

После окончания Горьковского радиотехникума в 1960 г. я был направлен в газодинамическое отделение ВНИИЭФ (ИФВ). В 1965 г. подключился к новым для ВНИИЭФ работам с жидкими взрывчатыми веществами (ЖВВ). На этом поприще я выполнил дипломный проект, затем защитил кандидатскую диссертацию, позднее — докторскую. И до сих пор не нахожу сил оторваться от этого увлекательнейшего занятия. Почему? Попытаюсь ответить на этот вопрос, приводя наиболее любопытные полученные результаты, многие из которых не имеют аналогов в мире. Кое-где неподготовленному читателю придется несколько поднапрячься. А может, у кого-то возникнет желание продолжить это дело...

которых ЖВВ без применения капсулей-детонаторов, причем с огромной точностью. Вот какие преимущества дают жидкие ВВ.

Однако за все надо платить. В качестве окислителя Козырев предложил применять тетранитрометан  $C(NO_2)_4$ , в качестве горючего — нитробензол  $C_6H_5NO_2$  (и сегодня можно сказать, что выбор был сделан правильно). Стехиометрический состав этих компонентов (состав с нулевым кислородным балансом) является мощным жидким взрывчатым веществом, значительно мощнее тротила (тринитротолуола), но чувствительность состава к механическим воздействиям становится очень высокой (выше, чем у нитроглицерина). Поэтому пришлось отказаться от транспортировки готового состава и смешивать

# ЗАПАХ ЖИДКОГО ВВ

Е. В. ЗОТОВ

Идея применения ЖВВ в газодинамических исследованиях принадлежит Козыреву Александру Сергеевичу. Первые предложения он сформулировал еще в 1947 г. В 1963 г. он предложил в некоторых сложных устройствах для газодинамического термоядерного синтеза заменить твердые литые или прессованные ВВ на жидкие (типа окислитель + горючее), чтобы существенно повысить прецизионность эксперимента. При замене твердых ВВ на жидкие исключаются стыки между отдельными элементами ВВ, зазоры между системой инициирования и ВВ, почти полностью исключаются разносоставность и разноплотность ВВ, в большей или меньшей степени присущие смесевым твердым ВВ. Сюда необходимо добавить возможность достаточно простого изменения габаритов и формы самых разных взрывных устройств, что увеличивает мобильность проведения научных исследований. И это еще не все: в результате наших исследований был разработан способ инициирования не-

компоненты непосредственно на месте подрыва, используя дистанционно управляемые системы смешивания и наполнения. И только для малых масс (менее 500 г) допускается ручное приготовление смеси специально обученным персоналом.

Еще одним большим недостатком смеси является высокая (плюсовая) температура плавления компонентов, поэтому эксперименты проводятся в теплое время года или в лабораторных условиях, зимой же необходимо строить отапливаемые укрытия. Конечно, и в окислитель, и в горючее можно ввести специальные добавки с целью понижения температуры плавления, но при этом происходит и снижение мощности ЖВВ. Многие компоненты имеют резкий запах, приводящий к обильному слезотечению, кашлю и т. п., но выручают обычный промышленный противогаз или вытяжная вентиляция. В противогазе чувствуешь себя десантником на задымленной вражеской территории, в резиновых перчатках — хирургом перед серьезной операцией, в

комбинезоне — космонавтом перед запуском. И наслаждаешься жизнью, снимая все это...

Что же перевешивает — достоинства или недостатки ЖВВ? Выбор остается за экспериментатором. Если необходимый результат может быть получен с использованием обычного твердого ВВ, то и не надо искать дополнительных приключений. Но если достоинства жидких ВВ проявляются в эксперименте во всем блеске, то другим экспериментаторам остается только рыдать от зависти, а иногда вставать в очередь за финансированием, потому что прецизионный эксперимент, конечно же, дороже. К тому же большинство жидких ВВ прозрачно, следовательно, можно непосредственно наблюдать за очень тонкими процессами, происходящими в толще ЖВВ при его инициировании или при распространении детонационной волны. А «недостаток» ЖВВ тетранитрометан/нитробензол — высокая чувствительность — оказался одновременно и достоинством, потому что благодаря именно этому свойству во ВНИИЭФ была разработана уникальная многоточечная система инициирования для прецизионного сферического устройства,

применяемого в исследованиях по инерциальному газодинамическому термоядерному синтезу.

Работы с ЖВВ во ВНИИЭФ были начаты в 1963 г. Козыревым А. С., Бабадеем С. М., Красовским Г. Б. Привлекались ученые нескольких академических институтов: ЛТИ (Ленинград), ИХФ (Москва), ФИХФ (Черноголовка), МВТУ (Москва) и др. Поиск проводился сразу по нескольким направлениям, вопросы возникали на каждом шагу. Моя деятельность была неразрывно связана с изучением и применением ЖВВ. В 1969 г. я возглавил исследовательскую группу, в которой на разных этапах работали: Бальжинимаев Г. Б., Будников И. Н., Дудин В. И., Красовский Г. Б., Кручинин В. А., Рыжова В. Н. и другие. Были проведены десятки тысяч опытов, в которых исследовались свойства различных жидких составов, и сотни опытов с применением ЖВВ. Масса ЖВВ изменялась от нескольких миллиграмм до нескольких сотен килограмм.

Закончив исторический экскурс, перейдем к тем свойствам, которые вызвали продолжительный и стойкий интерес к жидким ВВ. При изменении массового соотношения компонентов свойства смесового ЖВВ разительно меняются. Так, например, максимальную скорость детонации (~7500 м/с) имеет состав тетранитрометан/нитробензол 74/26 %. Это состав с небольшим отрицательным кислородным балансом, его плотность 1,5 г/см<sup>3</sup>, критический диаметр — всего-навсего ~0,05 мм. Создать такой диаметр жидкости искусственно без оболочки невозможно (а оболочка приводит к уменьшению критического диаметра), поэтому в такой ситуации пользуются понятием критической толщины слоя. Можно, например, вылить известное количество ЖВВ на идеально ровную поверхность и таким образом определять толщину слоя, возбуждая в нем детонацию тем или иным образом. Ну, а если нас интересует только сравнительная оценка разных ЖВВ, удобнее взять две стеклянные пластинки, сложить их под малым углом, определить фактическую толщину воздушного зазора между пластинками по всей их длине (замерив толщины пластинок в отдельности и в сложенном виде), затем заполнить зазор жидким ВВ (в силу высокой смачивающей способности ЖВВ этот процесс не вызывает затруднений) и подорвать со стороны большей толщины клина. Наблюдение за процессом можно вести с помощью скоростных фоторегистраторов. Редакция такого опыта и одна из полученных фотохронограмм показаны на рис. 1.



Автор (справа) и Красовский Г. Б.

Не сосредотачивая внимание на целом ряде нюансов (слабое инициирование, а отсюда инициирование сначала низкоскоростного режима взрывчатого превращения ~2500 м/с, прозрачность продуктов нормальной детонации, непрозрачность продуктов низкоскоростного режима и т. д.), лишь констатируем, что нормальная детонация (детонация с нормальной скоростью) распространяется в слоях толщиной почти до

гетерогенного состава легко изменяются с помощью варьирования компонентов ЖВВ и их соотношения.

3. Для кратковременного динамического нагружения поверхностей произвольной формы каких-либо объектов. Жидким ВВ пропитывается лист фильтровальной бумаги (типа «промокашки») или лоскут ткани; чтобы ЖВВ не испарилось, оно закрывается с двух сторон

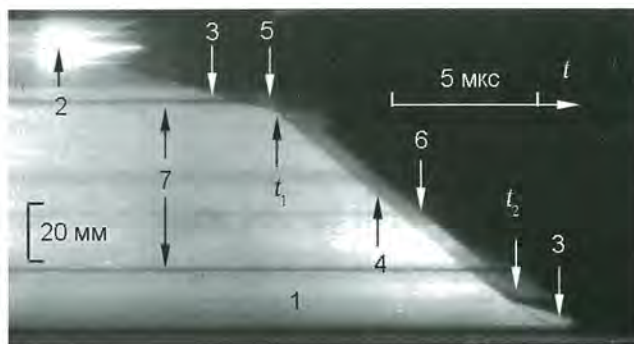
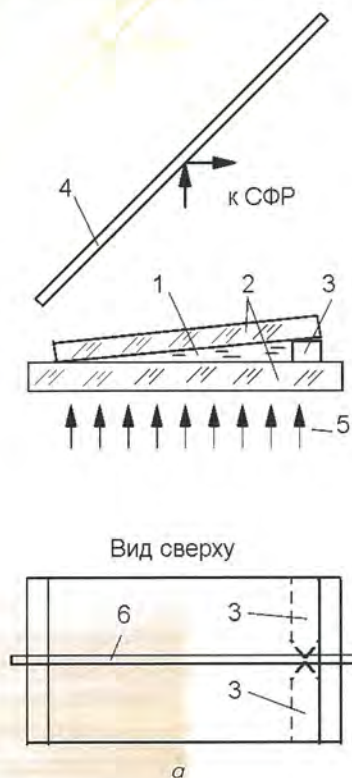


Рис. 1. Редакция опытов по исследованию детонационных процессов в тонких клиновидных слоях ЖВВ (а) и полученная фотохронограмма (б): а) 1 — ЖВВ; 2 — пластины из стекла; 3 — электроды искрового разрядника из фольги; 4 — зеркало; 5 — импульсная подсветка; б) 1 — свечение импульсной подсветки, на фоне которой фиксируется процесс; 2 — электрический искровой разряд в ЖВВ для возбуждения процесса; 3 — низкоскоростной режим; 4 — нормальная детонация; 5 — дореагирование продуктов низкоскоростного режима; 6 — выход ударной волны на внешнюю поверхность пластины из стекла; 7 — реперные (масштабные) отметки;  $t$  — направление развертки изображения и временной масштаб;  $t_1$  — переход низкоскоростного режима в режим нормальной детонации;  $t_2$  — момент прекращения нормальной детонации

~15 мкм, а пределы распространения низкоскоростного режима вообще не найдены.

Где такое уникальное свойство ЖВВ может быть использовано? За примерами далеко ходить не надо.

1. Для дробления горных пород. Предварительно в породе с помощью внешнего взрыва создается сеть трещин, затем трещины заполняются жидким ВВ (заполнение необходимо проводить так, чтобы из трещин вытеснялся воздух), потом производится вторичный подрыв. При необходимости операция может быть повторена.

2. Для создания новых взрывчатых композиций с целью исследований механизмов инициирования и взрывчатых превращений при изменении ряда начальных факторов. Жидким ВВ пропитывается не инертный порошок, а порошок какого-либо твердого ВВ; свойства такого

тонкой пленкой. Затем это гибкое нагружающее устройство наклеивается на нужную поверхность и подрывается. Нагружение объекта осуществляется скользящей детонационной волной.

4. Для динамического эшелонированного нагружения объектов. Ампула заполняется порошком (например сухим речным песком) с насыпной плотностью; затем порошок пропитывается жидким ВВ, которое инициируется; в воздухе распространяется ударная волна, за фронтом которой движется порошок. Аналогичное сферическое нагружающее устройство применялось в экспериментах с толстостенными сферическими и полусферическими оболочками из полимерных материалов. На рис. 2 показана зависимость деформации от времени нагружения, зарегистрированная с помощью тензодатчика, наклеенного на внешнюю поверхность оболочки.

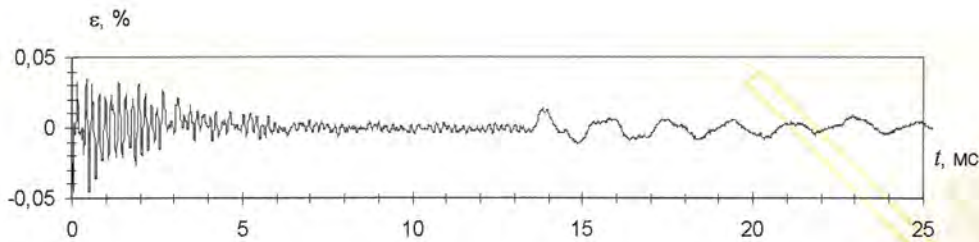


Рис. 2. Зависимость деформации полусферической оболочки из оргстекла при центральном внутреннем нагружении взрывом ЖВВ от времени

В некоторых аналогичных экспериментах потребовалось предельно уменьшить массу ЖВВ. Для этого между электродами произвольного разрядника размещалось необходимое количество пористого материала (ваты, марли, нити, фильтровальной бумаги), которому придавалась по возможности компактная форма. Затем этот пористый материал пропитывался жидким ВВ, разрядник устанавливался в центре испытываемой оболочки. Масса ЖВВ определялась последовательным взвешиванием разрядника до и после пропитки. В экспериментах с надежностью ~75 % удавалось с помощью электроискрового разряда подрывать до 3 мг (!) ЖВВ.

Инициирование жидких ВВ электрическим искровым разрядом стало главной темой моих исследований. Остается только гадать, почему жидкие ВВ (по сравнению с газовыми взрывчатыми смесями или твердыми ВВ) с их богатейшими и одновременно простыми возможностями регулирования свойств, с визуализацией процессов и т. п. ранее оставались вне поля зрения исследователей.

компонентов ЖВВ и их соотношения; диэлектрических характеристик ЖВВ (электрической проводимости, диэлектрической проницаемости, электропрочности); внешних условий (температуры и давления); конструкции разрядника (формы электродов и расстояния между электродами); типа искрового разряда, скользящего по границе раздела «жидкое ВВ – твердый диэлектрик» или непосредственно через слой ЖВВ); параметров импульса напряжения (длительности фронта и импульса, амплитуды).

Маловато будет? Тогда добавьте сюда возможное химическое взаимодействие компонентов, наличие примесей, организацию искусственного ввода энергии в канал разряда с переменной скоростью и т. д., и т. п., и пр. Процесс электроискрового иницирования является многопараметрическим, зависящим от большого числа факторов, статистическим образом влияющих как на электрический пробой, так и на возбуждение детонации. Эти исследования явились основой докторской диссертации автора.



Рис. 3. Ударно-волновое иницирование жидких ВВ: 1 — свечение канала разряда; 2 — фронт детонации; «О-О» — форма электродов в виде острия, расстояние между электродами 5 мм; цель фоторегистратора вдоль оси электродов;  $t$  — направление развертки

Что произойдет, если искровой (двухэлектродный) разрядник заполнить жидким ВВ, а затем подать импульс напряжения? Вариантов может быть много: отказ иницирования взрыва, расплескивание ЖВВ, закивание, взрыв (по различным механизмам). Все зависит от начальных условий эксперимента: химического состава

Я приведу лишь несколько характерных и достаточно любопытных картин процессов электроискрового иницирования ЖВВ. При электрическом пробое в диэлектрике формируется канал разряда, от которого распространяется серия ударных волн. По классическим представлениям причиной возбуждения взрыва

в ЖВВ является комплексное воздействие горячего канала и ударной волны. Оказывается, не всегда: в зависимости от начальных условий могут реализовываться различные механизмы инициирования.

Фотохронограмма на рис. 3 иллюстрирует механизм ударно-волнового инициирования ЖВВ. Ударные волны, возникающие при разряде энергоемкого (единицы—десятки джоулей) накопителя (например заряженного конденсатора), вызывают детонацию на стенках сосуда с ЖВВ, на свободной поверхности ЖВВ, на кавитационных пузырьках, на пузырьках газа, находящихся в ЖВВ, т. е. везде, кроме границ канала разряда. При этом задержки возбуждения детонации существенно зависят от расстояний от канала до перечисленных неоднородностей в ЖВВ, а так-же от чувствительности ЖВВ и энергии накопителя. Аналогично происходит и инициирование ЖВВ при взрыве мостика.

Ну, а если в тех же условиях ограничить энергию в канале разряда (до десятых, сотых долей джоуля), включив, например, последовательно с разрядником небольшую емкость? После пробоя эта емкость зарядится, ток перестанет течь через канал, канал начнет остывать (в том числе и за счет расширения)... Значит, и вероятность взрыва уменьшится? Парадоксально, но с точностью наоборот: задержка возбуждения детонации заметно уменьшается, возрастает ее стабильность, детонация возбуждается непосредственно от границ канала. Это демонстрирует рис. 4.

Физика этого процесса до конца не изучена. Наиболее вероятно следующее предположение: канал разряда неоднороден по структуре как по его сечению, так и по длине. В процессе развития канала возможно его разделение на ряд отдельных (в том числе и незамкнутых) ветвей. Траектория канала по длине имеет резкие изгибы. Все это может, по-видимому, приводить к неустойчивости части поверхности парогазовой области, в том числе к образованию микроструй, вызывающих локальный интенсивный разогрев паров ЖВВ. Затем детонация от образованного очага распространяется в объеме ЖВВ с постоянной скоростью. В случае же продолжительного протекания тока в канале создается противодавление, препятствующее развитию неустойчивости. Этот механизм проявляется только при пробое длинных промежутков (5–10 мм).

А теперь в тех же условиях будем увеличивать напряжение пробоя до нескольких десятков киловольт, сохраняя прежней энергию разряда и

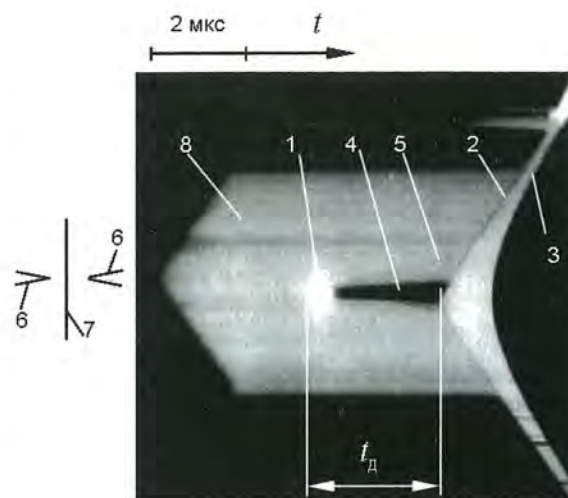


Рис. 4. Возбуждение детонации в ЖВВ в опытах с ограничением энергии: 1 — свечение канала разряда; 2 — фронт детонации в ЖВВ; 3 — выход детонации на внутреннюю поверхность стенки сосуда (оргстекло); 4 — парогазовая полость; 5 — ударная волна в ЖВВ; 6 — электроды разрядников (расстояние между электродами 5 мм); 7 — изображение щели фоторегистратора; 8 — фон (импульсная подсветка за разрядником);  $t_d$  — задержка возбуждения детонации

даже уменьшая ее. Происходит смена механизма инициирования. Задержка возбуждения детонации уменьшается до значений  $<1$  мкс, детонация возбуждается только на канале, причем в одной-двух точках (микрообластях, сопоставимых по размерам с критическим диаметром детонации) по длине канала, детонация распространяется в объеме ЖВВ с постоянной скоростью. Я назвал этот механизм ионизационным, поскольку он проявляет себя только в сильных электрических полях, когда значительная часть энергии электронов при пробое тратится на ионизацию атомов и молекул вещества. На рис. 5 этот механизм продемонстрирован во всей разноцветной красоте.

При уменьшении межэлектродного промежутка до 0,1–0,2 мм энергия инициирования, которую можно рассматривать как энергию пробоя, оценивается  $\sim 10^{-4}$  Дж, а задержки детонации сокращаются до единиц-десятков наносекунд.

Время замыкания межэлектродного промежутка с электропрочными ЖВВ составляет доли наносекунды (после зажигания разряда на электродах), поэтому при оценке энергии инициирования необходимо рассматривать конкретную форму электродов и конечную скорость

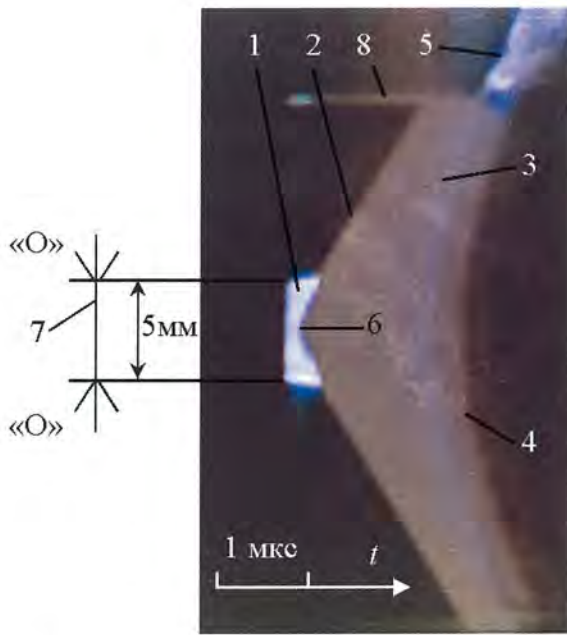


Рис. 5. Возбуждение детонации в ЖВВ по ионизационному механизму: 1 — свечение канала разряда; 2 — фронт детонации в ЖВВ; 3 — выход детонации на внутреннюю поверхность стенки сосуда (стекло); 4 — выход ударной волны на внешнюю поверхность стенки сосуда; 5 — разлет продуктов взрыва; 6 — область возбуждения детонации; 7 — изображение щели фоторегистратора; 8 — поверхность ЖВВ

распространения электромагнитных волн в ЖВВ. Для регистрации таких высокоскоростных процессов обычных фоторегистраторов и даже высокочувствительных фотопленок явно не хватает, поэтому приходится применять более скоростные и чувствительные регистраторы с электронно-оптическими преобразователями (ЭОП). На рис. 6 приведена типичная фотохронограмма инициирования ЖВВ по ионизационному механизму, полученная с применением ЭОП.

Характерной особенностью ионизационного механизма является то, что достаточные условия (необходимый разогрев) могут быть достигнуты в процессе формирования разряда до замыкания межэлектродного промежутка ионизированным каналом. Очередная фотохронограмма (рис. 7) иллюстрирует данное утверждение. В представленном эксперименте межэлектродный промежуток в виде протяженной щели шириной 0,04 мм образовывался кромками электродов в виде тонких пластинок, что могло приводить к зажиганию разряда одновременно (с точностью менее одной наносекунды) и независимо в двух

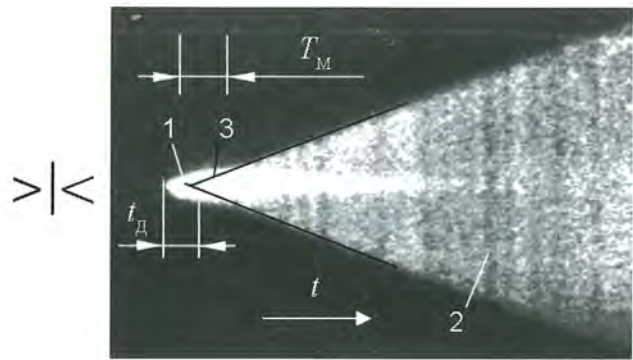


Рис. 6. Иницирование ЖВВ по ионизационному механизму в малых межэлектродных промежутках: 1 — свечение канала разряда; 2 — свечение фронта детонации; 3 — условные линии детонационного фронта;  $t_D$  — условная задержка детонации;  $T_M = 20$  нс

(в некоторых экспериментах в трех) точках. Замыкание промежутка любым из каналов сопровождается яркой вспышкой, вызванной протеканием тока по внешней цепи. При этом слабое свечение других «каналов» может быть обусловлено только начальными ионизационными процессами в жидкости. Из рис. 7 видно, что завершённый пробой произошел по первому каналу, а инициирование произошло от незавершённого разряда.

Очень наглядно это можно проиллюстрировать на примере жидких ВВ, в которых в качестве окислителя используется высококонцентрированная азотная кислота. Эти ЖВВ имеют более высокую электрическую проводимость, в



Рис. 7. Иницирование ЖВВ незавершённым искровым разрядом: 1 — завершённый разряд; 2 — незавершённый; 3 — детонация

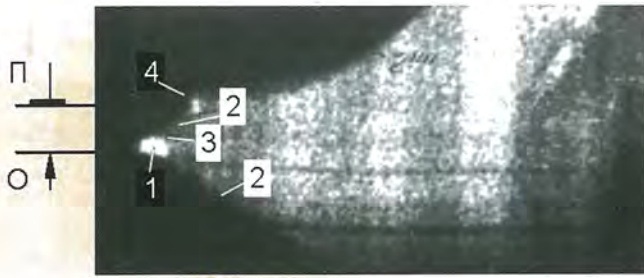


Рис. 8. Лидерное инициирование ЖВ:  
 1 — свечение лидера и формирующегося канала;  
 2 — фронт детонации;  
 3 — область возбуждения детонации;  
 4 — пробой между фронтом детонации и электродом типа «плоскость» (П). Расстояние между острием и плоскостью 0,5 мм

результате чего замыкание электродов происходит с замедленными скоростями, что позволяет более четко фиксировать все фазы пробоя и возбуждения детонации. На рис. 8 приведен пример лидерного (название автора) инициирования раствора динитробензола в азотной кислоте.

В электродной системе «острие — плоскость» зажигание происходит всегда на «острие». Лидер медленно (несколько миллиметров в микросекунду) продвигается в сторону «плоскости». Подпитка лидера осуществляется от внешнего



Рис. 9. Лидерное инициирование ЖВВ двенадцатью параллельно включенными разрядниками. Межэлектродное расстояние 0,2 мм. Яркое свечение внизу — реперная отметка (пробой обостряющего разрядника)

источника. При некоторой критической напряженности электрического поля на головке лидера достигается необходимый разогрев ЖВВ для развития устойчивой химической реакции. При снижении напряжения на разряднике лидер проходит большее расстояние до момента возбуждения детонации.

Этот механизм позволяет включать несколько искровых разрядников параллельно без применения развязывающих элементов (если, конечно, источник питания позволяет поддерживать высокое напряжение на всей группе разрядни-

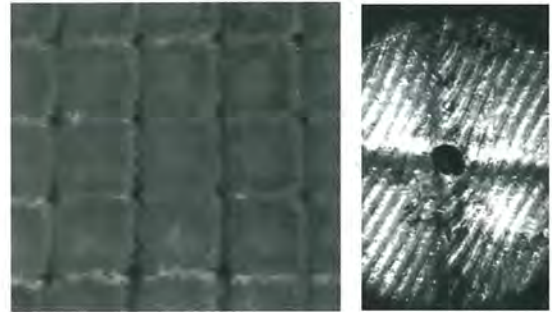


Рис. 10. Отпечатки на пластине-свидетеле следов столкновения детонационных волн в ЖВВ при электроискровом инициировании

ков). Пример группового инициирования при использовании механизма лидерного инициирования приведен на рис. 9.

На рис. 10, а показан фрагмент пластины-свидетеля, на которой отпечатались следы столкновения детонационных волн, распространяющихся в ЖВВ от искровых разрядников, размещенных в углах квадратов со стороной 5 мм. На рис. 10, б показан еще более крупный фрагмент следа столкновения четырех детонационных волн, инициированных четырьмя разрядниками.

Одним дотошным читателям автор представляет возможность самим определить, с каким временным разбросом срабатывают разрядники, другим — определить, где же лучше всего применить жидкие взрывчатые вещества и их электроискровое инициирование.

**ЗОТОВ Евгений Владимирович** —  
 начальник лаборатории ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ,  
 доктор техн. наук