СКОРОСТНЫЕ ПРЕДЕЛЫ ДЕТОНАЦИИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ С ПОЗИЦИИ РЕЗОНАНСНОЙ ПЛАЗМОДИНАМИКИ

Серов Ю.Л.

Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНЫХ ВОЛН С ПЛАЗМОЙ

Детальные исследования физических процессов в плотной плазме вблизи фронта ударной волны позволили обнаружить возникновение в этой области ионно-звукового солитонного сгустка [1], возникающего вследствие нелинейного взаимодействия плазменных компонент. Анализ баллистических экспериментов [2] показал, что аномальное обтекание сверхзвуковых тел плазмой [3] возникает только в области скоростей, где существует ионно-звуковой солитонный сгусток. Физическая модель наблюдаемых в плазме аномалий, хорошо согласующаяся с результатами высокоскоростных баллистических экспериментов, предложена в работе [4]. Оказалось, что кроме тривиального термического фактора, оказывающего влияние на плотность среды в потоке, в плазме существует особый механизм взаимодействия тяжёлых компонент в области ударной волны. Плазма в области значительных градиентов полей обладает специфическими резонансными нелинейными динамическими свойствами, определяющими характеристики ударной волны в особых диапазонах скоростей. Экспериментально и теоретически было показано, что наблюдаемые аномалии связаны с образованием в плотной столкновительной плазме в области ударной волны высокоионизованного ионно-звукового солитонного сгустка. Этот сгусток, существующий в диапазоне ионных чисел Маха $1< M_i \le 1{,}63$ приводит к интенсивному взаимодействию тяжёлых плазменных компонент в области ударной волны. В результате такого взаимодействия в плазме в резонансном диапазоне скоростей $\Delta C = V_{is} \div 1{,}63\, V_{is}$ формируется ионно-звуковая ударная волна нейтральной компоненты [5]. Таким образом в плазме возникает сложная ударно-волновая структура, состоящая из обычной и ионно-звуковой ударных волн. Это приводит к появлению различных аномалий при распространении сверхзвуковых тел и ударных волн. Расстояние между компонентами этой ударно- волновой структуры уменьшается при приближении ионного числа Маха к значению $M_i = 1{,}63$. В частности показано [6], что разрушение ударных волн при ионизационной неустойчивости происходит именно при ионных числах Маха $M_i = 1{,}63$, когда происходит коллапс солитонного сгустка. Теоретический аспект и математическая модель этого эффекта рассмотрены в работах [4,5,7,8]. Согласно этой модели при движении ударной волны в плазме уравнение для потенциала электрического поля в областях резкого изменения полей в результате нелинейности приводится к уравнению Сагдеева:

$$2D\psi'' = -\frac{d\phi(\psi)}{d\psi}$$

$$\phi(\psi) \equiv 1 - \exp\psi + M_i^2[1-(1-2M_i^{-2}\psi)^{1/2}],$$

$$\psi \le \psi_*; \qquad \psi_* \equiv 0{,}5M_i^2,$$

M_i - ионное число Маха. Радиус Дебая D характеризует дисперсионные свойства плазмы. Это уравнение в области ионных чисел Маха $1 < M_i \le 1{,}63$, ($M_i = C/V_{is}$, где C- скорость ударной волны, $V_{is} = \sqrt{T_e/m_i}$ - скорость ионного звука), имеет солитонное решение. Вблизи ударной волны в областях резонанса формируются ионно-звуковые солитонные сгустки [1]. Ионно-звуковой солитонный сгусток, возникающий при $M_i > 1$, приводит к развитию неустойчивости ударной волны. По мере увеличения ионного числа Маха происходит резкое увеличение амплитуды сгустка и увеличение в нём коэффициента ионизации. Вблизи значения $M_i \approx 1{,}63$ величина коэффициента ионизации приближается к значению $\alpha \approx 1$. В этой области в высокоионизованном сгустке происходит наиболее сильное взаимодействие заряженной и нейтральной компонент плазмы. Это момент максимальной неустойчивости, за которым следует коллапс солитона и разрушение ударной волны. Вблизи $M_i \approx 1{,}63$ скорости ионов V_i, а вследствие резонансной перезарядки, и нейтральных частиц V_n, приближаются к своему предельному значению $V_n \to V_i \to 1{,}63 V_{is}$. В [5] получено и проанализировано уравнение, учитывающее упругие ион-нейтральные соударения, электронную теплопроводность, ионную вязкость, нелинейность и дисперсию. Рассмотренное уравнение даёт те же закономерности, что и решение уравнения Сагдеева. При критическом значении ионного числа Маха

$M_i \approx \sqrt{3}$ возникает взрывная неустойчивость, происходит резкое увеличение амплитуды, а затем коллапс солитонного сгустка.

Экспериментальные результаты исследования ионизационной неустойчивости свидетельствуют, что неустойчивость ударной волны возникает периодически при изменении скорости волны. Эта периодичность связана с тем, что в плазме вблизи фронта обычно реализуется многожидкостная система, возникающая за счёт присутствия в плазме различных ионов и неравновесности распределения электронов. Распределения электронов по энергии в области фронта ударной волны формируют различные плазменные реакции, в том числе реакция ионизация при столкновении двух возбуждённых атомов [9] и удары второго рода при участии частиц, находящихся в метастабильном или резонансном состоянии. Известно, что удары второго рода между электронами и возбуждёнными атомами приводят к появлению групп немаксвелловских электронов [10]. Распределение электронов по энергии в области фронта ударной волны экспериментально не исследовалось. Однако, можно предполагать, что несмотря на малое время релаксации функции распределения электронов по энергии, количество немаксвелловских электронов в нестационарном процессе вблизи фронта может быть значительным. Это связано с тем, что кроме релаксации, в этой области происходят интенсивные возбуждение и ионизация за счёт поглощения излучения, химические реакции а также сложное взаимодействие плазменных компонент в поле ионно-звуковой волны. В результате всех процессов в области фронта ударной волны устанавливается некоторое динамическое равновесие с немаксвелловским распределением электронов по энергии. В многокомпонентных средах существуют различные виды ионов и группы электронов, обусловленные многочисленными плазменными реакциями. Таким образом в плазме вблизи ударной волны возникает многожидкостная система с набором скоростей ионного звука V_{is}^{n}. В результате формируются особые резонансы. По мере изменения скорости ударная волна последовательно проходит через резонансные диапазоны скоростей, в которых возникает сложная ударно-волновая структура, включающая ионно-звуковую ударную волну. Подобные структуры, в которых наблюдалось удвоение и даже утроение ударной волны вследствие переналожения резонансных диапазонов наблюдались экспериментально. Сравнение расчётов с экспериментом, проведённое в работе [6], показало, что такое описание процессов полностью соответствует реальной действительности. Это позволило с высокой точностью (1 ÷ 4 %) определить диапазоны ионизационной неустойчивости ударных волн в хорошо исследованных аргоне, ксеноне, аномального обтекания сверхзвуковых тел газоразрядной плазмой, а также диапазоны релаксационной неустойчивости газовых течений вблизи сверхзвуковых тел. Проблема взаимодействия высокоскоростных течений с плазмой не исчерпывается только перечисленными выше фундаментальными и прикладными аспектами. Нелинейные динамические свойства плазмы носят универсальный характер и всегда должны проявляться в резонансных областях существования солитонного сгустка. В принципе не имеет значения каким образом создаётся плазма. Она может создаваться искусственно с помощью газового разряда (аномальное обтекание тел плазмой), образовываться самой ударной волной при фотоионизации (ионизационная неустойчивость ударных волн) или в ходе химических реакций и излучения в области фронта, как при детонации. Вследствие этого необходимо рассмотреть проблему детонации и распространения ударных волн во взрывчатых веществах горючих смесях с точки зрения обнаруженного нового физического механизма, лежащего в основе взаимодействия высокоскоростных потоков с плазмой. Детонация и распространение ударных волн в различных горючих газовых смесях с позиции нелинейной ионно-звуковой модели рассмотрены в работах [11-16].

ДЕТОНАЦИЯ НИТРОСОЕДИНЕНИЙ

Скорости и пределы распространения детонационных волн в различных горючих смесях измерялись многими исследователями. Сопоставим скорости детонации со скоростями солитонных сгустков, которые могут образоваться в продуктах реакции разложения взрывчатого вещества. Подобное сопоставление для простейшей кислородно-водородной смеси [13] показало, что скорости детонации в этой смеси определяются максимальной фазовой скоростью солитонных сгустков, образованных за счёт заселения двух самых низких метастабильных термов молекулы кислорода. Воспользуемся результатами этих исследований, а также опытом, полученным при изучении аномального обтекания тел плазмой, релаксационной неустойчивости ударных волн на основе нелинейной ионно-звуковой модели [6]. Подобное рассмотрение позволяет понять детальные физические механизмы, определяющие природу и скоростные границы детонации различных взрывчатых веществ. Представляет интерес изучение ряда хорошо известных жидких взрывчатых веществ на основе нитросоединений, таких как нитроглицерин, нитрометан, тетранитрометан, нитрогликоль. Рассмотрим также механизм детонации твёрдых взрывчатых веществ, в том числе тротила - одного из самых распространенных взрывчатых веществ. Данные нитросоединения имеют различную теплоту взрыва в диапазо-

не 1,9 ÷ 7 МДж/кг. Теплота взрыва определяет заселённость энергетических термов атомов и молекул, образовавшихся в продуктах разложения взрывчатых веществ. Чем больше теплота взрыва, тем более высокие энергетические термы атомов и молекул заселяются. В результате растёт энергия электронов и фазовая скорость ионно-звуковых солитонных сгустков. Сравним скорости детонации ряда жидких и твёрдых нитросоединений с фазовыми скоростями солитонных сгустков, возникающих в области фронта волны.

Тетранитрометан.

Слабое малочувствительное жидкое бризантное взрывчатое вещество. Детонирует в стальной трубе. Применяют как окислитель в жидких взрывчатых смесях. Тетранитрометан из рассмотренных в данной работе веществ обладает наиболее низкой теплотой взрыва. В пересчёте на одну молекулу исходного вещества теплота взрыва составляет величину ~ 3 эв. Реально при разложении молекулы энергия на одну частицу будет меньше. Однако, такой теплоты взрыва уже достаточно для заселения в плазменных реакциях нижнего метастабильного терма атома кислорода. Скорость детонации D = 6400 м/с**.** Расчёт показывает, что экспериментальное значение скорости детонации тетранитрометана соответствует верхней границе диапазона существования солитонного сгустка, который возник в диапазоне скоростей $\Delta C = V_{is} \div 1{,}63\ V_{is}$ за счёт ионов атомарного углерода и электронов, связанных с заселением нижнего метастабильного терма атома кислорода $O(^1D)$ с энергией E = 1,97эв **(**Таблица 1**)**. Возникающий солитонный сгусток будем обозначать следующим образом: [O^*(1,97эв), C^+]. Атомарные ионы могут образоваться в плазменных реакциях с участием молекулярных ионов при взрывном разложении нитросоединения. Электроны, участвующие в образовании солитонного сгустка, образуются при ударах второго рода в реакции

$$O^*(1{,}97эв) + e \rightarrow O + e\ (1{,}97эв)$$

Углерод имеет наименьший потенциал ионизации среди элементов, составляющих тетранитрометан, поэтому именно его ионы преобладают в продуктах разложения тетранитрометана и формируют солитонный сгусток с фазовой скоростью в диапазоне ΔC = 3950 ÷ 6400 м/с.

1,3-Динитробензол, ДНБ $C_6H_4(NO_2)_2$.

Бесцветное кристаллическое вещество, растворимое в спирте и других органических растворителях. Менее восприимчив к удару и детонации чем тротил. Теплота взрыва 3.43 МДж/кг, скорость детонации литого динитробензола D = 6100 м/с. Экспериментальное значение скорости детонации динитробензола соответствует верхней границе диапазона существования солитонного сгустка, который возник в диапазоне скоростей $\Delta C = V_{is} \div 1{,}63\ V_{is}$ за счёт ионов CH^+ и электронов, связанных с заселением нижнего метастабильного терма атома кислорода $O(^1D)$ с энергией E = 1,97эв. Для сгустка [O^*(1,97эв), C^+] диапазон скоростей $\Delta C = V_{is} \div 1{,}63\ V_{is}$ составляет величину ΔC = 3800 ÷ 6150 м/с. Верхняя граница фазовой скорости сгустка совпадает со скоростью детонации **(**Таблица 1**)**.

1,3,5-Тринитробензол, ТНБ $C_6H_3(NO_2)_3$.

Бесцветное кристаллическое вещество, почти не растворимое в воде, растворимое в некоторых органических растворителях. Более химически стабилен и более чувствителен к удару, трению, огню, чем тротил. Теплота взрыва 4.45 МДж/кг. Скорость детонации 7350 м/с при плотности 1,66 г/$см^3$ (заряд диаметром 20мм в бумажной оболочке). Расчёты показывают, что экспериментальное значение скорости детонации ТНБ соответствует верхней границе диапазона существования солитонного сгустка [C^*(2,68 эв), CH^+], который возник в диапазоне скоростей $\Delta C = V_{is} \div 1{,}63\ V_{is}$ за счёт ионов CH^+ и электронов, связанных с заселением метастабильного терма углерода с энергией E = 2,68 эв. Также возможно, что такой же сгусток [N^*(3,58 эв), O^+] возникает за счёт ионов кислорода O^+ при заселении метастабильного терма азота N^*(3,58 эв) **(**Таблица 1**)**. Таким образом, увеличение теплоты взрыва у ТНБ по сравнению с ДНБ привело к заселению следующего более высокого метастабильного терма и соответствующему увеличению скорости детонации.

Тротил, $C_6H_2(NO_2)_3CH_3$.

Скорость распространения волны детонации для тротила в литературе обычно указывается в области 6700 м/с (плавленый) и 7000 м/с (монокристалл). Тротил имеет сильно выраженный отрицательный кислородный баланс. При его взрыве образуется много окиси углерода (CO), а также свободного углерода (C) в виде копоти. Теплота взрыва тротила составляет ~ 10 эв на одну молекулу, что значительно выше, чем у тетранитрометана, что позволяет заселять более высокое метастабильное состояние N^*(2,38эв), а возможно и терм C^*(2,68 эв). Известно, что разложение тротила при взрывчатом превращении происходит в соответствии с уравнением реакции:

$$C_6H_2(NO_2)_3CH_3 = 2{,}5\ H_2O + 3{,}5\ CO + 3{,}5\ C + 1{,}5N_2$$

Таким образом, в продуктах реакции присутствуют азот и углерод. Именно азот и углерод могут сформировать ионно-звуковые солитонные сгустки

[N^*(2,38эв), CH^+],

[C^*(2,68 эв), N^+],

[N^*(2,38эв), C^+]

и соответствующие близкие резонансные диапазоны в области скоростей ΔС = 4,15 ÷ 7,1 км/с. В состав тротила входит водород. Радикал CH^+ обладает низким потенциалом ионизации E_i = 10,9 эв. Поэтому его ионы могут преобладать в продуктах разложения и участвовать в формировании солитонного сгустка.

того вещества, а также условий эксперимента может реализоваться тот или иной сгусток с фазовой скоростью, обусловливающей скорость детонации. У чешуйчатых и гранулированных сортов тротила скорость распространения волны детонации ниже (D = 4,0 - 6,0 км/с).

В данном случае среда более рыхлая, удельное энерговыделение ниже, и солитонные сгустки [C^*(1,26 эв), O^+], [C^*(1,26 эв), N^+], [C^*(1,26 эв), C^+], формируются за счёт самого низкого метастабильного терма углерода C^*(1,26 эв) и ионов углерода, азота и кислорода. Наблюдаемые скорости детонации в тротиле 6700, 7000, 4000 ÷ 6000 м/сек соответствуют максимальным фазовым скоростям солитонных сгустков в продуктах реакции взрывного разложения тротила (Таблица 1).

Соединение	**Теплота взрыва (МДж/кг)**	**Скорость детонации м/сек**	**Солитонный сгусток**	**Фазовая скорость сгустка м/сек**
Тетранитрометан $C(NO_2)_4$	1,915	6400(в трубе)	O^*(1,97эв), C^+	3950 ÷ 6400
1,3-Динитробензол $C_6H_4(NO_2)_2$	3.43	6100 литой	O^*(1,97эв), CH^+	3800 ÷6150
1,3,5-Тринитробензол $C_6H_3(NO_2)_3$	4.45	7350	C^*(2,68 эв), CH^+ N^*(3,58 эв), O^+	4400 ÷ 7200 4600 ÷ 7500
Тротил C6H2(NO2)3CH3	4,23	6700, 7000 4000 ÷ 6000	N^*(2,38эв), CH^+ C^+ C^*(2,68 эв), N^+ C^*(1,26 эв), O^+ N^+ C^+	4150 ÷ 6800 4350 ÷ 7100 4250 ÷ 6900 2740 ÷ 4450 3000 ÷ 4900 3170 ÷ 5200
Тетрил $(NO_2)_3C_6H_2N(NO_2)CH_3$	4,61	7500	C^*(2,68 эв), C^+	4600 ÷ 7500
Нитрометан CH_3NO_2	4.76	6370 - 6600	O^*(1,97эв), C^+ N^*(2,38 эв), N^+	3950 ÷ 6400 4000 ÷ 6550
Гексоген $(CH_2)_3N_3(NO_2)_3$	5,4	8360	N^*(3,58 эв), CH^+	5100 ÷ 8350
Октоген $(CH_2)_4N_4(NO_2)_4$,	5,526	9100	NO^*(4,7эв), N^+	4600 ÷ 9150
Нитроглицерин $C_3H_5(ONO_2)_3$	6,535	7650 (7900) 8200 (в трубе) 8500 (в трубе)	O^*(3,15 эв), CH^+ O^*(3,15 эв), C^+ N^*(3,58 эв), C^+	4800 ÷ 7800 5000 ÷ 8150 5300 ÷ 8600
Нитрогликоль $(CH_2ONO_2)_2$	6,9	7200(в оболочке) 8300(в трубе) 9000 (твёрдый)	C^*(2,68 эв), CH^+ N^*(3,58 эв), CH^+ O^*(4,19 эв), CH^+	4400 ÷ 7200 5100 ÷ 8300 5500 ÷ 9000

Таблица 1

Тетрил, $(NO_2)_3C_6H_2N(NO_2)CH_3$

Мощное взрывчатое вещество, по взрывчатым характеристикам относится к вторичным (бризантным). Разложение тетрила при взрывчатом превращении происходит в соответствии с уравнением реакции:

$$C_6H_2(NO_2)_4NCH_3 = 2{,}5H_2O + 5{,}5CO + 1{,}5C + 2{,}5N_2$$

с тепловым эффектом 4,61 МДж/кг. Тетрил имеет четко выраженный отрицательный кислородный баланс. Скорость детонации — 7500 м/сек. Более высокая теплота взрыва, чем у тротила, позволяет заселить метастабильный уровень углерода C^*(2,68 эв). В результате формируется сгусток [C^*(2,68 эв), C^+] с максимальной фазовой скоростью 7500 м/сек, соответствующей скорости детонации D =7500 м/сек **(**Таблица 1**)**.

Нитрометан, CH_3NO_2.

В сравнении с тетранитрометаном (D = 6400 м/сек) нитрометан обладает немного большей удельной теплотой взрыва. Иногда указывается более высокая, чем в тетранитрометане скорость детонации до D = 6600 м/сек. В пересчёте на одну молекулу исходного вещества теплота взрыва составляет величину ~ 3,3 эв. Более высокая теплота взрыва в некоторых условиях позволяет заселить более высокий метастабильный терм N^*(2,38 эв). За скорость детонации нитрометана вероятно ответственны два солитонных сгустка, связанных с метастабильными термами кислорода и азота [O^*(1,97эв), C^+ **],** ΔC = 3950 ÷ 6400 м/сек, и [N^*(2,38 эв), N^+], ΔC = 4000 ÷ 6550 м/сек. Сгустки перекрывают диапазон скоростей 3950 ÷ 6550 м/сек **(**Таблица 1**)**.

Гексоген, $(CH_2)_3N_3(NO_2)_3$

Мощное вторичное (бризантное) взрывчатое вещество, бесцветный, нерастворимый в воде кристаллический порошок, плотность 1,82 *г/см*^{3}, при горении развивает температуру более 3000 °C. При сильном ударе или под действием капсюля-детонатора гексоген детонирует. Плотность заряда — 1,77 г/см^3, скорость детонации приблизительно равна D = 8360 м/сек, теплота взрыва 5,4 *Мдж/кг*. Гексоген при взрыве образует следующие продукты распада: $C_3H_6N_3(NO_2)_3 = 3H_2O + 3CO + 3N_2$. В этих продуктах возникает солитонный сгусток [N^*(3,58 эв), CH^+] с фазовой скоростью 5100 ÷ 8350 м/сек **(**Таблица 1**).** Скорость детонации совпадает с максимальной фазовой скоростью сгустка.

Октоген, $(CH_2)_4N_4(NO_2)_4$

Термостойкое бризантное взрывчатое вещество. Бесцветное кристаллическое вещество. Обладает высокой чувствительностью к удару. Теплота взрыва 5,7 МДж/кг. Скорость детонации D = 9100 м/с при плотности 1,84 г/см³. Скорость сгустка [NO^*(4,36), N^+] **(**Таблица 1**)**соответствует диапазону ΔC = 4600 ÷ 9150 м/с. Верхняя граница определяет скорость детонации D = 9100 м/с.

Нитроглицерин, $C_3H_5(ONO_2)_3$.

По известным данным скорость детонации нитроглицерина D=7650 м/с. Есть данные о зарегистрированной скорости детонации D =7900 м/сек, хотя при таких скоростях погрешности измерений достаточно велики и вероятно, что этот разброс скоростей находится в пределах погрешности измерений. В стальной трубе диаметром 35 мм скорость детонации составляет D=8000 ÷8200м/с. В стальной трубке диаметром 25мм скорость детонации D=8000 ÷ 8500 м/с. Кроме того известно, что в обычных условиях жидкий нитроглицерин часто детонирует в низкоскоростном режиме D=1100 ÷ 2000 м/с. Конечные продукты реакции определяются формулой:

$$C_3H_5(ONO_2)_3 = 2{,}5\ H_2O + 3\ CO_2 + 1{,}5\ N_2 + 0{,}25\ O_2$$

В пересчёте на одну молекулу исходного вещества теплота взрыва нитроглицерина составляет величину ~ 14 eV, что позволяет заселить более высокие метастабильные термы O^*(3,15 eV), N^*(3,58 eV). За скорости детонации нитроглицерина ответственны два солитонных сгустка, связанных с метастабильным термом кислорода [O^*(3,15 эв), CH^+], ΔC = 4800 ÷ 7800 м/сек, [O^*(3,15 эв),C^+], ΔC = 5000 ÷ 8150 м/сек, а также солитонный сгусток, связанный с метастабильным термом азота [N^*(3,58 эв), C^+], ΔC = 5300 ÷ 8600 м/сек **(**Таблица 1**).** Максимальные фазовые скорости указанных сгустков соответствуют скоростям детонации нитроглицерина.

Нитрогликоль, (CH2ONO2)2.

Скорость детонации нитрогликоля, помещённого в прочную стальную оболочку, D = 7200 м/с. Известно, что чем больше диаметр трубки и выше плотность оболочки, тем больше скорость детонации взрывчатого вещества. Это обстоятельство понятно, поскольку в прочной оболочке более длительное время происходит заселение метастабильных термов и успевают заселиться более высокие термы, обеспечивающие большую фазовую скорость сгустка. В стальной трубе диаметром 35 мм скорость детонации D= 8300м/с. В твёрдом состоянии нитрогликоля скорость детонации достигает 9000м/с. В пересчёте на одну молекулу исходного вещества теплота взрыва составляет величину ~ 11 eV. В нитрогликоле в указанных выше различных условиях соответственно заселяются метастабильные термы C^*(2,68 эв), N^*(3,58 эв),O^*(4,19 эв). В этих условиях детонация нитрогликоля связана с солитонными сгустками [C^*(2,68 эв),CH^+], ΔC =

4400 ÷ 7200 м/с; [N^*(3,58 эв),CH^+], ΔС = 5100 ÷ 8300м/с; [O^*(4,19 эв),CH^+] ΔС = 5500 ÷ 9000 м/с (Таблица 1). Таким образом, как и в случае с простейшей кислородно- водородной смесью а также другими газовыми смесями, скорости детонации рассмотренных взрывчатых веществ совпадают с максимальными фазовыми скоростями ионно – звукового солитонного сгустка в газообразных продуктах в последних фазах разложения.

МАЛОСКОРОСТНОЙ РЕЖИМ ДЕТОНАЦИИ НИТРОСОЕДИНЕНИЙ

Известно, что в некоторых условиях наблюдается малоскоростная детонация нитросоединений. Например, нитроглицерин может детонировать в диапазоне D=1100 ÷ 2000 м/с. Нитрогликоль в небольшом количестве, при слабой оболочке и слабом детонаторе может детонировать в низкоскоростном режиме со скоростями D = 1000 ÷3000 м/с. Это может происходить при малом удельном энерговыделении, когда продуктами разложения на стадии детонации являются не только атомы химических элементов, из которых состоит взрывчатое вещество, но и молекулы. С точки зрения нелинейной ионно – звуковой модели низкая скорость детонации D ~ 1000 м/сек может возникать только при малых энергиях электронных групп вблизи фронта ударной волны, которые обеспечивают малую фазовую скорость солитонного сгустка. В нитросоединениях образование такой группы электронов происходит за счёт реакции ионизации молекулы окиси азота при столкновении двух возбуждённых на метастабильный уровень молекул

NO($a^4\Pi$). Эти метастабильные термы молекулы имеют достаточно высокую энергию возбуждения, однако могут легко заселяться за счёт ступенчатого возбуждения при столкновениях молекул с электронами. Столкновения двух возбуждённых на метастабильный уровень молекул NO($a^4\Pi$) достаточно для ионизации молекулы и образования группы электронов, обеспечивающей малую фазовую скорость солитонного сгустка.

$$NO^*(4{,}7\text{ эв}) + NO^*(4{,}7\text{ эв}) \rightarrow NO^+ + NO + (0{,}136\text{ эв})$$

Диапазон скоростей детонации 1÷1,8 км/сек могут обеспечить солитонные сгустки, образованные при участии электронов с энергией Е = 0,136 эв и целого ряда атомных и молекулярных ионов, образованных при разложении нитросоединения (Таблица 2). Более высокие скорости детонации D = 2÷3 км/сек связаны с термом $O_2(a^1\Delta_g)$, обеспечивающим существование группы электронов с с энергией Е= 0,98 эв и тяжёлыми ионами азота и двуокиси азота (Таблица 2).

Энергия электронов эв	**ион**	**Фазовая скорость сгустка км/сек**
0,136	NO^+	0,66 ÷ 1,07
	N_2^+	0,69 ÷1,1
	N^+	0,96 ÷ 1,57
	CH^+	0,99 ÷ 1,62
	C^+	1,1 ÷ 1,8
0,98	NO_2^+	1,43 ÷ 2,3
	N_4^+	1,29 ÷ 2,11
	N_3^+	1,5 ÷ 2,43
	N_2^+	1,83 ÷ 2,98

Таблица 2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование показало, что:

- детонационная волна является ионно – звуковой ударной волной;
- скоростные пределы детонации в жидких и твёрдых взрывчатых веществах обусловлены возникновением нелинейных динамических плазмен-

ных резонансов в газообразных продуктах разложения;

- передним фронтом детонации взрывчатых веществ является ионно-звуковой солитонный сгусток;
- скорость детонации совпадает с максимальной фазовой скоростью ионно – звукового солитонного сгустка;
- различные скорости детонации взрывчатых веществ соответствуют структуре диапазонов нелинейного взаимодействия в плазме в продуктах разложения;
- малоскоростная детонация нитросоединений вызвана с существованием солитонных сгустков, имеющих низкую фазовую скорость и связанных с заселением метастабильных молекулярных термов NO($\alpha^4\Pi$) и $O_2(a^1\Delta_g)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.Л.Серов, И.П.Явор. Волны заряда в ионизованном газе перед гиперзвуковым телом. ЖТФ, т. 66, в. 11, 1996, стр.181-186.
2. Yu.L.Serov. Experimental Investigation of a Supersonic Sphere Motion in Plasma on Ballistic Apparatus. Proc. 2nd Weakly Ionized Gases Workshop, Norfolk,1998, pp.32-45.
3. Г.И.Мишин, Ю.Л.Серов, И.П.Явор. Обтекание сферы при сверхзвуковом движении в газоразрядной плазме. Письма в ЖТФ,т.17, в.11,1991, стр.65-71.
4. V.A.Pavlov, Yu.L.Serov. Supersonic Motion of a Body in Weakly Ionized Plasma: Phenomena of Trans-Ion- Acoustic Plasma Dynamics. 3rd Weakly Ionized Gases Workshop, Norfolk, 1999, AIAA-99-4852.
5. В.А.Павлов. Ионно-звуковой эффект лошади Хьюстона. Физика плазмы, 2000. Т. 26, №6, с. 543-547.
6. Ю.Л.Серов. Ионно-звуковая модель неустойчивости сильных ударных волн. “Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент", Казань- Дайтона-Бич, №2(18), т.9, 2004, стр.42-55.
7. Pavlov V.A. Influence of supersonic ion clusters on the plasma neutral component. International. Journal of Geomagnetism and Aeronomy. 2007. Vol. 7, GI 1006, doi 10.1029/2005 GI 1000120.
8. Pavlov V.A., Weakly ionized plasma in a supersonic plasma flow, Plasma Physics Reports, V.28, №2, p.479, 2002.
9. А.Е.Булышев, Н.Г.Преображенский, А.Е.Суворов, В.И.Яковлев. О механизме ионизации перед фронтом ударной волны в аргоне. Новосибирск: ИПТМ, 1976, 6, с. 19-20.
10. В.И. Демидов, Н.Б. Колоколов. Элементарные процессы с участим метастабильных атомов в плазме инертных газов.- В сб. Метастабильные состояния атомов и молекул и методы их исследования:- Чебоксары:1979, вып.2, с. 41-68.
11. Ю.Л.Серов. ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЗОНАНСЫ В ИОНИЗОВАННЫХ, РЕАГИРУЮЩИХ И ДЕТОНИРУЮЩИХ СРЕДАХ. Актуальные проблемы Российской космонавтики. Материалы XXX академических чтений по космонавтике. Москва, январь 2006г., под общей редакцией А.К. Медведевой. М., Комиссия РАН, стр. 133-134.
12. V.A.Pavlov, Yu.L.Serov. PLASMA MODEL OF DETONATION – I: THEORETICAL DESCRIPTION OF PLASMA DETONATION. Proc. of 7th Workshop on Magneto- Plasma Aerodynamics. Moscow, Russia, March 27-29, 2007.
13. V.A.Pavlov, Yu.L.Serov. PLASMA MODEL OF DETONATION – II: Nonlinear interaction and limits of propagation of a detonation in combustible gas mixtures. Proc. of 7th Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics. Moscow, Russia, March 27-29, 2007.
14. ЮЛ.Серов. Плазменная модель детонации: влияние ионного состава среды на структуру детонации смесей горючих газов. Актуальные проблемы Российской космонавтики. Материалы XXXII академических чтений по космонавтике. Москва, январь 2008г., под общей редакцией А.К. Медведевой. М., Комиссия РАН, стр. 158-159.
15. V.A.Pavlov, Yu.L.Serov Nonlinear Resonant Interaction of Strong Shock Waves with Plasma. "ATMOSPHERE, IONOSPHERE, SAFETY" AIS-2008, Proc. 3d International Symposium on Unconventional Plasmas (ISUP-08), Kaliningrad, July 7-12, 2008, pp.111-117.
16. Ю.Л.Серов. Детонация смесей метана, пропана, ацетилена с кислородом как проявление нелинейных динамических свойств плазмы. CD, V Школа-конференция “Актуальные проблемы теплофизики и физической гидрогазодинамики.“ Алушта, 24 – 30 сентября 2007 г.