

ФОТОРЕЗОНАНСНАЯ ПЛАЗМА ВО ФРОНТЕ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ

*А.И. Шимко, канд.техн.наук, В.А. Батулин, канд.физ.-мат. наук.
Институт прикладной физики Национальной академии наук Украины
г. Сумы.*

В работе предложена гипотеза физической модели процессов во фронте детонационной волны. Высказано предположение, что в переходном слое фронта взрывчатого вещества существует в виде свободных периодически расположенных атомов и ионов. В результате резонансного взаимодействия атомов с гиперзвуковыми и электромагнитными волновыми пакетами газ резонансно ионизируется, а плазма структурируется и приобретает сверхпроводящие свойства. В зоне реконструкции ионы вступают в быстрые химические реакции с образованием активированного комплекса, которые диссоциируют, а ионы вновь вступают в медленные химические реакции с образованием низкотемпературной плазмы и продуктов взрыва.

В физической модели взрыва, описываемой гидродинамической теорией, детонация рассматривается как процесс сверхзвукового распространения фронта химического превращения по веществу [1,2]. Ведущая роль в процессе детонации отводится ударной волне. В зоне химических превращений протекают релаксационные процессы выделения энергии активации, химической энергии и установления термодинамического равновесия. Продукты взрыва представляют собой высокоионизированную низкотемпературную плазму, оптическая плотность которой настолько велика, что большая часть электромагнитного излучения оказывается заперта. Сечение ионизации в тепловых столкновениях высоковозбужденных атомов составляет $\sim 10^{-12}-10^{-13}$ см², сравнимо с сечениями процессов фотоионизации и хемоионизации. В [3] указывается, что в низкотемпературной плазме потенциальная энергия, запасенная в возбужденных состояниях, на несколько порядков превосходит энергию электронного газа, и вероятность хемоионизации достаточно велика. Реакции хемоионизации являются одним из эффективных каналов образования молекулярных ионов.

В данной работе предпринята попытка сформулировать гипотезу и обозначить круг явлений во фронте детонационной волны с позиций атомной физики, квантовой механики и квантовой химии.

Плоскость разрыва в структуре детонационного фронта следует рассматривать как слой конечной толщины, в котором протекают начальные процессы физической перестройки взрывчатого вещества. В настоящее время недостаточно теоретических и экспериментальных данных для изучения таких быстрых во времени и коротких в пространстве процессов, характерных для фронта детонационной волны, которые граничат с пределами разрешения диагностической аппаратуры (фемтосекундный диапазон) и принципами квантовой механики. Поэтому некоторые явления и процессы в предложенной физической модели детонации сформулированы в виде постулатов:

- в процессе детонации взрывчатого вещества генерируются ультразвуковые, гиперзвуковые и электромагнитные волновые пакеты – квазичастицы, взаимодействующие с квантовыми состояниями взрывчатого вещества и атомов резонансно.

- развитие детонационного процесса начинается с газообразного состояния взрывчатого вещества с периодическим расположением в пространстве свободных атомов с исходной неравновесностью;

В начальный момент детонации во взрывчатых веществах протекают процессы, приводящие их структуру к одному агрегатному состоянию. Таким состоянием для газовых, жидких и твердых взрывчатых веществ является периодическое расположение в пространстве свободных, невзаимодействующих атомов и молекул. Для твердого вещества это квазигаз с плотностью частиц равной плотности исходного твердого тела с разрушенными кристаллическими связями и компенсированными колебаниями решетки. В жидких взрывчатых веществах разрушены ван-дер-ваальсовы и химические связи, а атомы выстроены в периодическую структуру. В газовых взрывчатых веществах разрушены молекулярные связи, а свободные атомы выстроены в периодическую структуру квазирешетки с характерным периодом, близким к длине свободного пробега атомов газа. Такие процессы в детонирующих взрывчатых веществах протекают при взаимодействии с гиперзвуковыми и электромагнитными волнами, объединенными в волновые пакеты (квазичастицы), рассматриваемых как идеальный газ [4]. Квазичастицы имеют конечное время жизни. При движении из зоны химических реакций к границе исходного взрывчатого вещества квазичастицы - гиперзвуковые волновые пакеты, взаимодействуя между собой как волны и корпускулы, интерферируют и выстраиваются в плотноупакованную периодическую структуру, характерную для данного взрывчатого вещества.

Во фронте детонационной волны взаимодействие ультразвуковых волн, генерируемых в зоне химических реакций при восстановлении электронной конфигурации и объема атомов и молекул, с квантовыми состояниями кристаллических связей носит резонансный характер [5], поэтому частицы не

разлетаются. Разрушение кристаллических твердых тел под воздействием гиперзвуковых волн первоначально идет по дефектам кристаллической структуры. Высокочастотные составляющие спектра гиперзвуковых волновых пакетов производят более мелкое дробление. В пределе самыми высокими частотами гиперзвуковых волн разрушаются кристаллические и химические связи монокристалла и твердое вещество (конденсированная среда) превращается в систему плотного атомарного газа, повторяющего кристаллическую решетку исходного взрывчатого вещества – квазирешетка газа. При этом компенсируются связьюобразующие дипольные моменты, а потенциальная функция свободных атомов (ионов) становится чисто сферической, что обуславливает квантовое, по сути, движение атомов идеального газа к структурному порядку. Изначальная неравновесность кристаллов не нарушается, а в газовых и жидких взрывчатых веществах она приобретает в результате диссоциации молекул и структуризации газа.

В твердых взрывчатых веществах волновые пакеты совмещаются с узлами кристаллической решетки исходного вещества так, что волновые пакеты – квазичастицы – сразу же оказываются на дне потенциальных ям атомов. Электромагнитные волновые пакеты резонансно взаимодействуют с атомными электронами, в результате чего электрон переходит в состояние с кинетической энергией $E_e \approx 0$, т.е. на поверхность Ферми, образуя холодную фоторезонансную плазму. Скачком уходят все электроны с оболочки одновременно, т.к. они изоэнергетичны. Под резонансным взаимодействием электромагнитных волн и атомных электронов во фронте детонационной волны следует понимать переход электрона по всем энергетическим состояниям, определяемым главным квантовым числом n , в результате чего генерируется волновой пакет всего энергетического спектра. Так как с одним и тем же значением n на орбите может находиться определенное (ограниченное) число электронов, несущественно отличающихся по частоте, то и результирующий волновой пакет оболочки оказывается сложным образом зависим от других квантовых состояний (азимутальное, радиальное, магнитное, спин). Но однажды сформировавшись, такой волновой пакет остается резонансным на все время процесса детонации. Скачком изменяется и объем атома [6]. Объемные состояния атома дискретны, взаимодействуют только с соответствующими квазичастицами объемных волновых пакетов. Одним из признаков резонансного взаимодействия является повышение концентрации и снижение температуры электронов, что связано с увеличением эффективности ионизации под действием резонансного излучения. Дальнедействующие кулоновские силы свободных ионов способствуют структуризации детонационной плазмы.

При резонансном взаимодействии высокочастотной части электромагнитных волновых пакетов с квантовыми состояниями электронов в атомах взрывчатого вещества образуется плазменная среда [7], в которой ядра практически неподвижны (в пределах времен нулевых колебаний), а электроны свободны и обладают кинетической энергией, близкой нулю – внутренняя фоторезонансная ионизация. Такие электроны в холодной плазме взаимодействуют друг с другом через фононы кристаллической решетки и образуют куперовские пары [8]. Куперовские пары движутся по кристаллу без сопротивления, потому что их движение согласовано, когерентно, а единая волновая функция куперовских пар распространяется на всю длину сверхпроводящей зоны. Поэтому отдельные пары не рассеиваются на ионах решетки. Плазма приобретает свойства сверхпроводимости, сверхтекучести и сверхупругости, а в энергетическом спектре электронов между уровнем Ферми и дном зоны проводимости появляется энергетическая щель, которая является характерным признаком сверхпроводимости.

Известно, что в такой среде любые возмущения распространяются со скоростью Ферми, а волновые пакеты – без дисперсии и диссипации. В зоне реконструкции куперовские электроны распариваются, излучая фононы, а холодная плазма теряет сверхпроводящие свойства, оставаясь холодной, и только с образованием активированных комплексов начинается разогрев плазмы. Слой сверхпроводящей фоторезонансной плазмы с обеих сторон поверхности ограничен Ферми-поверхностью как единая частица Ферми-конденсата. При любой, не равной нулю температуре в сверхпроводящей плазме имеются носители тока двух видов – куперовские пары и отдельные свободные электроны. Теплые электроны (проводимости) обмениваются энергией с «холодными» и за время одного-двух соударений их энергии выравниваются. В холодной плазме, образованной взаимодействием структурированных атомов с резонансными волновыми пакетами, узлы квазирешетки совершают нулевые колебания, разрешенные принципом Паули.

Восстановление атомов начинается в головной части зоны химических реакций с распада куперовских пар и последующей реконструкции объема атомов.

Близко расположенные ионы в зоне реконструкции образуют друг с другом неустойчивые квазимолекулы с обобществлением согласно принципу Паули L – электронов обоих атомов в единую систему, в которой электроны занимают орбиты вокруг обоих ионов, еще более сближая положительные ядра (быстрые химические реакции). Исходное и конечное состояние химических превращений реагентов в продукты разделяют короткоживущие (10^{-10} - 10^{-13} с) квазимолекулы [9], имеющие промежуточные характеристики между их значениями для реагентов и продуктов. При движении вдоль пути реакции реализуются состояния переходных конфигураций. Они и определяют динамику реакции. Переход химической системы из начального состояния (реагента) в конечное (продукты) протекает через образование активированного комплекса.

Быстрые химические реакции формируют ультразвуковые и гиперзвуковые волны, близкие по частоте с кристаллическими связями, фононами кристаллической решетки, колебательными состояниями

молекулярных связей, дефектами структуры. При быстрых химических реакциях одновременно с излучением объемных квантов, генерируемых при образовании неустойчивых молекул, излучаются электромагнитные волны заселения больших (общих) орбит квазимолекул. Гиперзвуковые волны в этой зоне существуют как индивидуально, так и образуют многопереходные волновые пакеты, которые, в свою очередь, могут соответствовать как простым (одноатомным), так и сложным (многоатомным) квазичастицам. Квазимолекулы активированного комплекса неустойчивы и диссоциируют на составляющие ионы с захватом «своих» электронов на законные L – орбиты атомов с понижением химической активности и сопровождаются излучением электромагнитных, ультра- и гиперзвуковых волн. Волновые пакеты - квазичастицы объемных и электромагнитных волн, состоящие из квантов переходов ультрафиолетового и рентгеновского диапазона, рождаемые внутри сверхпроводящей зоны, имеют размеры, значительно меньше длины когерентности пар, поэтому свободно могут распространяться к зоне деструкции, не переходя за границу среды. Более длинноволновые волновые пакеты, характерные для молекулярных и кристаллических связей, генерируемые в зоне химических реакций, находятся в инфракрасном диапазоне длин волн, которые существенно больше длины когерентности. Поэтому на границе сверхпроводящей зоны ультразвуковые волновые пакеты воздействуют на конденсат куперовских пар электронов как на сплошную сверхупругую и сверхжесткую среду, передавая возмущение невозмущенной среде через конденсат с предельной скоростью без дисперсии и диссипации. Электромагнитные волны из зоны химических реакций на границе сверхпроводящей среды претерпевают полное отражение.

Релаксационные процессы медленных химических реакций формируют свои волновые пакеты, спектр частот которых достаточен для разрушения кристаллических и молекулярных связей и ионизации свободных атомов. В зоне продуктов взрыва протекают в основном обменные процессы, диссоциация, ионизация. Причем процесс имеет ступенчатый характер хемоионизации, так как столкновительной энергии недостаточно для прямой ионизации.

Для иницирования физических процессов взрыва используется детонатор, который формирует более высокочастотные волновые пакеты, способные полностью ионизировать атомы основного взрывчатого вещества вплоть до голого ядра. Поскольку в зоне химических реакций генерируются более низкочастотные волновые пакеты, то и в цепное развитие детонации вовлекаются электроны внешних оболочек, а волновые пакеты основных электронных состояний не размножаются и новых цепей не порождают. Первоначально из шумового спектра быстрых и медленных химических реакций образовавшиеся электромагнитные волны воздействуют на неструктурированный атом и ионизируют его наружную оболочку. В зоне быстрых химических реакций при рекомбинации образуются гиперзвуковые волновые пакеты, которые в детонационной плазме интерферируют и структурируются в периодическую решетку и далее включаются в общую схему цепной реакции. При этом первичные электронно-ядерные струи образованные детонатором, не размножаются (нет источников генерации электромагнитных квантов энергии с частотами основных состояний).

Быстрые и медленные химические реакции являются дополнительным источником ультразвуковых, гиперзвуковых и электромагнитных волн, обеспечивающих цепной характер детонации. Эти кванты могут быть как резонансными, так и нерезонансными, но обязательно ионизирующими. Освободившиеся электроны могут не образовывать куперовские пары (слишком велик избыток энергии по сравнению с энергией куперовских фононов), но способствуют увеличению общей проводимости среды. Увеличение концентрации свободных электронов в зоне проводимости приводит к увеличению плазменной частоты [10]. При концентрации электронов близкой к критической происходит резкое изменение постоянной затухания и фазовой постоянной электромагнитных волн, а также коэффициента отражения от границы раздела сред.

Вышерассмотренная гипотетическая модель физических процессов позволяет утверждать [11], что структуру детонационного фронта составляют: зона деструкции, в которой происходит охлаждение атомов, разрушение кристаллических связей, структурирование и ионизация свободных атомов; сверхпроводящая зона, которая состоит из высокоионизированной структурированной фоторезонансной плазмы; зоны реконструкции - восстановление объемов атомов, образование неустойчивых квазимолекул (активированных комплексов), их диссоциация и восстановление атомарных ионов. В зоне медленных химических реакций образуются устойчивые молекулы, протекают релаксационные процессы, устанавливается термодинамическое равновесие, формируется плоскость Чепмена-Жуге.

Зона деструкции, сверхпроводящая зона и зона быстрых химических реакций образуют переходной слой (слой разрыва) или собственно фронт детонационной волны, в котором и протекают все подготовительные процессы детонации.

Подводя итог вышесказанного, коротко можно сформулировать основные выводы:

1 Ведущую роль в детонационных процессах играют волновые пакеты-квазичастицы ультразвуковых, гиперзвуковых и электромагнитных волн.

2 Во фронте детонационной волны формируется высокоионизированная фоторезонансная структурированная сверхпроводящая плазма, обладающая сверхупругостью границ. Наряду с куперовскими электронами в такой плазме существуют холодные ионы и охлажденные электроны зоны проводимости, а плазма описывается законами квантовой механики.

3 В зоне продуктов взрыва в результате столкновительной хемоионизации образуется и поддерживается классическая плотная низкотемпературная плазма, подчиняющаяся законам гидродинамики, термодинамики и газодинамики.

SUMMARY

In work the hypothesis of physical model of processes in front of a detonation wave is offered. The assumption is stated that in a transitive layer of front the explosive substance exists as the free periodically located atoms and ions. As a result of resonant interaction of atoms with hypersonic electromagnetic wave packages gas ionization of resonance, and the plasma is structured and gets superconductivity of property.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баум Ф.А, Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др. Физика взрыва. – М.: Наука, 1975. – 704с.
2. Дремин А.А., Савров С.Д., Трофимов В.С. и др. Детонационные волны в конденсированных средах. – М.: Наука, 1970. – 164с.
3. Ключарев А.Н. Процессы хемоионизации//УФН. – 1993. – Т.163, Вып. 6. – С.39.
4. Авербух И.Ш., Перельман Н.Ф. Динамика волновых пакетов высоковозбужденных состояний атомов и молекул// УФН. – 1991. – Т.161, Вып.7. – С.41.
5. Акулин А.М., Карлов Н.В. Интенсивные резонансные взаимодействия в квантовой электронике. – М.: Наука, 1987. –312с.
6. Савич П., Кашанин Р. Поведение материалов при высоких давлениях Пер. с англ. - Киев: Наукова думка, 1976. – 263с.
7. Бетеров И.М., Елецкий А.В., Смирнов Б.М. Плазма резонансного излучения (фоторезонансная плазма)// УФН. – 1988.– Т.155, Вып. 2. – С. 265.
8. Шриффер Дж. Теория сверхпроводимости. Пер. с англ. – М.: Наука. 1970. –312с.
9. Краков Б.Г., Парилис Э.С. Квазимолекулы// УФН. – 1989. – Т.157, Вып.3. – С. 477.
10. Спитцер Л. Физика полностью ионизованного газа. Пер. с англ. – М.: Мир, 1965. –212с.
11. Шимко А.И., Батурин В.А. Гипотетическая структура детонационного фронта // Вісник СумДУ. – 2004. – №8 (67). С.– 84.

Поступила в редакцию 14 ноября 2005 г.