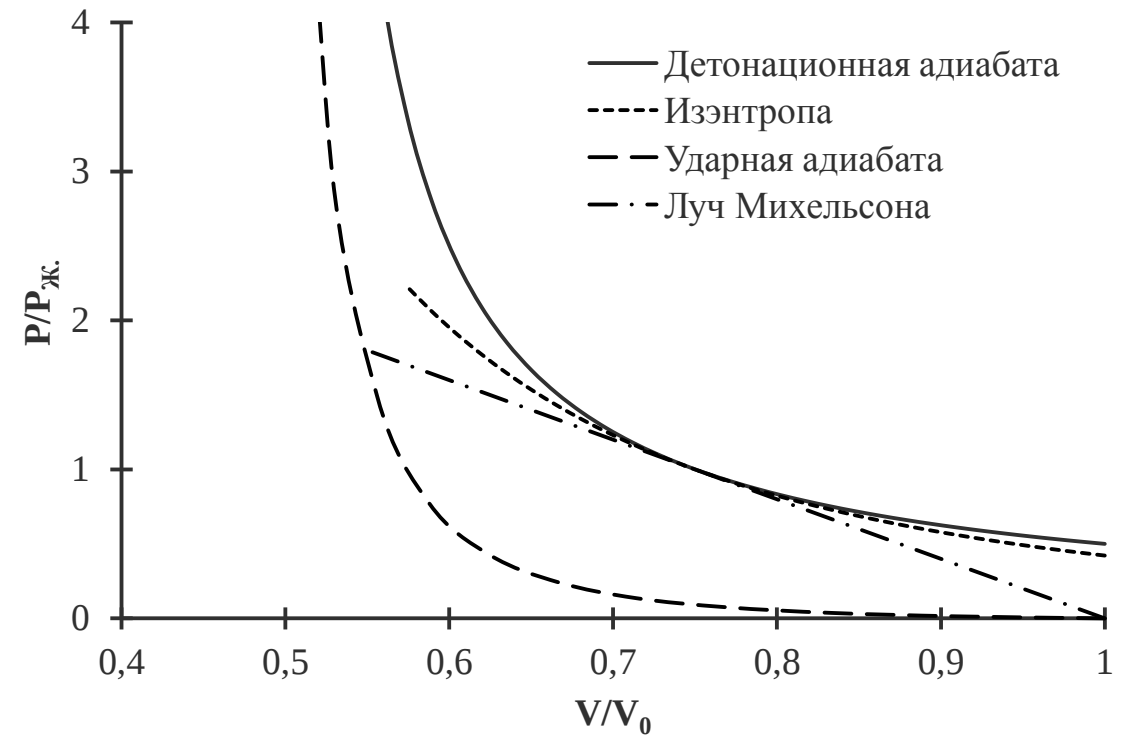
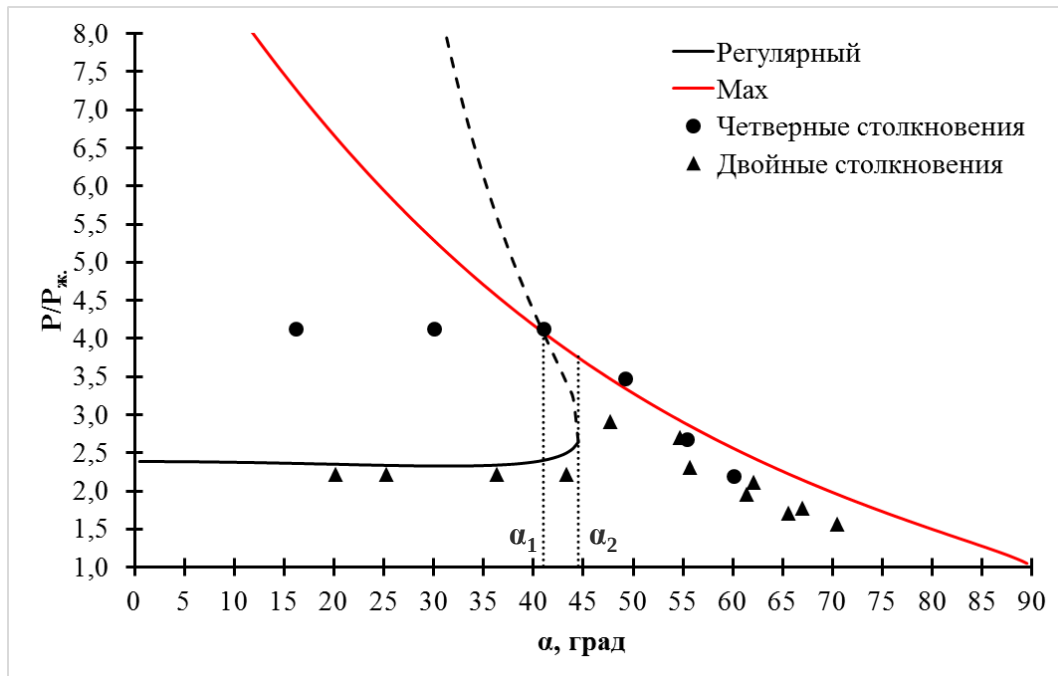
$$P = A\rho^n,$$

$$n = 3$$

$$P = \frac{2q}{\frac{n+1}{n-1}V - V_0},$$

$$q = \frac{D^2}{2(n^2 - 1)}.$$

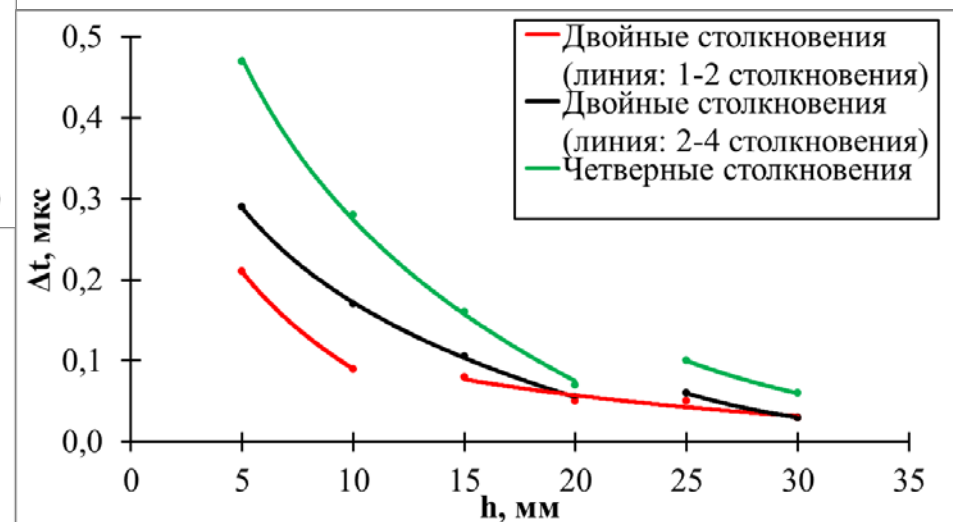
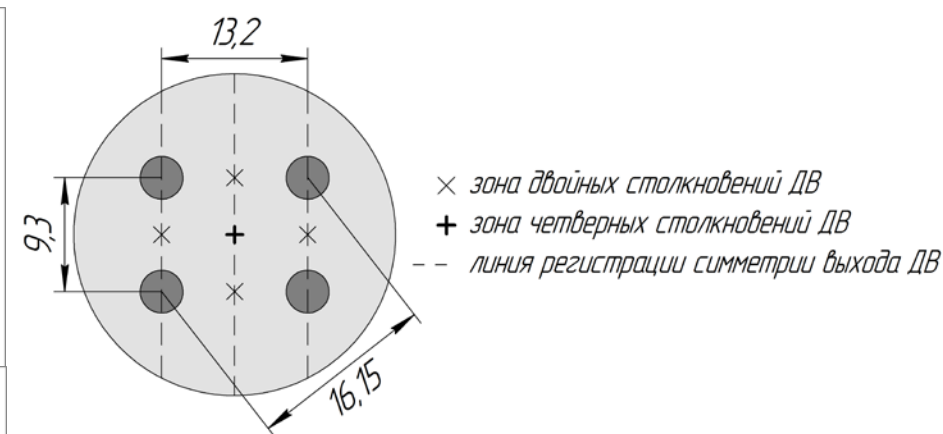
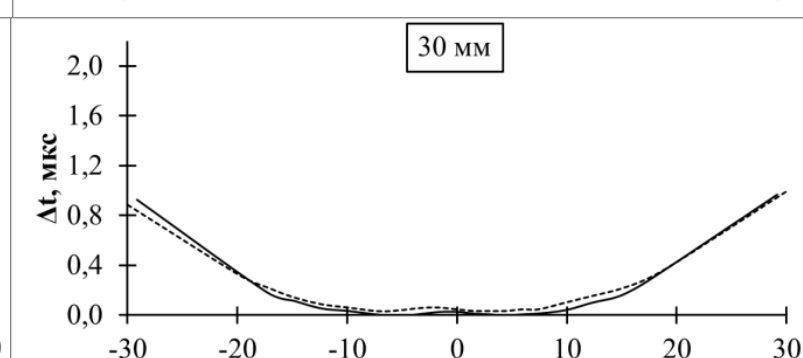
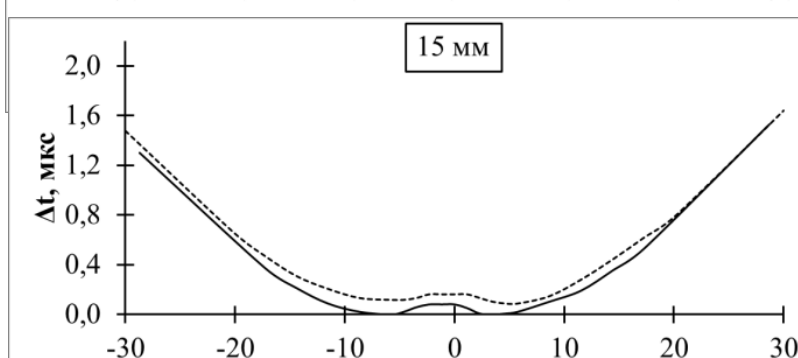
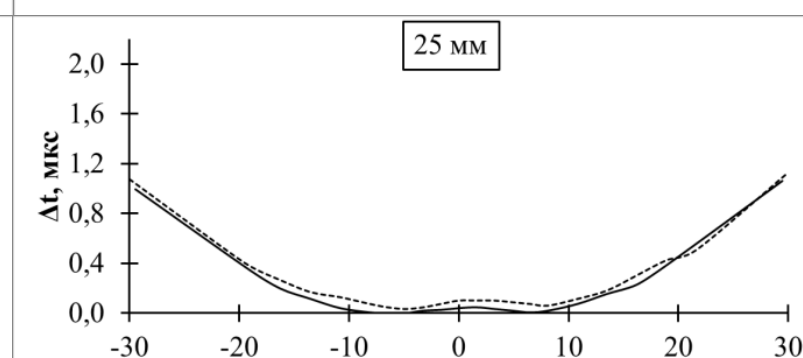
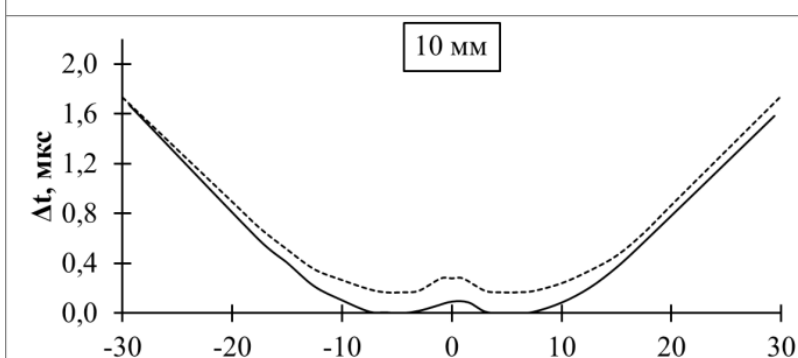
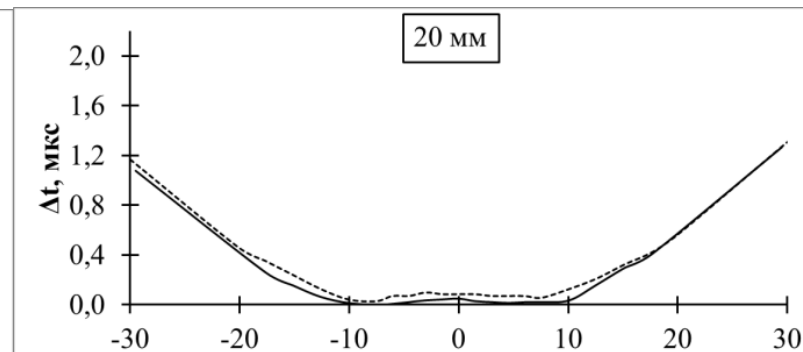
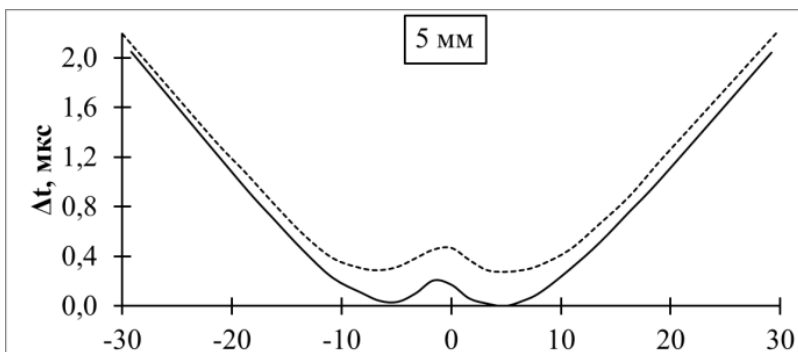
$$D_{\Pi} = V_0 \sqrt{-\frac{\Delta P}{\Delta V}}. \quad [2]$$



Эволюция детонационного фронта при малом шаге инициаторов



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



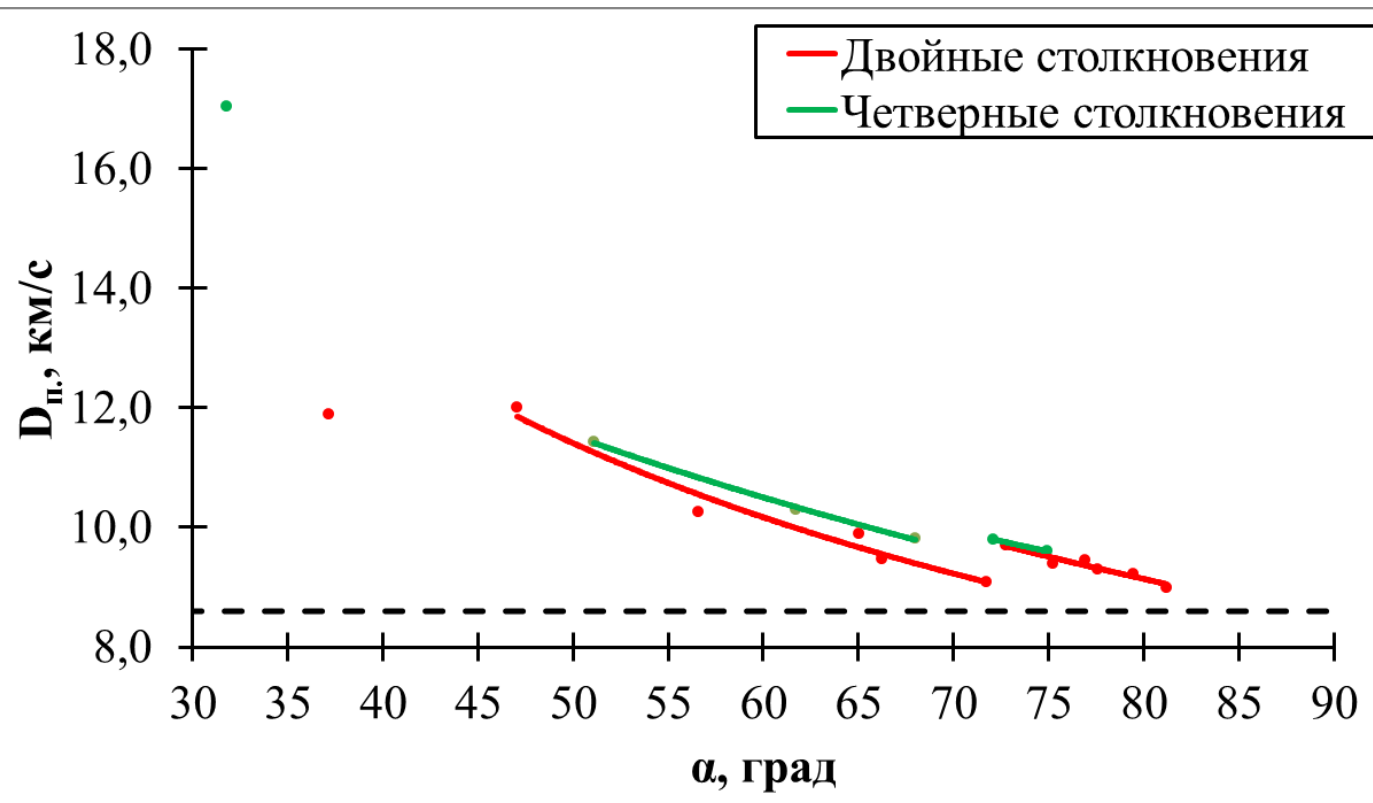
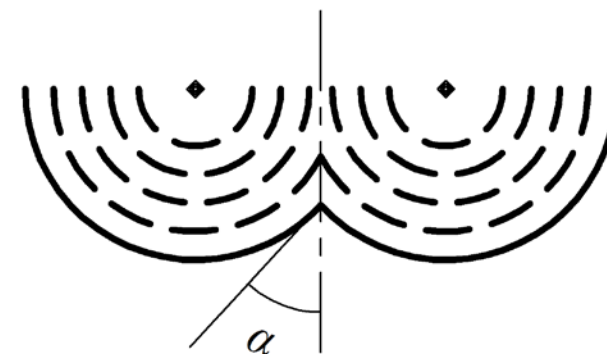
— 1-2_столкновения ---- 2-4_столкновения

— 1-2_столкновения ---- 2-4_столкновения

Оценка скорости пересжатой детонации в зоне взаимодействия



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



Смена режимов взаимодействия ДВ происходит:

- в диапазоне углов $\alpha > 40$ градусов (переход регулярного режима взаимодействия к нерегулярному).
- в диапазоне углов $\alpha = 71...72$ градуса (изменение типа маховского отражения).

Сравнение с теоретическими оценками



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Уравнение состояния ПВ:

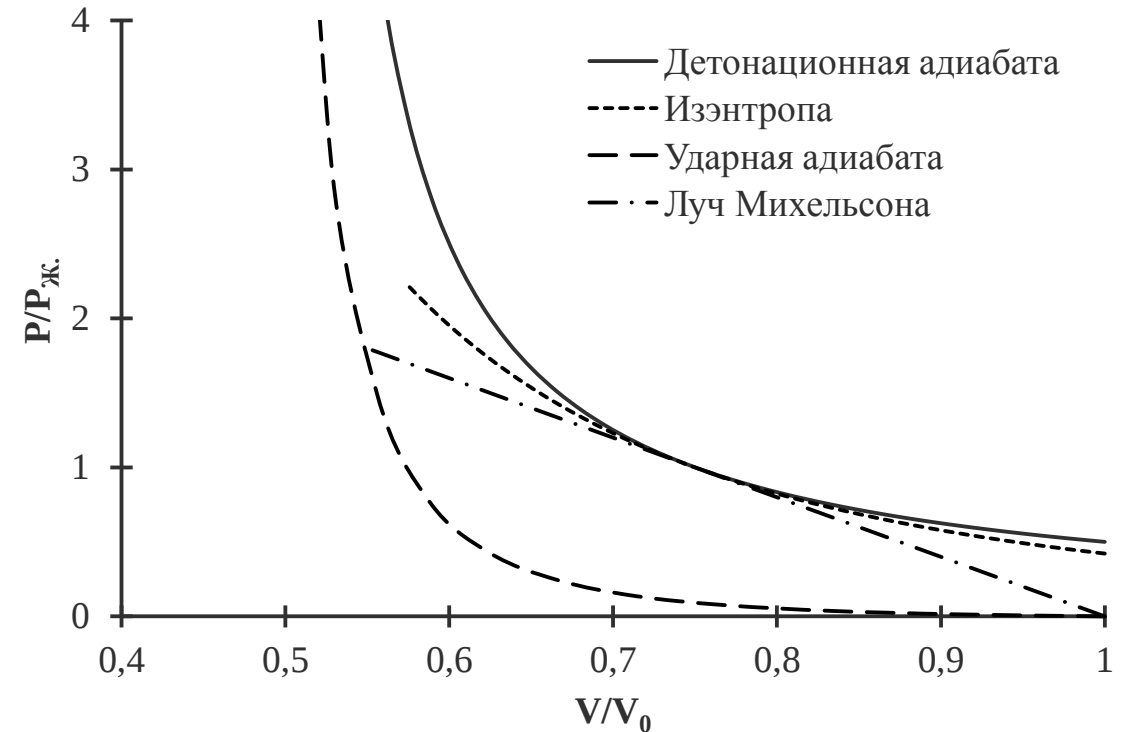
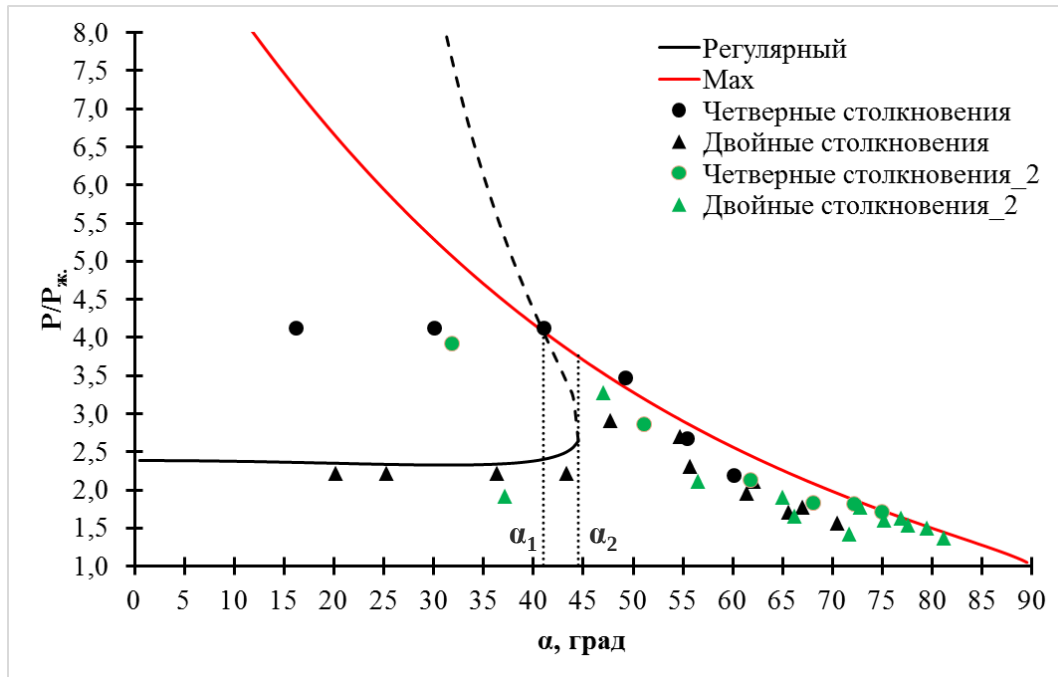
$$P = A\rho^n,$$

$$n = 3$$

$$P = \frac{2q}{\frac{n+1}{n-1}V - V_0},$$

$$q = \frac{D^2}{2(n^2 - 1)}.$$

$$D_{\Pi} = V_0 \sqrt{-\frac{\Delta P}{\Delta V}}. \quad [2]$$



Сравнение с теоретическими оценками

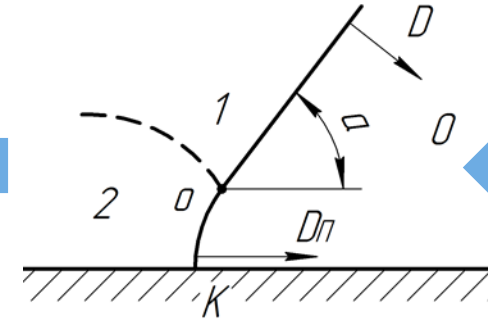
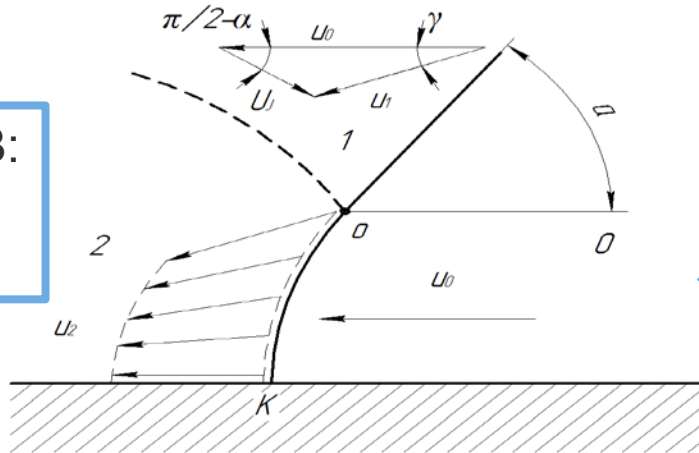


РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

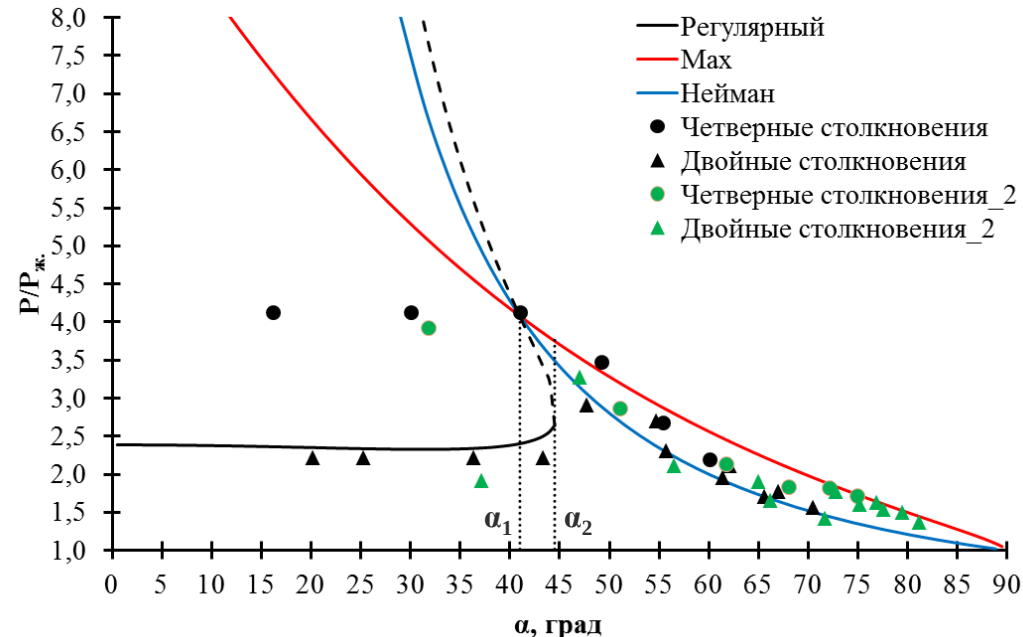
Уравнение состояния ПВ:

$$P = A\rho^n,$$

$$n = 3$$

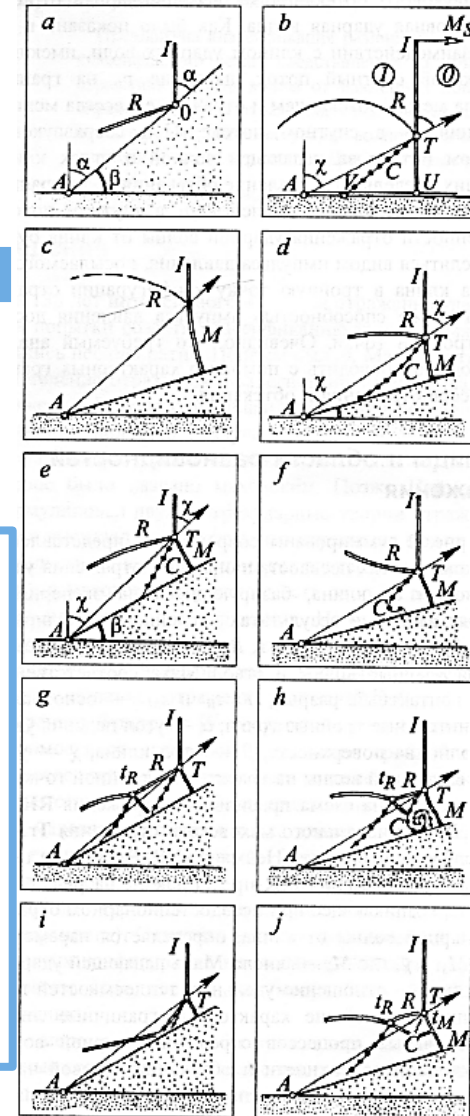


[1]



- Отраженная волна является волной сжатия [1].
- Стебель Маха плавно искривлен и подходит к стенке под прямым углом [1].
- Параметры давления, величины и направления массовой скорости плавно изменяются вдоль стебля Маха.
- Скорость пересечной ДВ D_{Π} на оси можно оценить [4]:

$$D_{\Pi} = \frac{D}{\sin \alpha}$$



- ✓ В работе представлены постановка и реализация газодинамических экспериментов, в каждом из которых одновременно реализуются стационарный и нестационарный режимы детонационного превращения.
- ✓ Получены картины эволюции формы детонационного фронта, формирующегося от четырех точечных инициаторов.
- ✓ Показано, что при определенных углах столкновения ДВ происходит изменение функциональной зависимости $D_{п.}(\alpha)$, связанное с изменением режимов взаимодействия ДВ.
- ✓ Переход регулярного режима взаимодействия к нерегулярному, сопровождающемуся образованием маховской конфигурации волн, происходит в диапазоне углов $\alpha = 43...48$ градусов.
- ✓ Изменение типа маховского отражения ДВ происходит в диапазоне углов $\alpha = 71...72$ градусов. Это изменение может быть связано с уменьшением степени пересжатия детонационного фронта в области столкновений ДВ.
- ✓ Показано, что количество сталкивающихся ДВ значительно влияет на величину давления в областях столкновений только в регулярном режиме взаимодействия. Давление в нерегулярных режимах взаимодействия определяется давлением в пересжатой Маховской волне.
- ✓ Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы для калибровки кинетических моделей детонации октогенсодержащих ВВ.

Спасибо за внимание

Глущенко Артем Геннадьевич

РФЯЦ-ВНИИТФ

19 – 23 мая 2025 г.

