

## СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ В ГИПОТЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФРОНТА ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ

*А.И. Шимко, канд. техн. наук, старший научный сотрудник;  
В.А. Батулин, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник  
Институт прикладной физики НАН Украины, ул. Петропавловская, 58,  
г. Сумы, 40030  
E-mail: [ipfmail@ipfcentr.sumy.ua](mailto:ipfmail@ipfcentr.sumy.ua)*

*В статье развивается высказанная ранее гипотеза существования во фронте детонационной волны сверхпроводящего слоя, обладающего свойствами сверхжесткой и сверхупругой оболочки. Анализируются некоторые характерные эксперименты по исследованию детонационного фронта с точки зрения предложенной квантовой модели.*

### ВВЕДЕНИЕ

Согласно существующей физической модели взрыва [1,2], описываемой гидродинамической теорией, детонационная волна инициируется и поддерживается ударной волной. В ударной волне взрывчатое вещество сжимается и нагревается до высоких температур, обеспечивающих вспышку взрывчатого вещества, переходящую в детонацию. Детонационная волна как комплекс химического превращения взрывчатого вещества распространяется со сверхзвуковой скоростью. Классическая гидродинамическая теория постулировала, что во фронте ударной волны химические реакции протекают столь быстро, что на фронте достаточно медленных релаксационных процессов установления термодинамического равновесия не оказывают определяющего влияния на развитие и распространение детонации. Экспериментально было установлено, что взаимодействие фронта ударной волны с последующей областью самовоспламенения приводит к сложным нестационарным гидродинамическим процессам, которые не подчиняются гидродинамическому описанию. Многие расчеты процессов детонации в настоящее время затруднены из-за отсутствия достоверных сведений (в частности конденсированных) об уравнении состояния как исходных взрывчатых веществ, так их продуктов детонации и взрыва, кинетики промежуточных химических реакций.

Предельные времена детонационных процессов, которыми оперируют классические теории, ограничиваются длительностями  $10^{-8}$ - $10^{-10}$ с характерными для молекулярных переходов и термодинамических релаксационных процессов. Для детонационных процессов характерны существенно меньшие времена и квантовые процессы имеют большую вероятность. Однако до настоящего времени предпочтение отдается термодинамическому подходу и механизму быстрого сгорания частиц в ударной волне. Необъясним до сих пор и механизм поддержания интенсивности ударной волны за счет возмущений, возникающих в зоне химических реакций и распространяющихся через движущуюся со сверхзвуковой скоростью границу.

В данной работе предпринята попытка объяснить физические явления, протекающие во фронте детонационной волны, с позиций квантовой механики. При этом приняты следующие допущения:

- а) все взаимодействия ультразвуковых и электромагнитных волновых пакетов, ведущих детонацию, носят резонансный характер;
- б) в результате резонансного взаимодействия образуются свободные атомы и холодные электроны, которые объединяются в куперовские

пары;

в) куперовские пары в «плоскости разрыва» образуют сверхпроводящий слой, ограниченный Ферми-поверхностью и обладающий сверхжесткостью и сверхупругостью.

Целью работы является описание физических процессов при формировании детонационной волны с учетом сверхпроводимости в слое разрыва.

В статье приводится обоснование существования сверхпроводящего слоя во фронте детонационной волны и его роли в развитии процесса детонации.

### МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В предложенной ранее [3] гипотезе физической модели фронта детонационной волны постулировано, что в процессе детонации взрывчатого вещества генерируются ультразвуковые, гиперзвуковые и электромагнитные волновые пакеты, взаимодействующие с квантовыми состояниями кристаллической решетки взрывчатого вещества и свободных атомов резонансно, а развитие детонационного процесса начинается с газообразного состояния взрывчатого вещества с периодическим расположением в пространстве свободных атомов и сохранением исходной энергетической неравновесности.

В рассматриваемой гипотетической модели ведущая роль отводится ультразвуковым (УЗВП) и электромагнитным волновым пакетам (ЭМВП). Они охлаждают кристаллическую решетку, разрушают кристаллические и молекулярные связи, превращая твердое тело или жидкость в идеальный газ. Симметризация потенциальных функций свободных атомов и их взаимодействие способствует движению атомов к структурному порядку и плотной упаковке. Источником УЗВП являются быстрые химические реакции с образованием неустойчивых квазимолекул активированных комплексов, а также медленные химические реакции и горячие продукты взрыва. При этом электроны молекулярных связей занимают общие орбиты, образуя агрегаты значительно больших объемов, чем атомы, и создавая избыточное давление в газе (упругая компонента). Разрушение активированных комплексов создает разрежение. Оба эти процесса формируют УЗВП, длина волны которых больше межатомного расстояния в среде. Взаимодействия УЗВП и ЭМВП с твердым телом, молекулами и атомами носят резонансный характер.

Под резонансным взаимодействием электромагнитных волн и электронов атомных оболочек во фронте детонационной волны (ФДВ) понимается последовательный переход электрона по всем энергетическим состояниям, определяемым главным квантовым числом  $n$ , в результате чего генерируется волновой пакет всего энергетического спектра [4]. Все электроны одной оболочки формируют свой волновой пакет, и он остается неизменным на протяжении всего процесса детонации.

При резонансном взаимодействии волнового пакета с атомным электроном, находящимся в основном состоянии, электрон переходит на поверхность Ферми с нулевой кинетической энергией, последовательно проходя по всем  $n$  от 1 до  $\infty$ . Ширина резонанса (ширина волнового пакета) с переходом электрона из основного состояния на уровень Ферми не больше максимальной частоты нормальных колебаний кристаллической решетки (дебаевских фононов), и именно они определяют ширину энергетической щели и вероятность спаривания холодных электронов.

Тепловое движение в кристалле, содержащем  $N$  атомов ( $3N$  степеней свободы), описывается набором  $3N$  независимых гармонических осцилляторов - фононов, каждый из которых обладает одним из  $3N$  (по

числу степеней свободы) значением частот нормальных колебаний. Количество нормальных фононов всегда равно  $3N$ , а количество холодных электронов пропорционально степени ионизации.

При традиционном охлаждении кристаллической решетки в криогенной жидкости до низких температур излученные кристаллической решеткой фононы поглощаются внешним термостатом, не излучающим фононы обратно. Процесс дрейфа фононов идет в одну сторону – в сторону внешнего термостата. При охлаждении решетки длина свободного пробега фононов увеличивается, достигая максимума при  $T=0$ , приближаясь к длине волны нулевых колебаний.

Бардин, Купер и Шриффер показали [5], что при низких температурах образуются связанные пары электронов (куперовские пары). Пары образуются в результате взаимодействия электронов с фононами (квантами тепловых колебаний решетки) и представляют собой бозон. Бозоны склонны накапливаться в основном энергетическом состоянии, из которого их сравнительно трудно перевести в возбужденное состояние. Следовательно, куперовские пары, придя в согласованное движение, остаются в этом состоянии неограниченно долго, что и определяет время жизни куперовских пар в основном состоянии. Холодные электроны фоторезонансной плазмы также взаимодействуют друг с другом через тепловые фононы и образуют куперовские пары. Плазма приобретает свойства сверхпроводимости, сверхтекучести и сверхупругости. Куперовские пары в составе сверхпроводящей плазмы описываются единой волновой функцией, а сверхтекучий конденсат ведет себя подобно одной квантово - механической частице. Процесс спаривания электронов протекает с поглощением фонона. Уровень Ферми своего положения на энергетической шкале не изменяет, вплотную примыкая к верху дискретной зоны. Дно зоны проводимости поднимается на величину энергии поглощенного фонона, образуя энергетическую щель. При комнатной температуре ширина энергетической щели (энергия фонона связи в паре) равна  $\Delta \cong 10^{-3} \cdot 10^{-4}$  эВ. Кристаллическая решетка как источник фононов охлаждается. Максимальная энергия фонона определяется соотношением  $\hbar\omega_{\mp} = k\theta$ , где  $\hbar$  - постоянная Планка;  $k$  - постоянная Больцмана;  $\theta$  - температура решетки. Поэтому участвовать в образовании куперовских пар в сверхпроводнике могут лишь те электроны, которые занимают энергетические уровни в слое шириной  $\sim k\theta$  вблизи поверхности Ферми. Установлено, что только очень малая часть электронов ( $kT_0/E_F \cong 10^{-3}$ , где  $E_F$  - энергия Ферми;  $T_0$  - температура фазового перехода) при традиционном охлаждении спариваются.

В сверхпроводниках, полученных глубоким охлаждением материала, при приближении температуры к абсолютному нулю количество фононов уменьшается, а вероятность спаривания увеличивается. Эти закономерности наблюдаются одновременно и приводят к тому, что возникает дефицит колебательных фононов для спаривания. Для описания целостности процесса было введено понятие виртуального фонона. Реальный фонон может существовать неограниченное время, а виртуальный - обязан исчезнуть после своего появления, спустя время  $\Delta t$ , которое зависит от энергии  $\Delta E$  по соотношению неопределенностей  $\Delta E \cdot \Delta t < \hbar$ . Эффективная длина волны виртуального фонона порядка  $\lambda_{\phi} \cong \hbar/P_F \cong 10^{-8}$  см, где  $P_F$  - импульс Ферми. При резонансной фотоионизации в детонационной волне [6] реальные фононы кристаллической решетки существуют всегда и генерируются исходным взрывчатым веществом перед фронтом. Они поглощаются спаривающимися электронами и охлаждают кристаллическую решетку, а

затем при распаривании куперовских электронов фононы нагревают газ зоны медленных химических реакций. В детонирующих веществах охлаждение атомов кристаллической решетки идет во фронте зоны деструкции, а фононы колебаний решетки поступают в зону деструкции из теплого исходного взрывчатого вещества. Холодные электроны генерируются в процессе фоторезонансного взаимодействия электромагнитных волновых пакетов с электронами атомов.

Согласно макроскопической теории сверхпроводящий фазовый переход описывается комплексным параметром порядка  $\psi = |\psi| e^{i\chi(r,t)}$ , играющим роль волновой функции куперовских пар электронов. Функция  $\psi$  рассматривается как макроскопическая характеристика, описывающая не только одну частицу, но и сверхпроводник в целом. Фаза  $\chi(r,t)$  является когерентной и сохраняет фиксированное значение в разных точках образца  $r_1, r_2$ , в том числе отдаленных одна от другой на макроскопическое расстояние, а также в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ , отдаленных макроскопическими промежутками, т.е. движение их является строго скоррелированным на макроскопически больших масштабах, а весь ансамбль электронов, образующих сверхтекучий конденсат, ведет себя подобно одной квантово-механической частице. Куперовские пары сильно перекрываются в пространстве и именно эта сильная корреляция между парами в дополнение к корреляции электронов внутри одной пары приводит к жесткости волновой функции сверхтекучей жидкости. Энергетическая щель ограничивает переток свободных электронов по орбитам других атомов и не позволяет пересекаться поверхностям Ферми различных атомов. Это создает условия для формирования сверхупругой оболочки сверхпроводящей среды. Сверхпроводящая плазма со стороны зоны деструкции и зоны реконструкции энергетически ограничена Ферми – поверхностью как единый квантовый Ферми-конденсат.

Основное свойство сверхпроводящего слоя фоторезонансной плазмы состоит в том, что образуется сверхжесткая, сверхупругая оболочка, демпфирующая все кинетические возбуждения как со стороны исходного вещества, так и со стороны продуктов взрыва. А это означает, что ФДВ не имеет зон резкого опережения или отставания процессов образования новых звеньев в цепном развитии детонации, а следовательно, и изменения скорости детонации. Все это приводит к одномерному фронту Зельдовича или сопровождается локальными колебаниями поверхности детонационной волны [7]. В экспериментах по исследованию детонационных волн наблюдался как гладкий, так и пульсирующий фронт без существенных изменений на отдельных участках скорости детонации, амплитуды и частоты колебаний фронта.

Наличие границ сверхпроводящей зоны (СПЗ) и скачка параметров среды (коэффициент преломления, проводимость, упругость, вязкость, сжимаемость и т.п.) приводит к появлению на границе условий для отражения ультразвуковых и электромагнитных волн, что в замкнутой системе «замораживает» излучение (или переизлучает его обратно в зону химических реакций). Основное излучение идет из зоны химических реакций и релаксационной зоны. Зона деструкции и СПЗ не излучают, т.к. в них не происходят процессы рекомбинации.

Наряду с изменением свойств электронной среды претерпевает изменение и атомно-ионная структура вещества. При низких температурах силы взаимодействия между атомами и молекулами газа уравновешены и образуют пространственно правильную структуру (идеальный газ). При этом холодные атомы и ионы, обладающие симметричными потенциальными функциями, скачком укладываются в структуру плотной упаковки. Для газовых взрывчатых веществ мерой постоянной образовавшейся квазирешетки является длина свободного

пробега атомов. Аналогичная картина имеет место и для жидких взрывчатых веществ с постоянной решетки, близкой к твердым кристаллам. В твердых кристаллических взрывчатых веществах при детонации происходит разрушение агрегатных связей и скачкообразное изменение симметрии кристаллов и межатомных расстояний до состояния плотной упаковки. Процессы резонансного взаимодействия гиперзвуковых волновых пакетов с межатомными и межмолекулярными связями превращают исходное взрывчатое вещество в идеальный газ без изменения исходной неравновесности. В этом случае можно говорить о фазовых переходах, сопровождающихся резонансным поглощением энергии ультразвуковых волновых пакетов.

Структуризация атомов и ионов взрывчатого вещества происходит на передней Ферми-поверхности сверхпроводящей зоны и аналогична процессам на границе кристаллизации жидкого гелия  $He^4$  в твердый с возникновением кристаллизационных волн [8]. Существуют гипотезы [9], согласно которым при кристаллизации из паровой фазы атомы мигрируют по поверхности и рассматриваются как двумерный газ, переходящий при насыщении в двумерную жидкость. Жидкость затем кристаллизуется. В зоне деструкции фронта детонационной волны свободные атомы также скачком мигрируют по поверхности, занимая положения с минимумом потенциальной энергии. Скользить «помогают» межатомные силы (потенциальные и кулоновские), которые укладывают холодные атомы в плотноупакованную структуру квазикристалла. Если потенциальная энергия взаимодействия  $u$  велика ( $u \gg kT$ ), соответствующие степени свободы упорядочиваются, а газ структурируется в плотную упаковку, что имеет место в сверхпроводящей фоторезонансной плазме детонационного фронта жидких и твердых веществ. В структурированной газовой среде существенно облегчены условия для интерференции волн, составляющих резонансные волновые пакеты. Строгая периодичность излучающих центров в зоне реконструкции обеспечивает острую направленность лучей в сверхпроводящей зоне (интерференция когерентных волновых пакетов) в сторону невозмущенного материала зоны деструкции, которая также находится в граничном слое сверхпроводящей зоны.

Сверхпроводящий слой является важным элементом ФДВ, определяющий основные свойства процесса детонации. Его существование в рамках предложенной физической модели подтверждают наиболее характерные эксперименты по исследованию свечения детонирующих жидких взрывчатых веществ и отражению света дополнительного источника от фронта детонации [10].

Во-первых, первое свечение возникает при иницировании детонации в жидких ВВ от инертной ударной волны за преградой. В результате воздействия ультразвуковых волн на исходное взрывчатое вещество происходит его дробление, разрушение агрегатных и химических связей, компенсация межатомных (Ван дер Ваальсовых и дисперсионных) сил, обусловленных электромагнитным взаимодействием между атомами. В результате возникают свободные ионы и электроны. Рекомбинация их вызывает первое свечение преимущественно в красной и инфракрасной области спектра.

Образовавшиеся свободные холодные атомы и ионы структурируются в плотную упаковку идеального газа, атомные электроны которого резонансно взаимодействуют с проинтерферировавшими электромагнитными волновыми пакетами из зоны реконструкции. Но не все проинтерферировавшие ВП взаимодействуют резонансно. Часть из них рассеивается на неоднородностях, часть испытывает неполное взаимодействие, отдельные волны спектра испытывают переизлучение. В результате наблюдается вторая вспышка свечения. Порог свечения

объясняется тем, что интерференция излучения имеет место только от структурированных, периодически расположенных ионов зоны реконструкции. А это связано со структуризацией атомов в зоне деструкции и их резонансной ионизацией. На фотохроноразвертке огибающая свечения на начальной стадии носит более крутой характер. В развитой стадии детонации огибающая первого и второго свечения асимптотически сближаются, т.е. процесс детонации стабилизируется. Область свечения спектра более коротковолновая, ближе к синему и ультрафиолетовому. Из экспериментов по возбуждению детонации от микрочастиц взрывчатого вещества (ВВ), расположенных на внешней стороне преграды, это видно четко: первое и второе свечение возникают с малой задержкой и распространяются параллельно, не пересекаясь.

И, наконец, третье свечение возникает при выходе детонационной волны к границе взрывчатого вещества. Оно имеет белый спектр. Следует подчеркнуть особо: свечения продуктов взрыва до границы жидкого ВВ ни в одном из опытов не наблюдалось. Это важный довод в подтверждение запертости излучения продуктов взрыва. Барьером излучения по предложенной гипотезе является сверхпроводящий слой между зоной химических реакций и исходным ВВ, т.е. собственно фронт детонационной волны. В начальный момент выхода из ВВ продукты взрыва имеют массовые скорости выше скорости детонации, которые в дальнейшем замедляются. Это наглядно видно из параболического характера огибающей фронта свечения и это же подкрепляется экспериментом с порохом марки НВ с продольными каналами как по регистрации свечения, так и осциллографированию массовой скорости.

Другой серией экспериментов, подтверждающих наличие сверхпроводящего слоя во фронте детонационной волны, являются исследования отражения света дополнительного источника от ФДВ [10]. Во-первых, линия отраженного сигнала всегда проявляется позже, чем линия фронта свечения. Во-вторых, в развитой и стабильной детонации она всегда параллельна асимптоте фронтов свечения, что подтверждает существование сильно отражающего сверхпроводящего слоя между исходным ВВ и зоной химических реакций.

## ВЫВОДЫ

Подводя итоги вышеприведенным рассуждениям, можно сформулировать следующие выводы:

1 В предложенной модели фронта детонационной волны ведущую роль играют резонансные ультразвуковые и электромагнитные волновые пакеты, разрушающие агрегатные и молекулярные связи и ионизирующие свободные атомы.

2 В результате резонансной ионизации образуются холодные электроны, объединяющиеся в куперовские пары; источником фононов связи являются нормальные колебания кристаллической решетки исходного взрывчатого вещества.

3 Куперовские пары образуют сверхжесткую, сверхупругую оболочку, демпфирующую нестационарные и неустойчивые колебания зоны химических реакций.

4 Образовавшаяся оболочка является сверхпроводящим слоем, запирающим излучение продуктов детонации и препятствующим проникновению диагностического светового излучения внутрь зоны химических реакций.

5 Анализ характерных экспериментов по исследованию свечения детонационной волны и отражения от нее света в жидких взрывчатых веществах подтверждает существование сверхпроводящего, сверхжесткого и сверхупругого слоя в детонационной волне.

## SUMMARY

### SUPERCONDUCTIVITY IN HYPOTHESE MODEL OF DETONATION WAVE FRONT

**A.I. Shymko, V.A. Baturin**

*Applied Physics Institute, 58, Petropavlovskaya St., 40030, Sumy, Ukraine*

*The stated earlier hypothesis of existence in front of a detonation wave a superconducting layer, having properties of a superrigid and superelastic blanket is developed in the article. Some characteristic experiments on research of detonation front are analyzed from the point of view of the offered quantum model.*

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. Физика взрыва. М.: Наука, 1975.-704 с.
2. Войцеховский Б.В., Митрофанов В.В., Топчийн М.Е. Структура фронта детонации в газах. - Новосибирск: СО АН СССР, 1983.-168 с.
3. Шимко А.И., Батурин В.А. Гипотетическая структура детонационного фронта // Вісник Сум ДУ. Серія. Фізика, математика, механіка. - 2004. - № 8(67). - С.84-88.
4. Бетеров И.М., Елецкий А.В., Смирнов Б.М. Плазма резонансного излучения (фоторезонансная плазма) // УФН. - 1988. - Т.155, Вып.2. - С.265.
5. Шиффер Дж. Теория сверхпроводимости / Пер. с англ. - М.: Наука, 1970. - 312 с.
6. Шимко А.И., Батурин В.А. Фоторезонансная плазма во фронте детонационной волны // Вісник СумДУ. Серія. Фізика, математика, механіка. - 2005. - № 8(80). - С.138-143.
7. Денисов Ю.Н., Грошин Я.К., Щелкин К.И., Войцеховский Б.В. и др. Неустойчивость детонационных волн в газах. Открытие. Заявка №ОТ-7127 от 23.01.1969 г. Диплом №111. Открытия в СССР: Справочник. - Киев: Наукова думка, 1988. - С.23.
8. Паршин А.Я. Кристаллизационные волны в He<sup>4</sup> // УФН. - 1981. - Т.135, Вып.1. - С.175.
9. Попов В.Ф., Горин Ю.Н. Процессы и установки электронно-ионной технологи. - М.: Высш. шк., 1988. - 255с.
10. Детонационные волны в конденсированных средах / А.Н. Дремин, С.Д. Савров, В.С. Трофимов, К.К. Шведов. - М.: Наука, 1970. - 164 с.

*Поступила в редакцию 11 ноября 2006 р.*