

Распределение плотности, массовой скорости и давления при детонации зарядов на основе ТАТБ.

Прууэл Э.Р.¹, Тен К.А.¹, Мержиевский Л.А.¹, Лукьянчиков Л.А.¹,
Музыря А.К.², Аминов Ю.А.², Смирнов Е.Б.², Лобойко Б.Г.²,
Жогин И.Л.³, Толочко Б.П.³

¹ *Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева, Новосибирск*

² *РФЯЦ ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина, Снежинск*

³ *Институт химии твердого тела и механохимии, Новосибирск*

15 марта 2010 г.

План

Экспериментальная станция

Алгоритмы восстановления параметров течения

Восстановление плотности из тени

Восстановление массовой скорости и давления из плотности

Восстановление плотности, массовой скорости и давления из тени

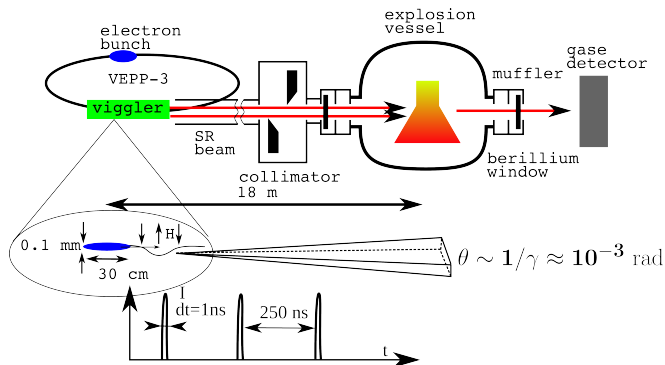
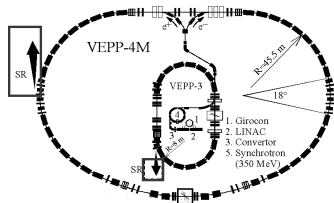
Результаты

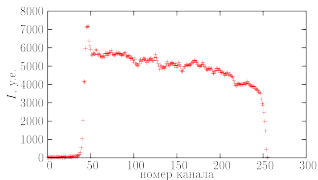
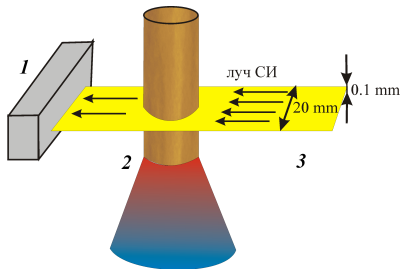
Детонация заряда чистого ТАТБ

Детонация заряда флегматизированного ТАТБ

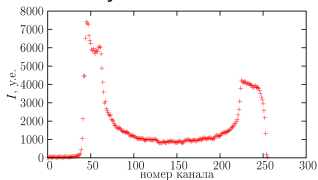
Термодинамика. Адиабаты разгрузки

Комплекс ВЭПП-3 - ВЭПП-4 – базовая установка для исследования детонационных процессов

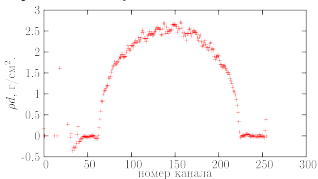




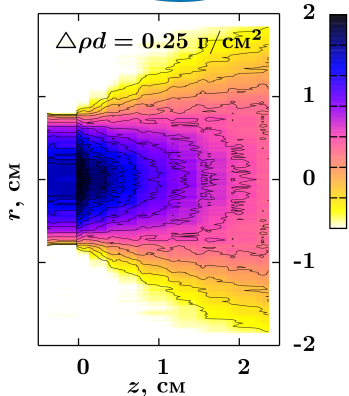
Чистый пучок



Пучок с образцом



Количество вещества на луче



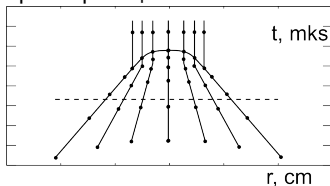
Алгоритмы восстановления параметров течения

$$F(x, t_i) = \int_{-\sqrt{R_0^2 - x^2}}^{+\sqrt{R_0^2 - x^2}} \rho(x^2 + y^2) dy$$

1. Восстановление плотности

1.1 Инверсия Абеля $\rho(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^{R_0} F'(x) \frac{1}{\sqrt{(x^2 + y^2)}} dx$

1.2 Параметризация плотности



$$(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n) \Rightarrow \rho'(r, z) \Rightarrow F'(r, z)$$

$$Rho(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n) = \sum_i (F_i - F_i')^2 \Rightarrow \rho(r, z)$$

2. Восстановление плотности, массовой скорости и давления из законов сохранения (масса, импульс)

2.1 Распределение плотности + потенциальность течения (!)

$$\rho(r, z) \Rightarrow \vec{u}(r, z), p(r, z)$$

2.2 Параметризация давления

$$(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n) + \text{газовая динамика} \Rightarrow [\rho'(r, z), \vec{u}'(r, z), p'(r, z)] \Rightarrow F'(r, z)$$

$$P(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n) = \sum_i (F_i - F_i')^2 \Rightarrow \rho(r, z), \vec{u}(r, z), p(r, z)$$

Восстановление параметров течения по известному давлению

Рассмотрим систему стационарных уравнений газовой динамики на плоскости, при известном распределении давления – $p(x, y)$.

Задача – восстановить компоненты массовой скорости – $u(x, y)$ и $v(x, y)$ и плотность $\rho(x, y)$.

Запишем систему уравнений газовой динамики.

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho u v}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0,$$

$$\frac{\partial \rho v^2}{\partial y} + \frac{\partial \rho u v}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial y} = 0.$$

Уравнения характеристик

$$\begin{pmatrix} \rho & 0 & u & 0 & \rho & v \\ 2\rho u & 0 & u^2 & \rho v & \rho u & uv \\ \rho v & \rho u & uv & 0 & 2\rho v & v^2 \\ dx & 0 & 0 & dy & 0 & 0 \\ 0 & dx & 0 & 0 & dy & 0 \\ 0 & 0 & dx & 0 & 0 & dy \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_x \\ v_x \\ \rho_x \\ u_y \\ v_y \\ \rho_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -p_x \\ -p_y \\ du \\ dv \\ d\rho \end{pmatrix}$$

$$(vdx - udy)^3 = 0$$

Три одинаковых вещественных характеристики $dy/dx = v/u$.

Найдем соотношения на характеристиках.

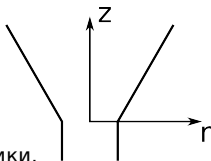
$$\begin{pmatrix} \rho & 0 & u & 0 & \rho & v \\ 2\rho u & 0 & u^2 & \rho v & \rho u & uv \\ \rho v & \rho u & uv & 0 & 2\rho v & v^2 \\ u & 0 & 0 & v & 0 & 0 \\ 0 & u & 0 & 0 & v & 0 \\ 0 & 0 & u & 0 & 0 & v \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_x \\ v_x \\ \rho_x \\ u_y \\ v_y \\ \rho_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -p_x \\ -p_y \\ \sqrt{u^2 + v^2} du/dl \\ \sqrt{u^2 + v^2} dv/dl \\ \sqrt{u^2 + v^2} d\rho/dl \end{pmatrix}$$

$$du/dl = -p_x / (\rho \sqrt{u^2 + v^2}),$$

$$dv/dl = -p_y / (\rho \sqrt{u^2 + v^2}),$$

$$d\rho/dl = -\rho(u_x + v_y) / (u^2 + v^2)^{1/2}$$

Цилиндрические координаты



Уравнения газовой динамики.

$$\frac{\partial r \rho u}{\partial r} + \frac{\partial r \rho v}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial r \rho u^2}{\partial r} + \frac{\partial r \rho u v}{\partial z} + r \frac{\partial p}{\partial r} = 0,$$

$$\frac{\partial r \rho v^2}{\partial z} + \frac{\partial r \rho u v}{\partial r} + r \frac{\partial p}{\partial z} = 0.$$

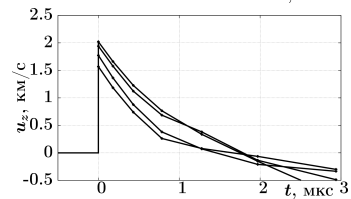
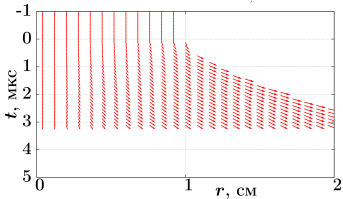
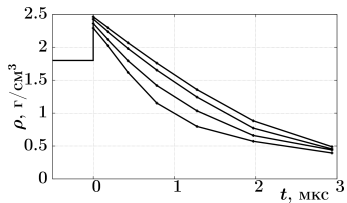
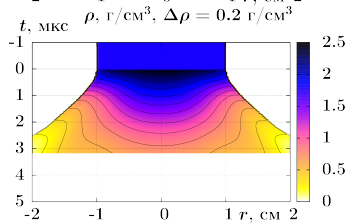
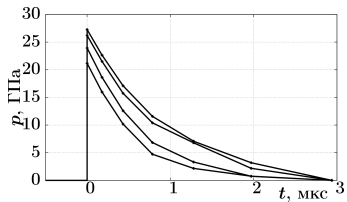
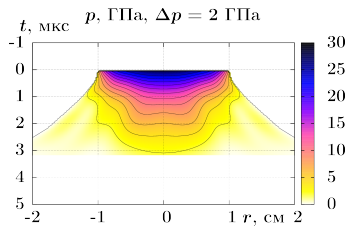
Уравнения характеристик $-(vdr - udz)^3 = 0$

$$du/dl = -p_r / (\rho \sqrt{u^2 + v^2}),$$

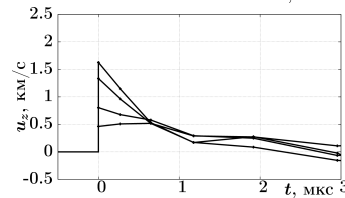
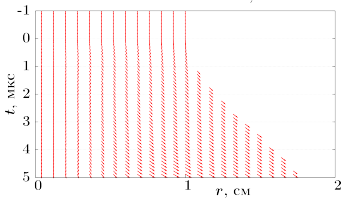
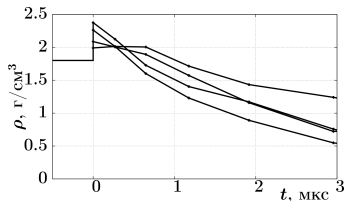
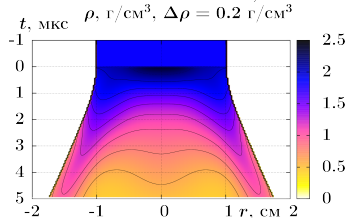
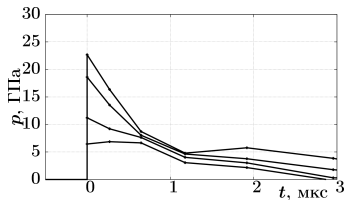
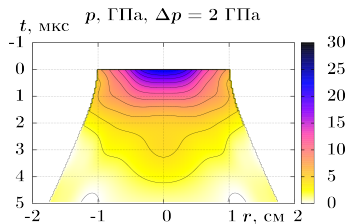
$$dv/dl = -p_z / (\rho \sqrt{u^2 + v^2}),$$

$$d(r\rho)/dl = -r\rho(u_r + v_z) / (u^2 + v^2)^{1/2}$$

Вывод, известное распределение давления и граничные условия однозначно определяют плотность и массовую скорость газодинамического течения.



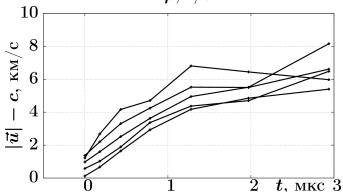
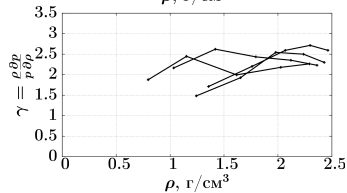
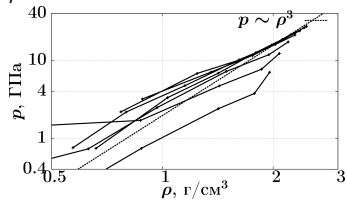
Флегматизированный ТАТБ



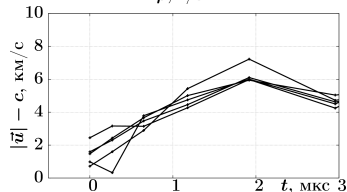
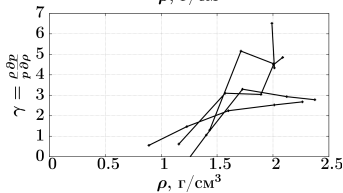
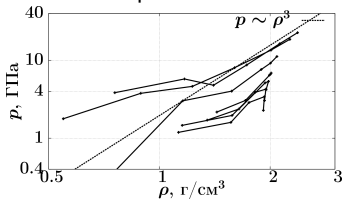
Термодинамика. Адиабата разгрузки

$$dp/d\rho = c^2$$

Чистый ТАТБ.



Флегматизированный ТАТБ.



Основные публикации и используемая литература

1. Библиографический сборник <http://ancient.hydro.nsc.ru/srexpl>
2. Tomography of the flow of detonation products using SR. K.A. Ten, E.R. Prueel, L.A. Merzhievsky, L.A. Lukjanchikov, B.P. Tolochko, I.L. Zhogin, L.I. Shekhtman. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 603 (2009) 160–163.
3. Синхротронная томография плотности, скорости и давления продуктов детонации тротила. Тен К.А., Пруэл Э.Р., Лукьянчиков Л.А., Мержиевский Л.А., Толочко Б.П., Жогин И.Л., Жуланов В.В., Шехтман Л.И. Физика экстремальных состояний вещества — 2008. п. Эльбрус. С 136–138.
4. Исследование взрывных процессов в детонирующих зарядах диаметром 20 мм с помощью синхротронного излучения. К.А. Тен, В.М. Титов, Э.Р. Пруэл, Л.А. Лукьянчиков, В.М. Аульченко, В.В. Жуланов, К.Э. Купер, Л.И. Шехтман, Ю.А. Аминов, А.К. Музыря, Е.Б. Смирнов, Б.Г. Лобойко, Б.П. Толочко, И.Л. Жогин, О.В. Евдоков Препринт ИЯФ 2009-021, Новосибирск, 2009 (in Russian).
5. Распределение плотности разлетающихся продуктов стационарной детонации тротила. Э. Р. Пруэл, Л. А. Мержиевский, К. А. Тен, П. И. Зубков, Л. А. Лукьянчиков, Б. П. Толочко, А. Н. Козырев, В. В. Литвенко. Физика горения и взрыва, 2007, т. 43, N 3. С 121–131.
6. High-speed X-ray transmission tomography for detonation investigation. O. V. Evdokov, A. N. Kozyrev, V.V. Litvinenko, L. A. Lukjanchikov, L. A. Merzhievsky, E. R. Prueel, K. A. Ten, B. P. Tolochko, I. L. Zhogin, P. I. Zubkov. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 575 (2007) 116–120.
7. Density distribution reconstruction of the detonation front of high explosives using synchrotron radiation data. K.A. Ten, O.V. Evdokov, I.L. Zhogin, V.V. Zhulanov, P.I. Zubkov, G.N. Kulipanov, L.A. Luk'yanchikov, L.A. Merzhievsky, B.Ya. Pirogov, E.R. Prueel, V.M. Titov, B. P. Tolochko, M.A. Sheromov. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 543 (2005) 170 – 174.
8. Измерение распределения плотности в детонационных процессах с помощью синхротронного излучения. К.А. Тен, О.В. Евдоков, И.Л. Жогин, В.В. Жуланов, П.И. Зубков, Г.Н. Кулипанов, Л.А. Лукьянчиков, Л.А. Мержиевский, Б.Б. Пирогов, Э.Р. Пруэл, В.М. Титов, Б.П. Толочко, М.А. Шеромов. Препринт. Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера. г. Новосибирск. 2005 г.
9. В.Н. Козловский. Информация в импульсной рентгенографии. Снежинск 2006 г.
10. Применение синхротронного излучения для исследования детонационных и ударно-волновых процессов. А.Н. Алешаев, О.В. Евдоков, П.И. Зубков, Г.Н. Кулипанов, Л.А. Лукьянчиков, Н.З. Ляхов, С.И. Мишнев, К.А. Тен, В.М. Титов, Б.П. Толочко, М.Г. Федотов, М.Р. Шарифутдинов, М.А. Шеромов. Препринт. Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера. г. Новосибирск. 2000 г.
11. Пикалов В.В., Преображенский Н.Г. Реконструктивная томография в газодинамике и физике плазмы. Наука, 1987. 232 стр.
12. Терещенко С.А. Методы вычислительной томографии. ФМЛ, 2003. 320 стр.
13. В.Н. Козловский. Информация в импульсной рентгенографии. Снежинск 2006 г.
14. Gnu Science Library documentation. www.gnu.org/soft/gsl

Основные результаты

- ▶ Улучшен метод восстановления плотности, массовой скорости и давления для осесимметричного стационарного течения по рентгенографическим данным. Метод применим для течений с произвольным уравнением состояния и позволяет определять некоторые термодинамические параметры течения.
- ▶ Восстановлены параметры течения при детонации зарядов на основе ТАТБ.
- ▶ Метод применим для других методик основанных на просвечивании газодинамического течения лучами различной природы, например рентген от рентгеновских трубок, протонная радиография.