

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВОВ В ПК FLOWVISION

Ю.В. Фишер<sup>1,а</sup>, инженер, А.Е. Щеляев<sup>1,б</sup>, менеджер  
<sup>1</sup> ООО «ТЕСИС», г. Москва, РФ

В представленной работе рассматривается моделирование взрыва конденсированных взрывчатых веществ в воздухе. Используется метод моделирования с помощью задания сферы со сжатым газом как точечного источника взрыва. Описывается поведение взрывной волны на среднем и дальнем расстояниях от источника взрыва, на которых профиль давления не зависит от геометрической формы источника. В работе предложено развитие метода сферы со сжатым газом, предусматривающее учет свойств продуктов взрыва для любой композиции взрывчатого вещества. Проведено численное исследование взрыва заряда взрывчатого вещества на открытой местности, в присутствии жестко закрепленной стенки и в модели городской среды. Показано хорошее согласование с экспериментом по пику и импульсу давления как прямой, так и отраженной волны в каждом из описанных случаев.

### Введение

Моделирование распространения взрывной волны в воздухе представляет интерес при оценке последствий от воздействия взрывов и предопределения масштаба разрушений. Целью такого моделирования является определение динамической нагрузки на объекты инфраструктуры - здания и сооружения.

### Постановка задачи

Рассматривается моделирование распространения взрывной волны при взрыве в открытом пространстве от точечного источника (взрыв конденсированного взрывчатого вещества). Целью работы является определение адекватности предложенной методики моделирования взрыва при сравнении с экспериментальными данными, а также развитие предложенного метода путем учета свойств продуктов детонации.

Проводится моделирование взрыва пластида С4 в открытом пространстве [2]. С одной стороны от эпицентра взрыва находится жестко закрепленная стенка, от которой происходит отражение ударной волны (см. рис.1).

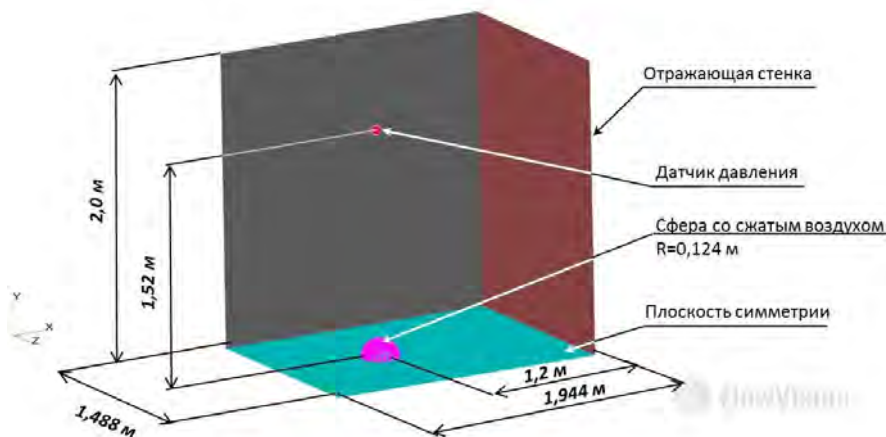


Рис.1 – Постановка задачи

Сравнение с экспериментом проводилось по временной зависимости давления в указанном датчике.

Отработка методики проведена на серии расчетов для отладки модели в двумерной постановке. Цели тарировочных расчетов:

- определение размера расчетной области;
- влияние типа граничных условий при выходе из расчетной области (ГУ напротив отражающей стенки);
- определение необходимого для расчета шага интегрирования по времени и определение расчетной схемы;
- нахождение оптимальной сетки (сходимость по сетке);
- влияние начальных условия в сфере и влияние свойств продуктов взрывчатого превращения.

В трехмерной постановке также рассматривалось влияние расчетной сетки и проводилось сравнение с экспериментом, на основании анализа данных представлены рекомендации по применению данного метода.

### Описание методики моделирования взрыва с помощью сферы со сжатым газом (balloon method)

При решении поставленной задачи используется широко известный и опробованный во многих трудах [1, 3] метод моделирования задания сферы со сжатым газом как источника взрыва. Данный метод наиболее универсальный, обеспечивает достаточную точность на средних и дальних расстояниях без существенного увеличения затрат на вычислительные ресурсы.

Взрыв моделируется заданием начальных условий в сфере со сжатым воздухом, внутренняя энергия которого равна энергии взрыва.

Принятые допущения:

- размер сферы намного меньше размера исследуемой области распространения взрывной волны;
- для определения давления сжатого воздуха применяется формула Броуда:

$$p_{Brode} = \frac{E_{TNT}(\gamma - 1)}{V_{bal}} + p_0,$$

где  $E_{TNT}$  – энергия заряда, Дж;  $\gamma = 1,4$  – показатель адиабаты;  $V_{bal}$  – объем сферы со сжатым газом,  $m^3$ ;  $p_0$  – начальное давление (атмосферное), Па;

- сжатие предполагается адиабатным, газ – идеальным;
- свойства газа внутри сферы соответствуют свойствам воздуха при данном давлении и температуре;
- энергия взрыва выражается через тротиловый эквивалент:

$$E_{TNT} = M_{TNT} \cdot 4,52 \cdot 10^6,$$

где  $M_{TNT}$  – тротиловый эквивалент ВВ, который рекомендуется определять по величине импульса.

- температура сжатого воздуха определяется по уравнению адиабаты:

$$T = T_0 \left( \frac{p_{Brode}}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

### Начальные и граничные условия

В качестве опорных величин установлено давление 1 атм и температура 273 К. Заданы две области с начальными условиями (см. рис.2):

- **Условия невозмущенного воздуха** – во всей расчетной области:

$$P_{изб}=0;$$

$$T=15^{\circ}C.$$

- **Сжатый воздух – в объеме сферы.** Начальные условия внутри сферы со сжатым газом зависят от задаваемого объема сферы. Давление определяется по уравнению Броуда, температура – по уравнению адиабаты. Показатель адиабаты принят постоянным ( $\gamma=1,4$ ):

$$P_{изб}= 2,22 \cdot 10^7 \text{ Па};$$

$$T=1073^{\circ}C;$$

при  $V=0,013 \text{ м}^3$ .

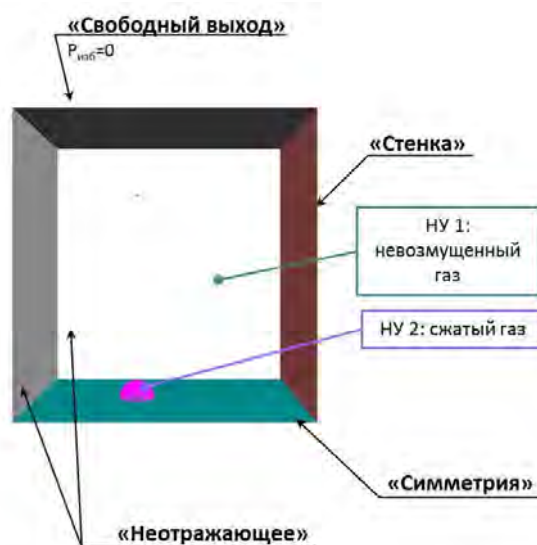


Рис.2 – Граничные и начальные условия

## Математическая модель

При моделировании воздух предполагается идеальным газом, свойства взяты из базы веществ ПК FlowVision.

Моделируемые физические процессы:

- теплоперенос в воздухе – конвекция и теплопроводность;
- движение Ньютонической жидкости/газа.

## Параметры расчета и дополнительные настройки

Расчет проводился на версии ПК FlowVision 3.09.03.

Шаг по времени задавался с помощью числа CFL=1 и на первых 10-ти шагах лимитировался величиной  $10^{-7}$  сек.

Схема интегрирования: Неявная «новая» (2-й порядок точности).

## Исследование сходимости по влияющим факторам

Отработка методики постановки задачи в ПК FlowVision строилась таким образом, чтобы выявить основные параметры, влияющие на изменение давления прямой и отраженной волны, и определить границы их изменения для приемлемой точности численного расчета.

### 1. Тип граничных условий для выхода взрывной волны

Исследовался тип граничных условий, установленных напротив отражающей стенки. В качестве опорной кривой принимался график давления по времени в контрольной точке при заведомо большой расчетной области с расстоянием от центра взрыва до выхода в два раза больше, чем расстояние от взрыва до стенки; т.е. параметр  $X=2,4$  м, что соответствует 20 радиусам сферы со сжатым воздухом (см. рис.3). Тип ГУ при этом установлен как «Свободный выход» (красная кривая на графике рис.4).

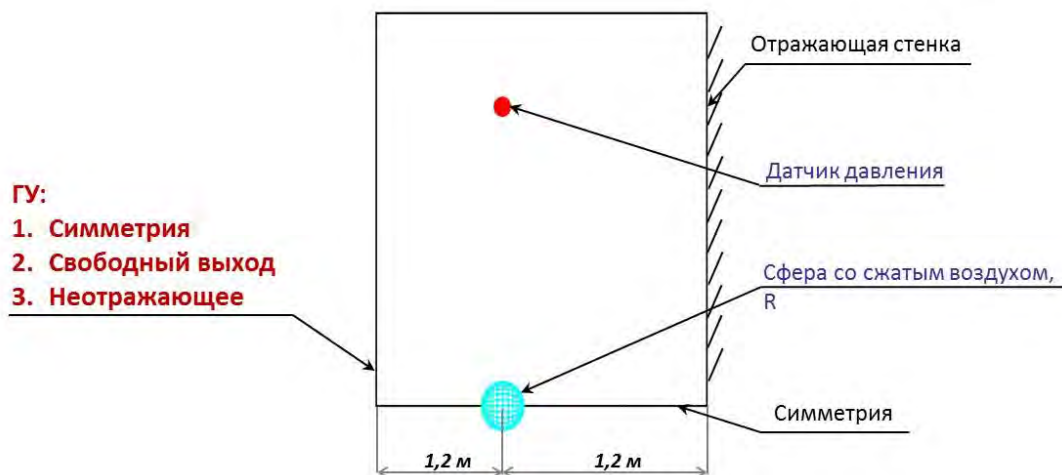


Рис.3 – Схема исследования граничных условий

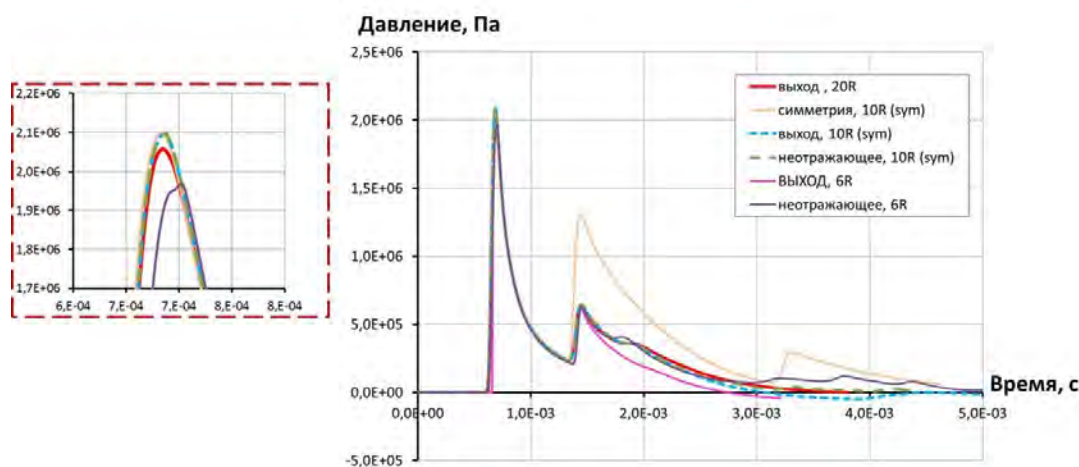


Рис.4 – Сравнение граничных условий

Как видно из рис.4, наибольшее влияние тип ГУ оказывает на амплитуду второго скачка давления. И «Выход», и «Неотражающее» ГУ показали хорошую сходимость с опорной кривой. При установке ГУ типа «Симметрия» возникает отражение взрывной волны, и пик второго скачка существенно увеличивается (примерно в 2 раза). Поэтому «Симметрию» ставить некорректно, если нас интересует поведение давления не только в прямой, но и в отраженной от преграды волне.

## 2. Конфигурация расчетной области

Исследовалась удаленность граничного условия, установленного напротив отражающей стенки, от центра взрыва (размер  $X$  на рис. 5) с целью определить наименьший достаточный размер расчетной области, что существенно сократит потребные ресурсы в 3D-постановке. Критерий достаточности – неизменность профиля давления в контрольной точке.

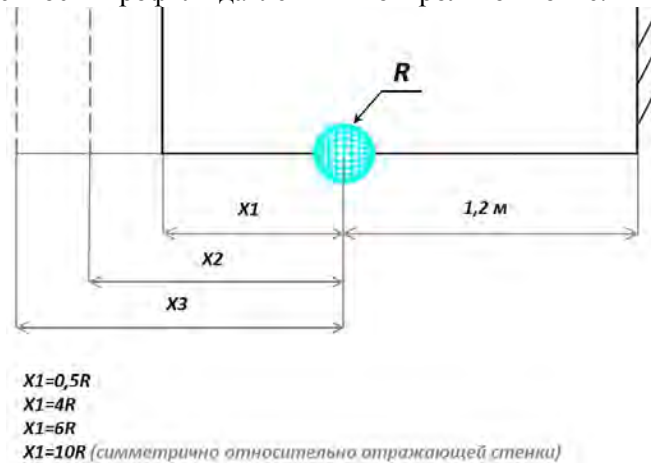


Рис.5 – Исследование конфигурации расчетной области

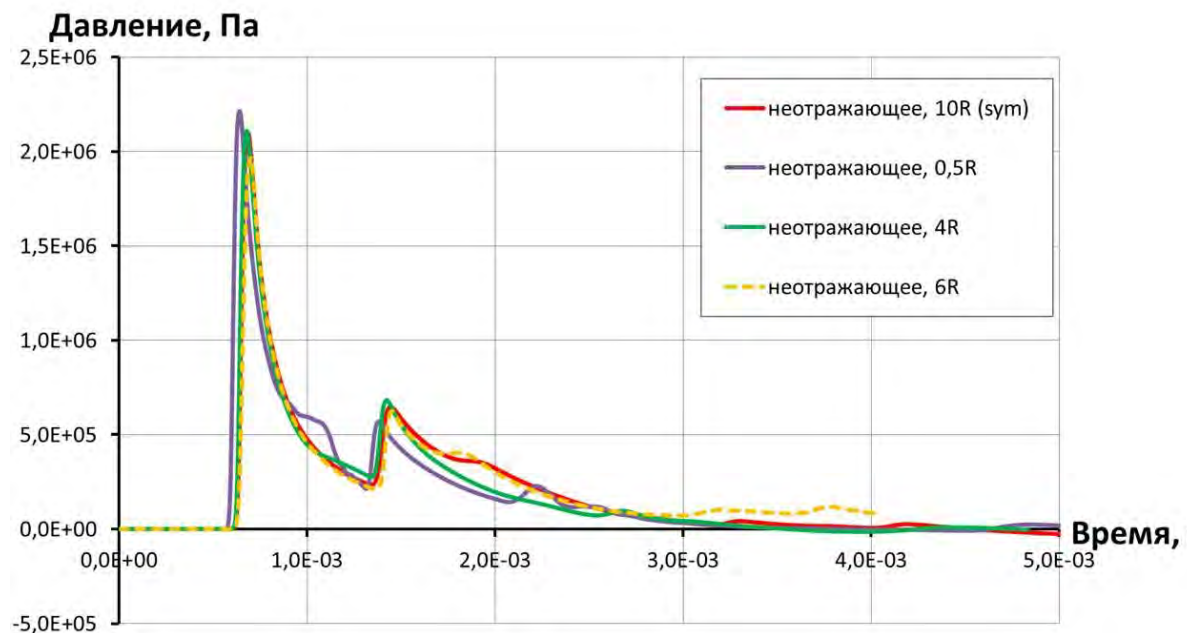


Рис.6 – Исследование конфигурации расчетной области

Следует отметить, что подбор расчетной области – отдельное исследование, которое стоит проводить при отладке численного эксперимента, особенно в задачах с распространением взрывной волны. При этом стоит учесть характерное время исследования и удостовериться, что при данном времени не образуются скачки давления при отражении волны от ГУ в интересующих исследователя точках (датчики давления, стены сооружения и т.д.). Рекомендации по данной работе - расстояние до ГУ выхода волны не менее 6 радиусов сферы со сжатым газом.

## 3. Расчетная сетка

Требования к расчетной сетке в задачах с прохождением взрывной волны можно свести к следующему: сетка должна, во-первых, разрешать градиенты величин на границе с областью первоначального избыточного давления – на границе сферы со сжатым воздухом. Во-вторых, достаточно разрешать градиенты величин при прохождении волны через контрольные точки и вблизи препятствий (в данной задаче - поверхность отражающей стенки). Поэтому адаптация (измельчение) сетки при исследовании сходимости проводится:

- Внутри и по границам сферы сжатого воздуха.
- В объеме расчетной области до интересующих нас объектов (датчик давления)

В ходе исследования определена оптимальная расчетная сетка (см. рис. 7). Сетку следует задавать равномерной от центра взрыва до контрольной точки-датчика давления (размер ячейки соответствует в данной постановке 6 мм), при этом не требуется дополнительного измельчения сетки внутри сферы.

Также допускается использование адаптации к решению для разрешения градиентов давления. Рекомендуется сетку определять таким образом, чтобы по радиусу сферы приходилось 10 - 15 расчетных ячеек.

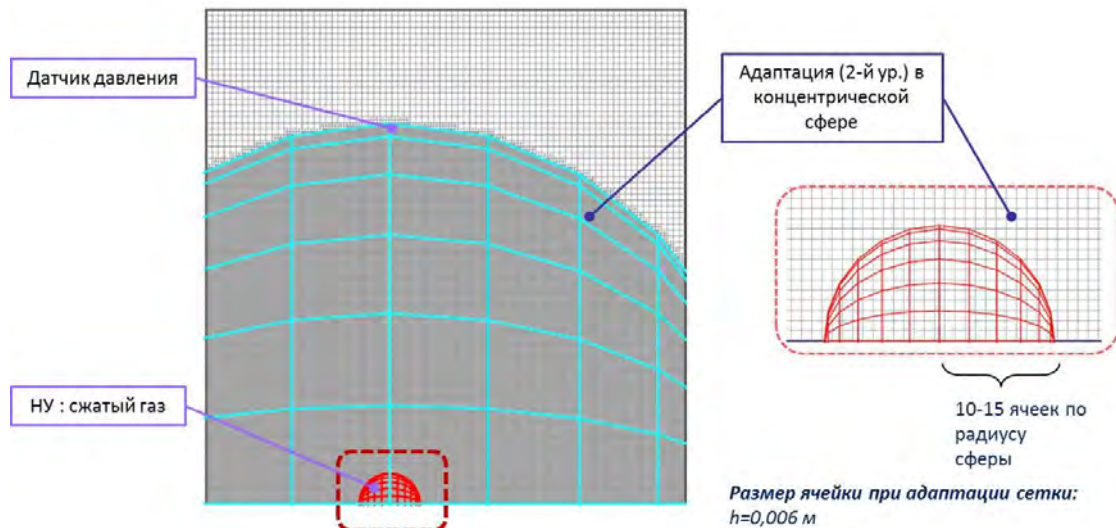


Рис.7 – Расчетная сетка

#### 4. Шаг интегрирования и расчетная схема

Для оптимальной расчетной сетки со 2-м уровнем адаптации в пространстве проведены расчеты с шагом CFL=1; CFL=2; CFL=5 (явный шаг по времени составляет  $\tau = (1 \dots 8) \cdot 10^{-6}$  сек.) Результаты показаны на рис.8. Увеличение шага по времени до CFL=2 приводит к сдвигу 2-го скачка (отраженного) при сохранении положения 1-го скачка давления и его амплитуды в пределах  $\Delta P_{max}=3\%$ . Больше увеличение шага сказывается как на времени прихода волны (прямой и отраженной), так и на амплитуде отраженной волны, поэтому рекомендуется задавать шаг не более CFL=1...2.

Применение явной схемы решения не приводит к изменению максимального давления ( $\Delta P_{max} \approx 7\%$  в 3D-постановке) или существенному снижению скорости счета (отличие по времени  $\sim 5\%$ ).

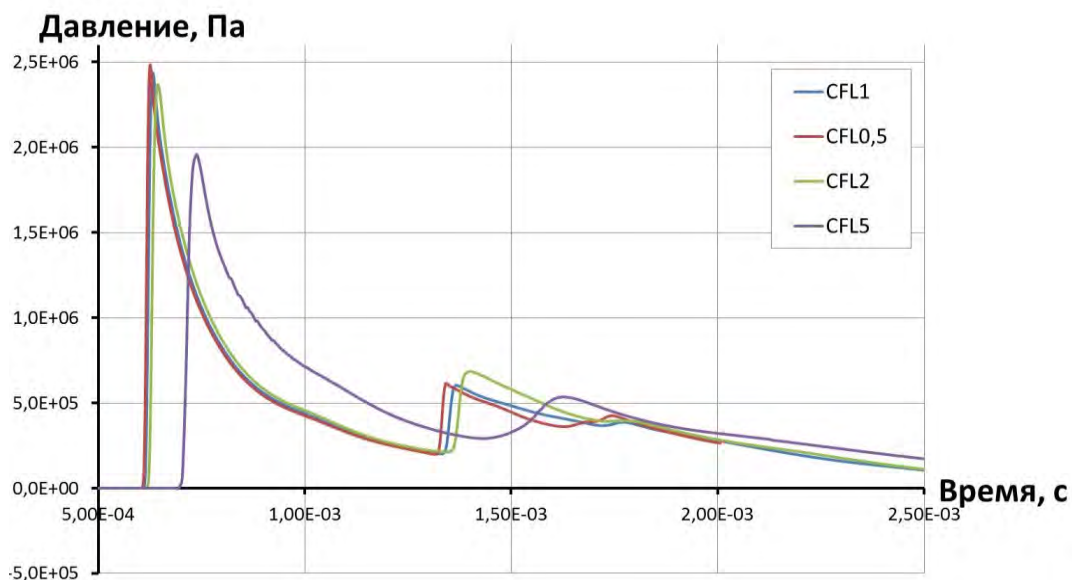


Рис.8 – Влияние шага по времени

#### 5. Влияние начальных условий в сферической области со сжатым газом

Была проведена серия расчетов в двумерной постановке. Варьировался объем сферы  $V_{bal}$  сжатого газа, для которого однозначно определяется давление в НУ по уравнению Броуда:

$$p_{Brode} = \frac{E_{TNT}(\gamma - 1)}{V_{bal}} + p_0$$

Показано, что с увеличением давления существенно увеличивается пик давления в набегающей взрывной волне (рис.9). Увеличение давления в набегающей волне с увеличением давления в НУ - погрешности самого метода и определяет область его применимости, поэтому необходимо определение диапазона задаваемого давления внутри сферы со сжатым газом.

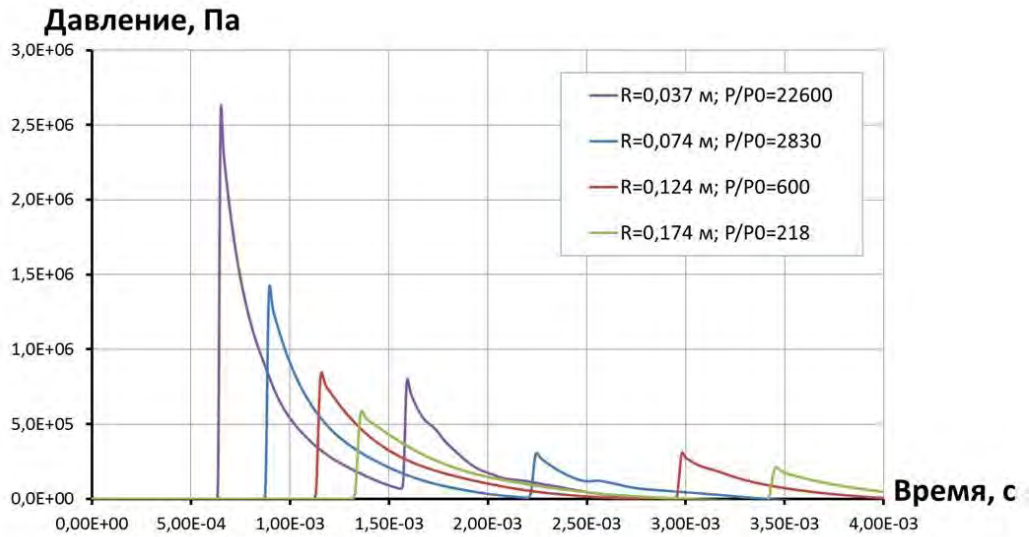


Рис.9 – Влияние начального давления в сфере

### Учет свойств продуктов взрыва и определение начального давления

Цели данного этапа работы в рамках создания методики моделирования точечного взрыва заключаются в том, чтобы:

- улучшить метод сжатого объема ("ballon metod") путем учета свойств продуктов взрыва конкретного ВВ;
- определить объем, давление и температуру для начальных данных без учета тротилового эквивалента, данные о котором могут различаться в зависимости от источника или полностью отсутствовать для вновь разрабатываемых ВВ.

Приняты следующие допущения:

- высвобождение внутренней энергии происходит при протекании реакций взрывчатого превращения;
- состав продуктов реакций и их свойства определяются из условий химического и термодинамического равновесия[7];
- при определении равновесных свойств и параметров состояния учитывается диссоциация продуктов при температуре взрыва;
- предполагается, что после детонации конечные продукты представляют собой смесь газов и подчиняются закону идеального газа. Погрешность использования уравнения состояния для нагретых газов при давлениях 100—200 атм. не превышает 2% [6];
- расширение до заданного давления – адиабатный процесс.

Расчет НУ проводится в следующей последовательности:

- Определение массового состава композиции ВВ и свойства каждого компонента.
- Расчет начального состояния ВВ до детонации – определение внутренней энергии  $U_0$  ВВ и удельного объема заряда  $v_0$  (с учетом массового содержания компонент).
- Определение удельного объема смеси  $v_1$  для принятого давления и при сохранении внутренней энергии  $U_0$  ВВ, для которого рассчитываются равновесные параметры состояния и свойства продуктов реакций взрыва. Расчет проводится в программе ТЕРРА.
- Удельная теплоемкость и молярная масса газовой смеси определяются как средние для процесса расширения от заданного давления (100-200 атм.) до атмосферного.
- Определяется радиус сферы из массы заряда и удельного объема  $v_1$ .

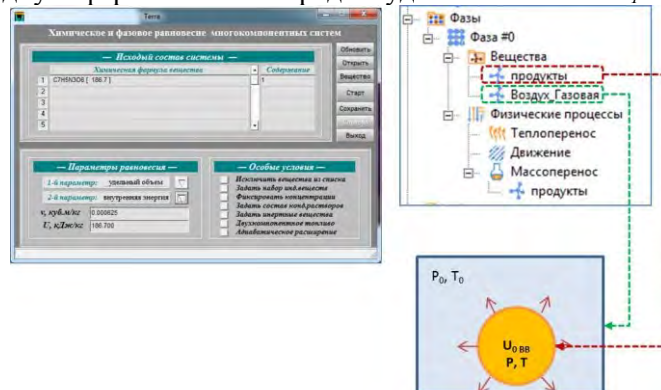


Рис.10 – Расчет свойств продуктов взрывчатого превращения

В математическую модель процесса добавляется вещество – продукты взрыва – и моделируется перемешивание с воздухом путем решения уравнения для концентрации.

Учет свойств продуктов взрыва позволяет не применять для расчетов тротильный эквивалент, данных о котором для взрывчатого вещества могут существенно различаться, либо отсутствовать.

### Результаты расчета

Получены кривые давления при разных начальных давлениях в сфере (в пределах рекомендаций: 100-200 атм.) без учета свойств продуктов взрыва, при использовании уравнения Брода, и с помощью теоретического расчета состава продуктов взрыва, показанные на рис.11.

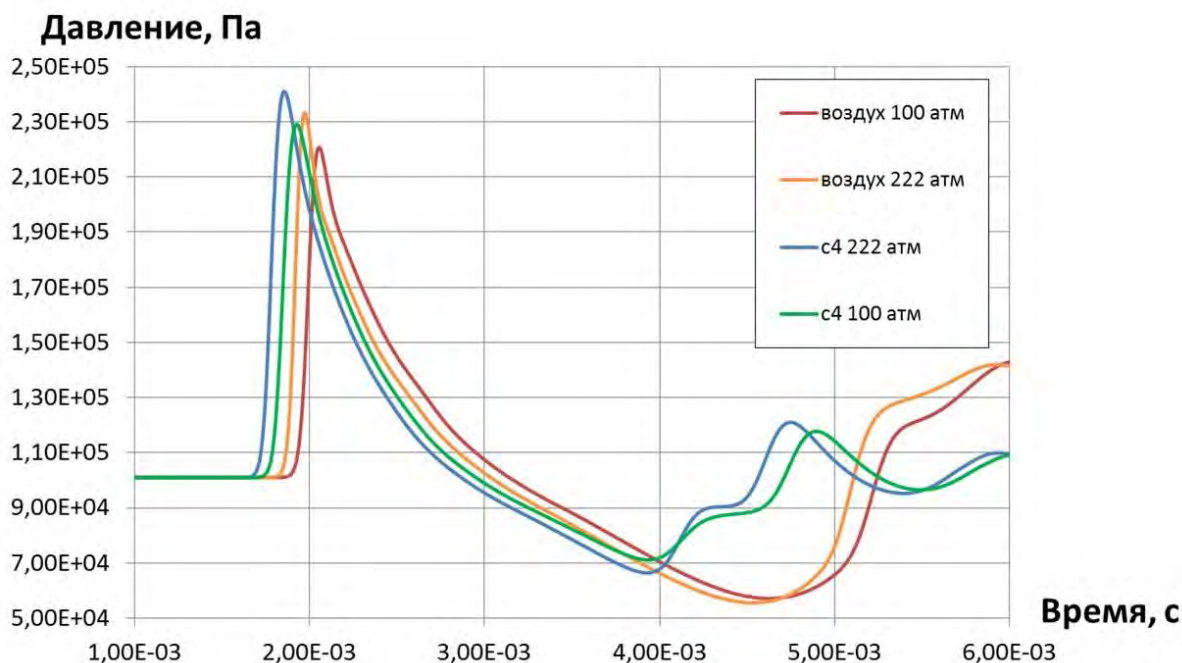


Рис.11 – Расчетные кривые давления, полученные по различным методикам и при разном начальном давлении в сфере

Кривые давления, полученные при задании свойств продуктов взрыва, не существенно отличаются по пику давления набегающей (первичной) волны от кривых, полученных с помощью исходного метода (сжатого воздуха); профиль отраженной волны отличается по времени и пику давления. Сравнение с экспериментальными данными и данными, полученными при помощи других расчетных кодов, показывает хорошее совпадение расчетов FlowVision с экспериментом (см. рис.12).

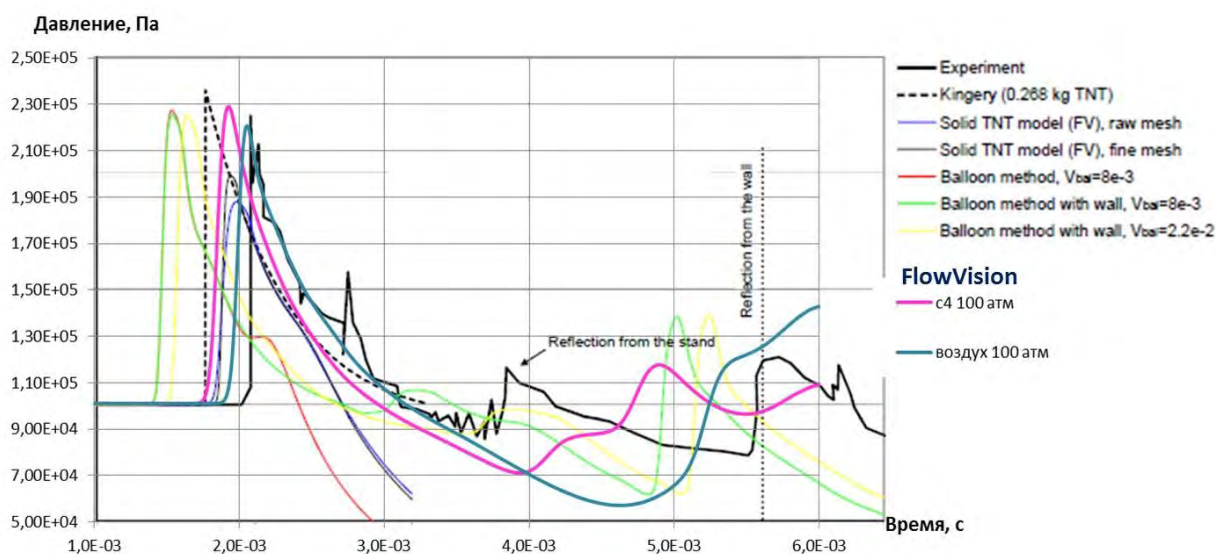


Рис.12 – Давление в контрольной точке, полученное различными методами моделирования в сравнении с экспериментальными данными

Рекомендации по применению метода:

- При построении расчетной области рекомендуется задавать расстояние до ГУ выхода волны не менее 6 радиусов сферы со сжатым газом;
- Шаг по времени необходимо задавать не более  $CFL=1...2$ ;
- Расчетная сетка должна содержать не менее 10 ячеек по радиусу сферы для наиболее точных расчетов;
- Явная схема интегрирования приводит к увеличению пика давления в падающей взрывной волне ( $\Delta P_{max} \approx 7\%$ ), на время расчета существенно не влияет (отличие  $\sim 5\%$ );
- Предлагается проводить учет продуктов взрыва твердого вещества и расчет термодинамических параметров при заданном давлении, если имеются данные о составе взрывчатки;
- Давление, задаваемое в начальных условиях в сфере со сжатым газом рекомендуется задавать порядка 100-200 атм.

### Верификация методики

Верификация метода расчета взрывов проводится на следующих задачах: взрыв в открытом пространстве и взрыв в модели городской улицы.

#### 1. Взрыв в открытом пространстве

Проводится моделирование взрыва пластида С4 в открытом пространстве [2]. Задача аналогична той, на которой проводилась методика. Отличие – другая масса пластида (454 гр.) и отсутствие отражающей стенки. Постановка задачи – симметричная, расчетная область составляет 1/8 пространства (см. рис.13). Датчик статического давления расположен над центром взрыва на расстоянии 1,52 м, и сравнение с экспериментом проводится только для прямой волны. Показано хорошее согласование профиля давления с экспериментом по амплитуде и временным параметрам, пик давления отличается от экспериментального в пределах погрешности 5% (см. рис. 14).

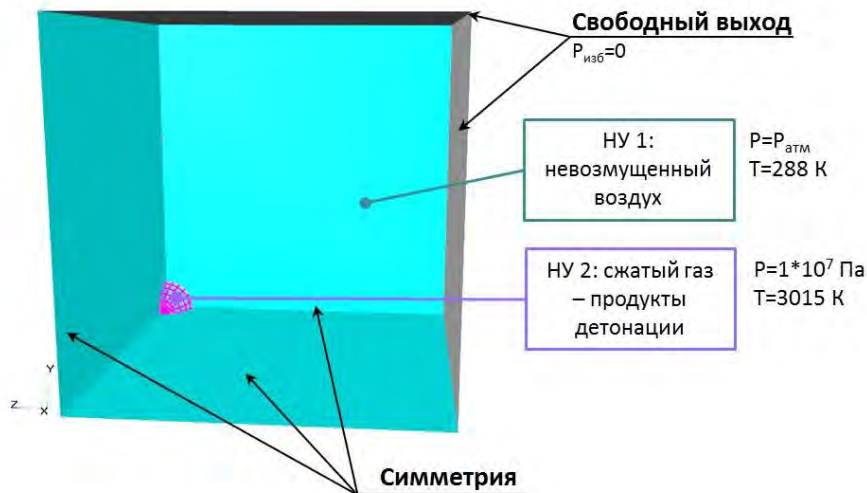


Рис.13 – Взрыв в открытом пространстве: постановка задачи

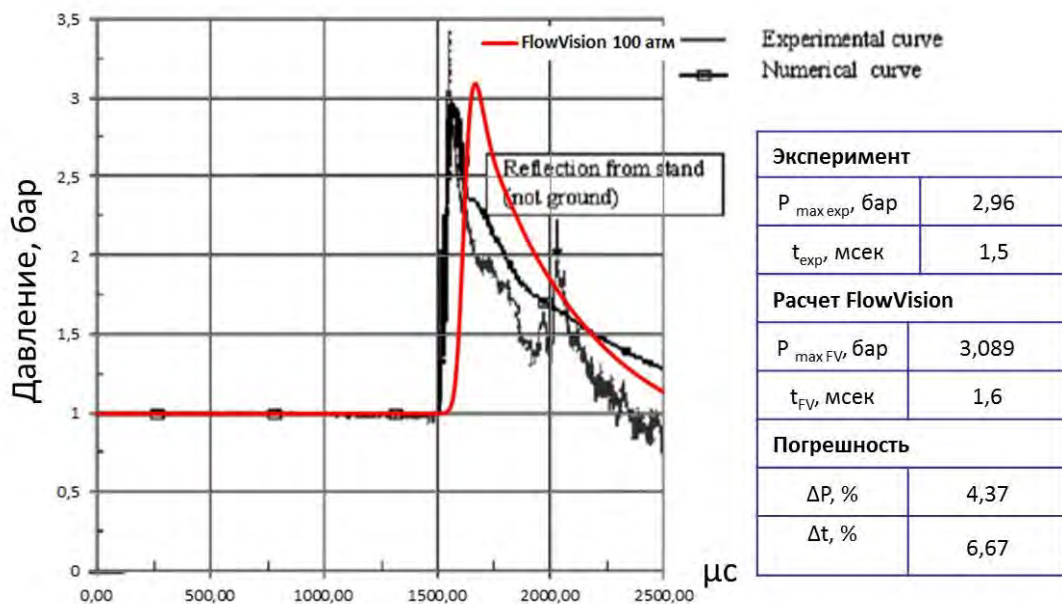


Рис.14 – Взрыв в открытом пространстве: сравнение с экспериментом



## 2. Взрыв тротила в масштабной модели городской улицы

Проводится моделирование взрыва в масштабной модели городской улицы. Заряд ТНТ с массой 8 гр. (1,0 lb) расположен в центре улицы. (см. рис.15). Датчики статического давления расположены в центре граней здания в конце улицы. Постановка задачи – симметричная, расчетная область составляет 1/4 пространства.

Особенность данной задачи – задание НУ в полусфере (заряд расположен на поверхности).

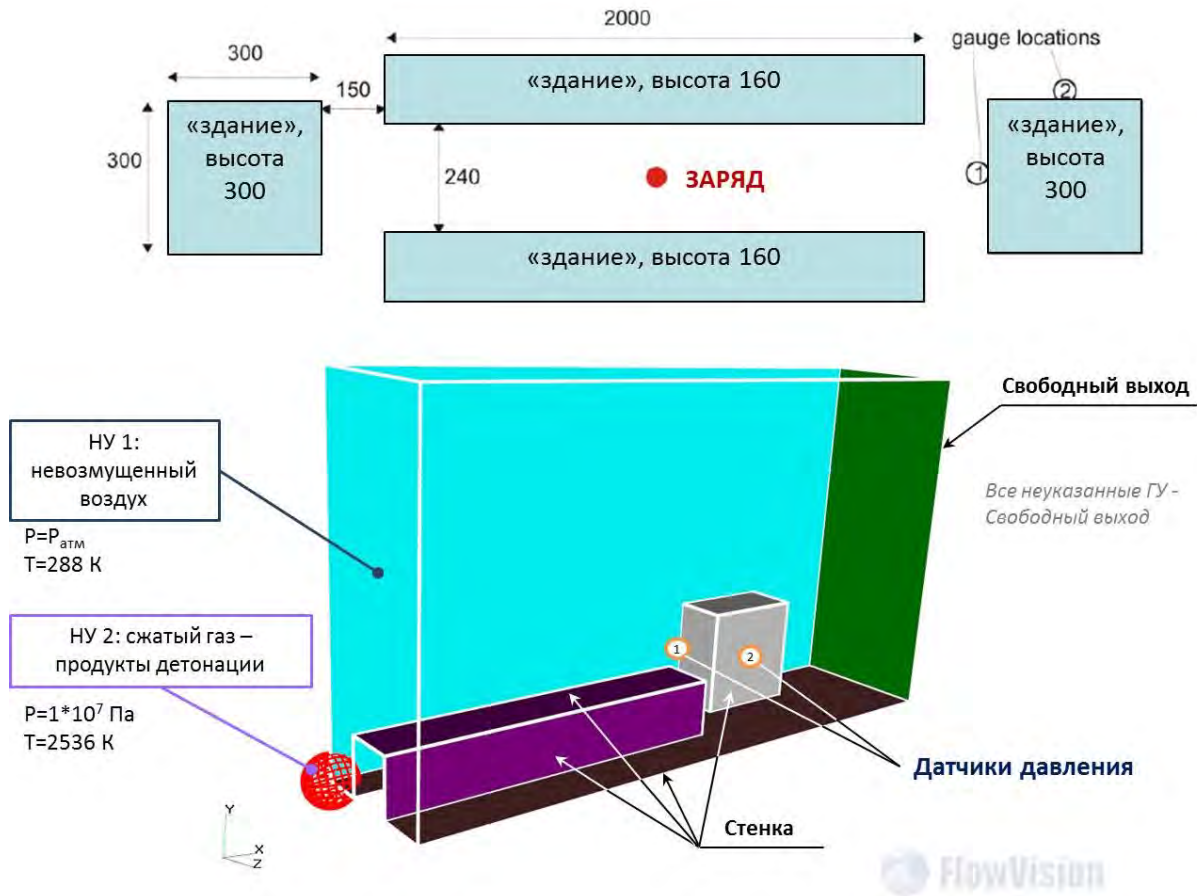


Рис.15 – Взрыв в модели городской улицы: постановка задачи

На рис. 16 показаны последовательные моменты распределения давления по поверхностям, хорошо видно искажение сферической волны в коридоре между двумя длинными зданиями. На рис. 17 показано сравнение с экспериментом по каждой из точек-датчиков. Получена достаточная точность и качественное описание профилей давления.

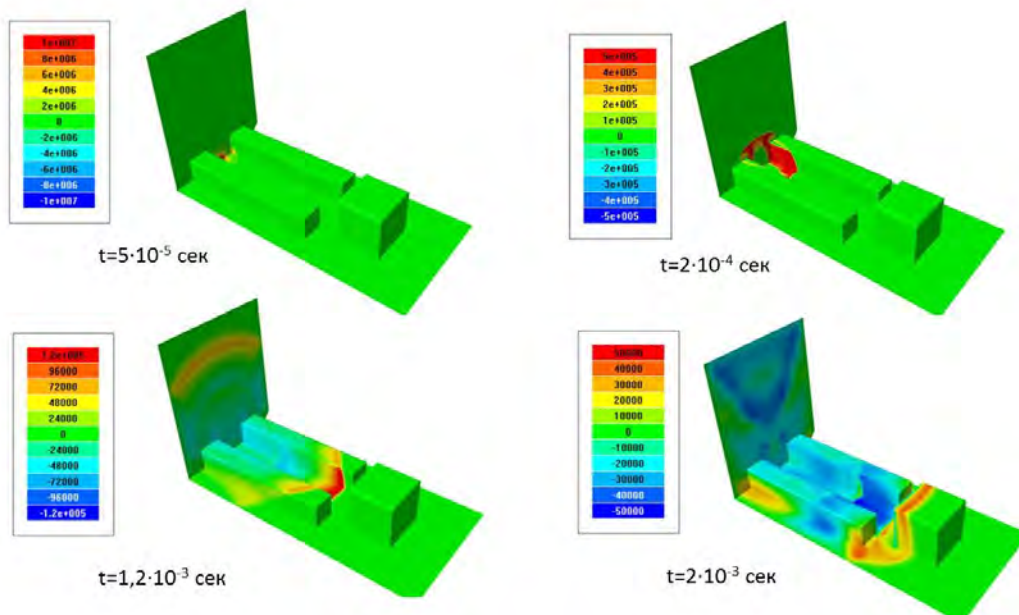
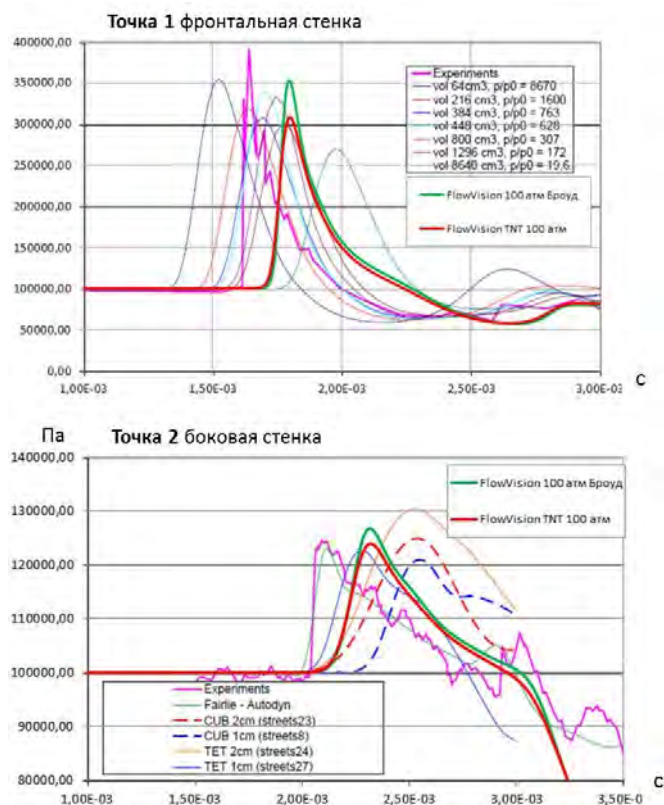


Рис.16 – Взрыв в модели городской улицы: распределение давления [Па] по поверхностям объектов зависимости от времени



	Точка 1		Точка 2	
<b>Эксперимент</b>				
$P_{1 \text{ max exp}}$ , Па	3,930E+05		1,240E+05	
$t_{1 \text{ exp}}$ , мсек	1,62E-03		2,03E-03	
<b>Расчет FlowVision</b>				
	Воздух	Тротил	Воздух	Тротил
$P_{\text{max FV}}$ , бар	3,527E+05	3,086E+05	1,267E+05	1,239E+05
$t_{FV}$ , мсек	1,72E-03	1,70E-03	2,10E-03	2,08E-03
<b>Погрешность</b>				
$\Delta P$ , %	10,26	21,47	2,21	0,05
$\Delta t$ , %	6,17	4,94	3,45	2,46

Рис.17 – Взрыв в модели городской улицы: сравнение с экспериментом и расчетами в других кодах

## Выводы

- Проведено моделирование взрывной волны по методике сжатого объема газа с использованием уравнения Бруда, показана адекватность используемой модели при сравнении с экспериментом.
- Предложена методика расчета свойств продуктов детонации и начальных условий в сфере со сжатым газом.
- Представлены рекомендации по использованию данного метода моделирования взрывов
- Определены оптимальные параметры математической модели и расчетной сетки для данного класса задач.
- Показано хорошее качественное согласование профиля давления с экспериментом по амплитуде.
- Метод моделирования взрыва с помощью сферы со сжатым газом подходит для полусферических НУ без существенного снижения точности расчета.

## Список литературы

- Martin Larcher, Folco Casadei, Explosions in complex geometries – a comparison of several approaches, JRC Scientific and Technical Reports, 2010.
- A. Alia, M. Souli, High explosive simulation using multi-material formulations, Applied Thermal Engineering 26 (2006).
- H. L. Brode, Numerical solutions of spherical blast waves, Journal of Applied Physics 26 (6) (1955) 766–775.
- International Ammunition Technical Guideline (IATG), Formulae for ammunition management 01.80, United Nations, 2011
- У. Бейкер, П. Кокс, П. Уэстайн и др. Взрывные явления. Оценка и последствия: В 2-х кн. Кн.1. Москва, 1986
- В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин, В.А. Худяков Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Справочник в пяти томах, Том I. Москва, 1971
- Ф.А. Баум, К.П. Станюкович, Б.И. Шехтер Физика взрыва. Москва 1959.
- TERRA. Программа термодинамического расчета состава фаз произвольных гетерогенных систем, а также их термодинамических и транспортных свойств (руководство).