

УДК 536.43 (575.2) (04)

**ПРИРОДА ОПТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ
ВПЕРЕДИ ФРОНТА ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ
В НИЗКОПЛОТНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ СМЕСЯХ**

Н.М. Калинина – докт. техн. наук,
В.И. Нифадьев – акад. НАН КР, докт. техн. наук,
В.Д. Савинков – канд. техн. наук,
Б.К. Маликов – вед. инженер,
И.В. Шабанов – вед. инженер

The considered particularities of the structure detonation waves in low-density explosive mixtures. The results of the experimental studies of the radiant flow, spreading ahead of front detonation waves in the manner of self-focusing bunch are described. Conclusion is made about their twofold nature, connected with interconsistency motion of electrons and spreading the coherent light flow ahead of front detonation waves. Is established, that source of the coherent radiation are an outline intermediate products to detonations, having fractal structure.

Введение. Известно, что при взрыве конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) детонационная волна и продукты детонации приводят к излучению энергии в окружающее пространство. При этом могут возникать импульсные магнитные и электрические поля, поля радиотехнического диапазона и поля оптического излучения [1, 2]. Под оптическим излучением понимаются электромагнитные волны, длины которых заключены в диапазоне от единиц нанометра до десятых долей миллиметра (диапазон частот $\sim 3 \cdot 10^{11} \dots 3 \cdot 10^{17}$ Гц). К оптическому излучению, помимо видимого (человеческим глазом) излучения, относят также инфракрасное (ИК излучение) и ультрафиолетовое (УФ излучение). В работе [3] в качестве одного из наиболее вероятных механизмов разделения электрических зарядов в первоначально нейтральном ВВ рассматривается образование двойного электрического слоя в детонационной волне. Вследствие большой подвижности электроны могут опережать ударную волну. В этом случае продук-

ты взрыва, наиболее удаленные от центра взрыва, будут заряжены отрицательно. В [4] с различиями в подвижности электронов и ионов и наличием местных градиентов давления связывается возникновение локальных дифференциаций зарядов.

В настоящее время нет однозначного мнения по вопросу механизма возбуждения генерации электромагнитных процессов при детонации конденсированных ВВ. Считается, что электрические процессы в зоне детонационной волны могут быть обусловлены ударной поляризацией, диффузией электронов с фронта волны, пьезоэффектом, разрушением кристаллов ВВ, адиабатическим сжатием газовых включений, однако единой концепции и анализа приоритетных факторов не существует [1]. В зоне химической реакции электромагнитные явления связывают с ионизацией, однако установленные представления о механизме ионизации не вполне ясны, поскольку недостаточно подтверждены экспериментально и обоснованы теоретически. В качестве одного из меха-

низмов, способных привести к генерированию электромагнитного излучения в детонационной волне, относят явление “ударной поляризации”, т.е. возникновение разности потенциалов в образцах диэлектриков при их динамическом нагружении. В качестве диэлектрика, по которому движется детонационный фронт, рассматривается само конденсированное взрывчатое вещество. Механизм возникновения поляризации полярных диэлектриков связывается с ориентацией полярных молекул вдоль направления движения фронта ударной волны, либо с нарушением пространственного распределения зарядов, т.е. деполаризацией. Ориентированное состояние молекул на фронте ДВ не является термодинамически равновесным. Со временем тепловое движение этих молекул за фронтом приводит к деструкции ориентированного состояния и к соответствующему уменьшению поляризации. Особенность ударной поляризации при детонации состоит в том, что обладающее диэлектрическими свойствами ВВ в результате ударного нагружения и последующих химических реакций становится за фронтом проводником. Напряженности электрического и магнитного полей, генерируемые на детонационном фронте при взрыве бризантных ВВ, на порядок меньше, чем в зоне химической реакции. Рассматриваются и другие механизмы возникновения электрических зарядов на детонационном фронте: адиабатическое сжатие газовых включений, диффузия электронов с фронта, образование зарядов вследствие разрушения кристаллов ВВ и пьезоэффекта.

В бризантных ВВ основным источником заряженных частиц в области детонационной волны является зона химической реакции. Были предприняты попытки объяснить возникновение электрических зарядов в зоне химической реакции термической ионизацией при температуре в плоскости Жуге 3000–4000 К. Однако измеренные концентрации электронов не удается объяснить термической ионизацией, так как полученные концентрации на несколько порядков превышают расчетные значения для условий термического равновесия в продуктах взрывчатого превращения. Предполагается, что в процессе химических реакций образуются промежуточные ионы и свободные электроны, рекомбинация которых затрудня-

ется в условиях высокого давления [4]. Рассматривается также возможность ионизации промежуточных продуктов химической реакции, или образование электронов в реакциях ассоциативной ионизации.

В настоящее время природу проводимости продуктов детонации объясняют увеличением эффективности взаимодействия атомов вещества при ударном сжатии, ионизацией промежуточных продуктов реакции, контактом между содержащимися в продуктах частицами углерода, термоэмиссией электронов с частиц углерода и наличием диссоциирующих продуктов детонации.

Обеспечение одномерности процесса традиционно является одним из основных требований при изучении детонации конденсированных ВВ. Попытки “растянуть” зону химической реакции путем разбавления смеси или уменьшения давления неизменно связаны с появлением колебаний газа, нарушающих одномерность процесса. Неравновесная область повышенного давления за ударным фронтом устойчиво регистрируется лишь в смесях с высокой скоростью реакции. Поэтому изучение волн со структурой, близкой к одномерной, возможно лишь путем разработки методов регистрации, имеющих высокую разрешающую способность во времени (10^{-6} – 10^{-8} с).

В то же время исследования показали, что неоднородный, пульсирующий характер процессов является отличительной особенностью детонации низкоплотных и сверхнизкоплотных взрывчатых смесей [5]. Эта особенность протекания детонации свидетельствует о нелинейном характере процессов в детонационной волне, а наличие иерархически организованного спектра колебаний – о многомерной структуре детонационной волны. Несмотря на заведомо низкую для конденсированных ВВ плотность заряда (от 0,1–0,15 до 0,4–0,5 г/см³), детонация носит устойчиво колебательный характер и сопровождается процессами самоструктурирования позади фронта детонационной волны, а также сильно выраженными оптическими эффектами впереди фронта.

Анализ литературы показывает, что трактовка экспериментальных результатов, связанных с исследованием электромагнитных явлений при детонации, неоднозначна и затрудня-

ется недостаточной степенью исследованности процессов, протекающих в детонационной волне на атомно-молекулярном уровне. Поэтому при изучении особенностей детонации низкоплотных ВВ первостепенное внимание было уделено феноменологии процесса.

Судя по последним сведениям о современном состоянии физики взрыва, круг исследований и в настоящее время традиционно ограничивается изучением стационарных режимов в конденсированных ВВ, а пульсирующая детонация в низкоплотных ВВ вообще не рассматривается. Но поскольку и стационарная, и спиновая детонация являются предельными случаями пульсирующей детонации [5], экспериментальный материал, накопленный специалистами в области исследования бризантных ВВ, может быть использован для объяснения феноменов, сопровождающих пульсирующую детонацию низкоплотных и сверхнизкоплотных смесей и, в частности, смесей на основе вспененного полистирола.

Особенности структуры детонационной волны в низкоплотных ВВ по сравнению с бризантными ВВ. Согласно современным представлениям, структура детонационной волны в конденсированных ВВ, детонирующих в стационарном режиме, включает следующие элементы: ударный фронт, зона виброрелаксаций, возбуждения, быстрых экзотермических

реакций и расширения [1]. Основным отличием этой структуры является отсутствие каких-либо процессов, включая и электромагнитные, впереди фронта детонационной волны и высокая скорость протекания химических реакций за фронтом (рис. 1).

В низкоплотных ВВ, содержащих вспененный полистирол, эта структура существенно видоизменяется. На рис. 2 приведены отдельные кадры, полученных при скоростной фотосъемке детонации взрывчатой смеси плотностью $0,6 \text{ г/см}^3$ в тонкостенной стеклянной трубке диаметром 18 мм. Содержание ТЭНа и ППС здесь и далее приводится в объемном соотношении. Внизу указано время с момента инициирования детонации. На снимках хорошо выражена светящаяся зона впереди фронта детонационной волны, за ней (выше) следует ярко светящаяся зона первичных реакций, затем – зона промежуточных продуктов реакции и еще выше – зона конечных продуктов детонации. Фронт в отличие от мощных ВВ растянут и не имеет четких границ.

Промежуточные продукты детонации (детонационная плазма), выброшенные в воздух из разрушенной трубки, отличаются структурированностью и продолжительностью пребывания в плазменном состоянии. Существенным является то, что в детонационной плазме заключен большой запас химической энергии.



Рис. 1. Структура детонационной волны в конденсированных ВВ [1].

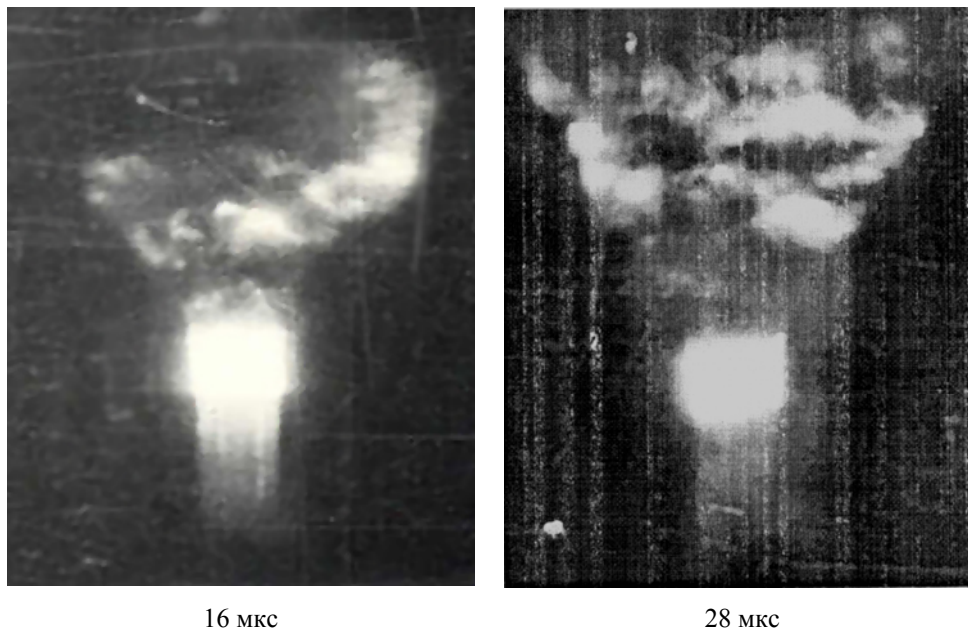


Рис. 2. Детонация смеси ТЭН-ППС 50/50 в тонкостенной стеклянной трубке. Плотность заряда – $0,5 \text{ г/см}^3$. Диаметр заряда – 18 мм.

Она высвобождается быстро, в форме взрыва в том случае, когда заряд детонирует в трубах с прочными массивными оболочками. При взрывании в стеклянных и бумажных трубках выделение химической энергии происходит медленно, время жизни структурированных плазменных сгустков достигает нескольких десятков микросекунд. В толстостенных стеклянных и стальных трубках, когда промежуточные продукты детонации не успевают выйти в воздух до окончания полного взрывчатого превращения, структура детонационной волны по существу остается аналогичной изображенной на рис. 2. Основное отличие заключается в том, что период пребывания детонационной плазмы в структурированном состоянии уменьшается вследствие импульсного сжатия ее конечными продуктами детонации, образовавшимися в предыдущем слое ВВ. В результате происходит взрыв детонационной плазмы с образованием конечных продуктов детонации.

Оптические эффекты впереди фронта детонационной волны в низкоплотных взрывчатых смесях. При взрывании низкоплотных взрывчатых смесей в тонкостенных стеклянных трубках было обнаружено, что

впереди фронта детонационной волны распространяются ярко светящиеся пучки, изменяющие свои параметры в процессе детонации, но отличающиеся устойчивостью формы (рис. 3). На рис. 4 схематично показана конфигурация передней границы фронта детонационной волны, распространяющейся в НВС. В большинстве случаев она представлена кривой, образованной соприкасающимися дугами окружностей, количество и параметры которых изменяются в зависимости от вида ВВ, плотности заряда и удаленности рассматриваемого участка от боевика. Смежные дуги пересекаются друг с другом, образуя зубцы с вершиной в точке F. Из вершин зубцов берут начало нитевидные структуры, распространяющиеся впереди фронта ДВ на расстояние до двух диаметров заряда.

Аналогичное строение границы фронта наблюдалось при взрывании полистирольных смесей, приготовленных на основе аммиачной селитры или аммонита 6ЖВ, в трубах с внутренним диаметром 55 мм и толщиной стенок 4–5 мм. Установлено, что параметры зубцов фронта и нитевидных структур зависят от мощности заряда и компонентного состава ВВ.

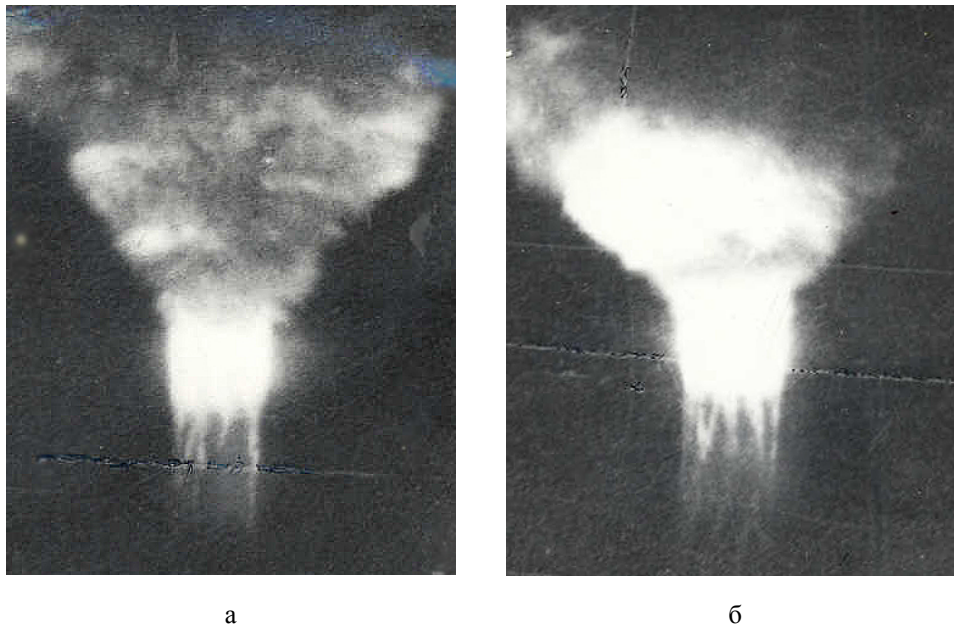


Рис. 3. Световые пучки впереди фронта детонационной волны в низкоплотных взрывчатых смесях на основе пенополистирола: а – ТЭН-ППС 50/50; плотность заряда – $0,5 \text{ г/см}^3$; б – ТЭН-ППС 30/70; плотность заряда – $0,3 \text{ г/см}^3$.

При снижении плотности и, соответственно, мощности заряда до $0,3\text{--}0,2 \text{ г/см}^3$ длина и ширина зубцов увеличивается, как и зона свечения взрывчатой смеси впереди фронта детонационной волны.

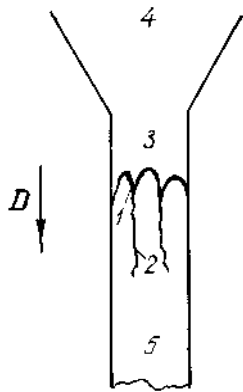


Рис. 4. Конфигурация переднего фронта детонационной волны в низкоплотных взрывчатых смесях: 1 – зубцы; 2 – нитевидные структуры; 3 – фронт ДВ; 4 – продукты детонации; 5 – взрывчатая смесь.

Влияние постоянного поперечного электрического поля на параметры световых пучков. Для установления природы оптических эффектов впереди фронта детонационной волны были проведены эксперименты по определению влияния внешних электрических полей на конфигурацию границы фронта и параметры световых пучков. Была проведена серия экспериментов, в которых заряды помещали в электрическое поле напряженностью $\bar{E}_0 = 0,65 \text{ кВ/см}$, создаваемое между заряженными металлическими пластинами. Расстояние между пластинами равнялось 31 см , напряжение, подаваемое на пластины, – 20 кВ . При детонации зарядов плотностью $0,5 \text{ г/см}^3$ в горизонтальном электрическом поле, силовые линии которого направлены перпендикулярно продольной оси заряда, граница фронта сглаживается, зубцы становятся шире в основании и значительно короче (рис. 5а). Длина нитевидных структуры также уменьшается, резко снижается интенсивность их свечения.

При снижении плотности заряда до $0,3\text{--}0,2 \text{ г/см}^3$ и увеличении \bar{E}_0 до 2 кВ/см граница

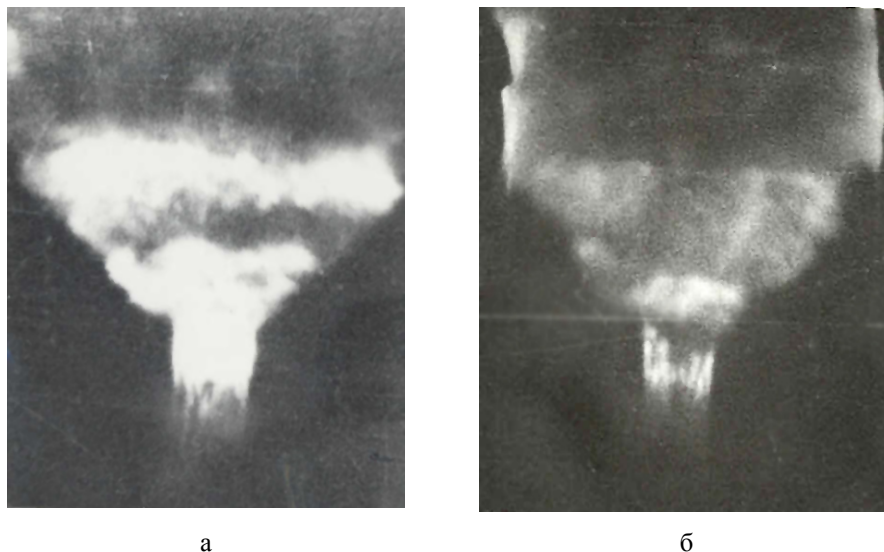


Рис. 5. Влияние поперечного электрического поля на структуру детонационной волны и характер свечения впереди фронта: а – смесь ТЭН-ППС; плотность смеси $0,5 \text{ г/см}^3$; б – то же, плотность смеси $0,2 \text{ г/см}^3$.

фронта становится еще более гладкой, а нитевидные структуры практически полностью исчезают. Примечательно, что поле растягивает также структуры детонационной плазмы (промежуточных продуктов детонации) вдоль силовых линий, препятствуя таким образом реактивному перемещению плазмы вдоль оси заряда, т.е. в направлении, противоположном ходу детонации (рис. 5б). Вследствие уменьшения интенсивности свечения хорошо различается внутренняя структура детонационного фронта.

Возникновение оптических эффектов впереди фронта детонационной волны в аммоните 6 ЖВ. Для получения ответа на вопрос, связано ли возникновение световых пучков впереди фронта детонационной волны с наличием в составе ВВ пенополистирола, обладающего специфическими физико-химическими свойствами, или же их возникновение обусловлено снижением температуры и давления в детонационной волне вследствие использования в составе смеси сильно вспененного полистирола, была проведена серия взрывов аммонита 6 ЖВ пониженной плотности ($0,6 \text{ г/см}^3$) в постоянном поперечном электрическом поле. Установлено, что уже через 4 мкс с начала детонации граница фронта искривляется и впе-

реди фронта распространяется не очень яркое излучение, а по мере удаления от боевика формируются яркие световые пучки с отходящими от них нитями, распространяющимися вглубь еще не прореагировавшей смеси на расстояние около $1,0 d_{\text{зар}}$ (рис. 6). Отсюда следует, что основной причиной повышения прозрачности фронта детонационной волны для излучения является снижение плотности смеси и, соответственно, температуры и давления во фронте. Поперечное электрическое поле в данном случае позволило дополнительно уменьшить скорость протекания химических процессов за счет перераспределения детонационной плазмы между электрически заряженными пластинами.

Взрывание низкоплотных взрывчатых смесей в стеклянных трубах, стенки которых снаружи были затемнены экраном из полихлорвиниловой пленки, позволило установить, что вдоль передней границы фронта ДВ проходят мощные световые пучки, направленные относительно продольной оси заряда под некоторым углом, величина которого зависит от мощности ВВ. Аналогичное явление зафиксировано без затемнения трубы при детонации низкоплотного аммонита (рис 6; кадры, соответствующие 16–18 мкс).

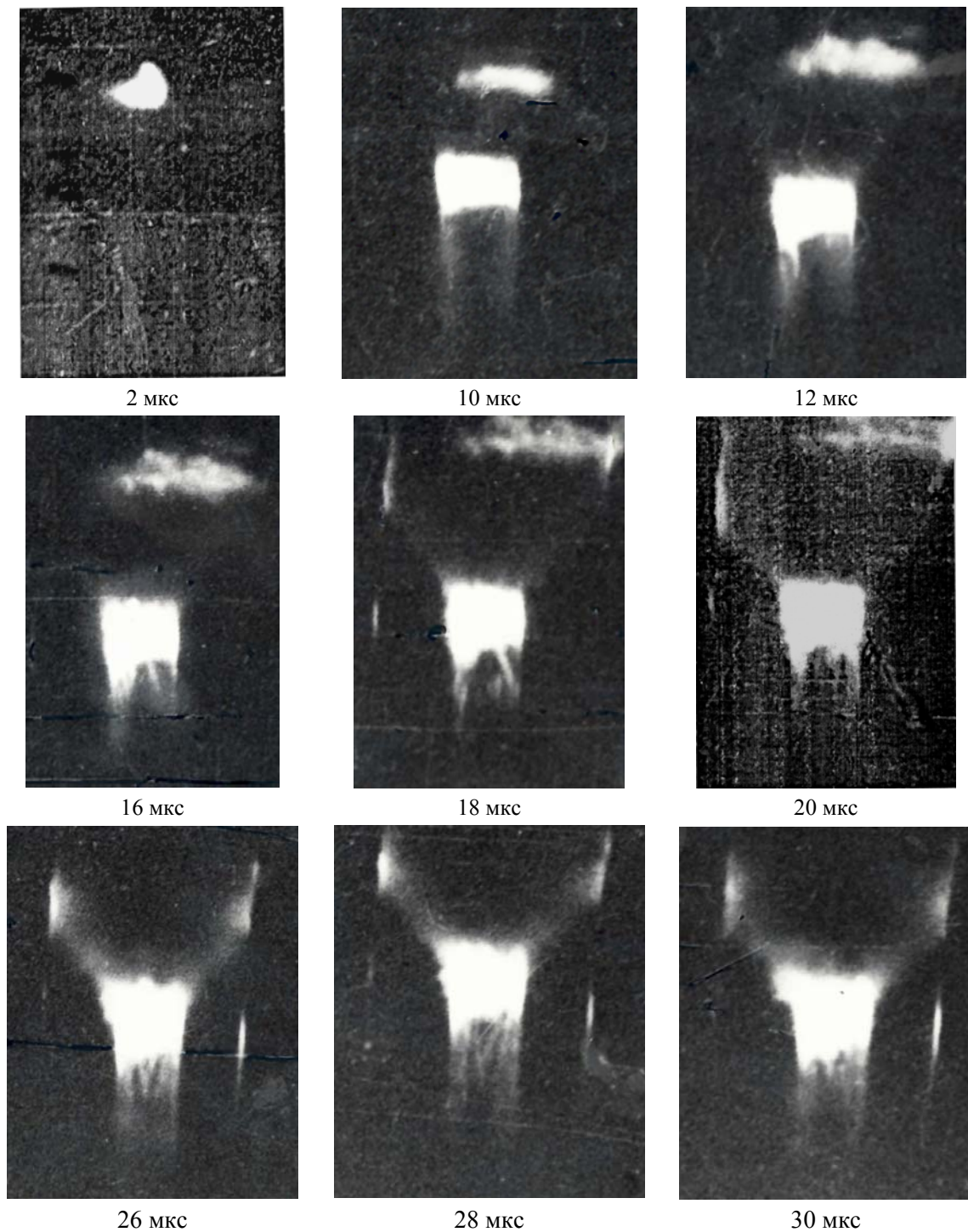


Рис. 6. Световые пучки впереди фронта детонационной волны в низкоплотном заряде аммонита 6 ЖВ, помещенном в постоянное поперечное электрическое поле. Плотность заряда ВВ – $0,6 \text{ г/см}^3$; напряженность электрического поля – $0,2 \text{ кВ/см}$; расстояние между электрически заряженными пластинами – 6 см .

самофокусируется. Далее он распространяется в виде тонкой световой нити. По форме зубцы, наблюдающиеся при детонации, подобны световым пучкам, сжимающимся в результате самофокусировки. Нитевидные структуры также выходят не из произвольных участков границ фронта детонационной волны, а только из вершин зубцов. На аналогии в оптических эффектах, сопровождающих детонацию, с явлением самофокусировки указывает обращение фронта нитевидных структур при подходе ко дну стеклянных трубок. Способность структур фронта ДВ изменяться под действием внешних электрических и магнитных полей, а также наблюдаемые зависимости размеров зубцов и нитевидных структур от мощности заряда также согласуются с закономерностями процессов, протекающих при самофокусировке. В ряде случаев наблюдается иерархическая структура светящихся пучков, создается впечатление, что их самофокусировка происходит одновременно на нескольких масштабных уровнях. Это находит логическое объяснение, если учесть, что источником излучения является детонационная плазма, имеющая структуру с иерархическим принципом организации.

В то же время наличие светящихся пучков впереди фронта ДВ может быть связано не только с генерированием светового потока, но и с выбросом пучков электрически заряженных частиц, в которых при определенных условиях [8] также может происходить самофокусировка. Такие пучки вызывают свечение стекла и некоторых других материалов-диэлектриков. Они распространяются прямолинейно и отклоняются от направления своего распространения внешними электрическими и магнитными полями. Для проверки этой гипотезы была проведена серия взрывов по воздействию излучения, распространяющегося впереди фронта детонационной волны в низкоплотных взрывчатых смесях, на диэлектрики. Было установлено, что излучение, распространяющееся впереди фронта детонационной волны, вызывает яркое свечение стекла, дерева, полистирола, оргстекла (рис. 8).

Самофокусировка потока электронов и фотонов означает осуществление весьма значительной пространственной концентрации энергии вещества. Механизм передачи энергии потоком быстрых электронов и по световому лучу может быть одним из основных факто-

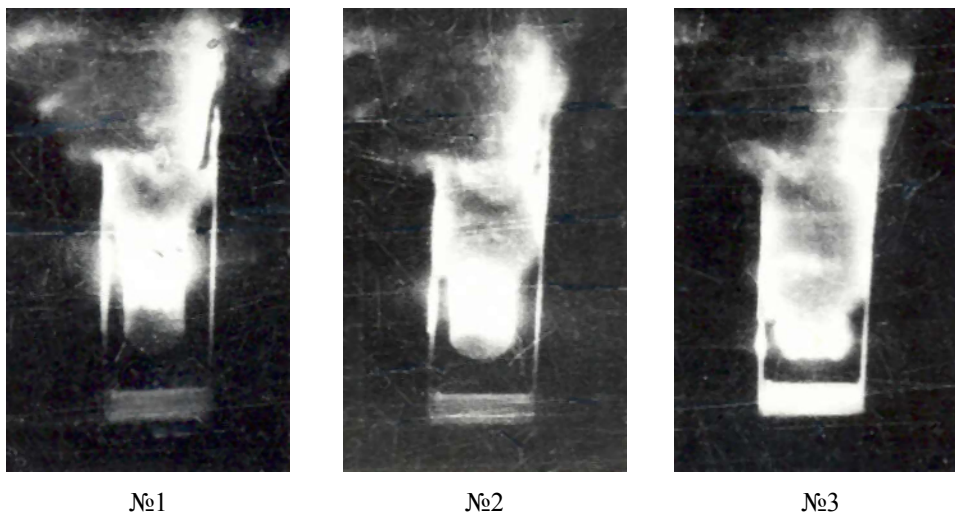


Рис. 8. Свечение деревянного бруска, вызванное действием излучения, генерируемого впереди фронта детонационной волны при взрыве смеси ТЭН-ППС плотностью $0,6 \text{ г/см}^3$. Детонация происходит в постоянном внешнем поле напряженностью $0,3 \text{ кВ/см}$. Диаметр заряда – 18 мм , длина – 20 см . Интервал времени между приведенными кадрами – 4 мкс .

ров, обеспечивающих саму возможность протекания детонации в таких сильно неоднородных низкоплотных взрывчатых смесях, к каким относятся низкоплотные и сверхнизкоплотные взрывчатые смеси на основе вспененного полистирола.

Наличие самофокусирующихся пучков излучения при детонации означает, что вещество во фронте детонационной волны периодически должно переходить в состояние когерентности.

Согласованный выброс электронов в виде самофокусирующихся пучков может происходить при одновременном разрушении структур вещества в зоне химической реакции. Так, в [4] приводятся сведения о том, что электромагнитное излучение интенсифицируется в том случае, когда взрыв сопровождается разрушением. В этих условиях можно обнаружить мощные импульсы в сантиметровом диапазоне. Установлено, что излучаемая энергия при детонации на 70% превышает ту, которую можно было бы отнести за счет термического излучения продуктов взрыва. Однако автор оставляет открытым вопрос о том, каким механизмом обусловлены очевидные когерентные колебания заряженных частиц в детонационной волне.

Очевидно, что для осуществления такого согласованного действия, как когерентное излучение, т.е. перехода в состояние согласованности за короткий период времени и в условиях пониженных значений давления и температуры, структурированное вещество должно быть достаточно подвижным. Как показали многочисленные эксперименты [5], таким веществом является детонационная плазма, обладающая иерархически организованной, самоподобной (фрактальной) структурой и способная при сжатии вести себя как единое целое.

Таким образом, когерентное излучение впереди фронта детонационной волны можно

связать с переходом промежуточных продуктов реакции в когерентное состояние в процессе их сжатия. Управление потоками излучения можно осуществлять путем подбора соответствующего компонентного состава взрывчатой смеси, параметров заряда, материала оболочек, в которые помещается заряд, наложением внешних электрических и магнитных полей.

Литература

1. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – В 2 т. – Т. 2 – М.: Физматлит, 2004. – С. 351–388.
2. Кук М.А. Наука о промышленных взрывчатых веществах / Пер. с англ. – М.: Недра, 1980. – С. 42–61.
3. Герценштейн М.Е., Сиротинин Е.И. О природе электрического импульса взрыва // ПМТФ. – 1970. – № 2. – С. 72–75.
4. Шалль Р. Физика детонации // Физика быстропротекающих процессов / Пер. с англ. – Т. 2. – М.: Мир, 1971.
5. Нифадьев В.И., Калинина Н.М. Низкоплотные и сверхнизкоплотные взрывчатые смеси. Механизм детонации. – Бишкек: Илим, 1998.
6. Делонэ Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. – М.: Наука, 1989.
7. Хора Х. Физика лазерной плазмы. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
8. Дорофеев В.Г. и др. Нелинейная динамика взаимодействия электронно-ионного пучка с плазмой // Физика плазмы. – 1995. – Т. 21. – № 5. – С. 407–409.
9. Калинина Н.М. Исследование свойств промежуточных продуктов детонации взрывчатых смесей на основе пенополистирола // Наука и новые технологии. – 1998. – № 3. – С. 6–12.
10. Калинина Н.М. Процессы самоорганизации в детонационной волне низкоплотных взрывчатых смесей // Горный журнал Казахстана. – 2003. – № 4. – С. 10–14.