

Таким образом:

- экспериментально показана возможность использования импульсного лазерного излучения для инициирования взрывчатого превращения в тонких слоях СВС с разновременностью, не превышающей 50 нс на больших поверхностях;
- выявлено влияние распределения плотности энергии в пятне облучения на поверхности заряда на разновременность возбуждения ДВ в СВС;
- определено значение плотности энергии ЛИ ( $Q_{\text{опт}} = 10 \pm 2$  Дж/см<sup>2</sup>), достижение которой по всему пятну облучения на поверхности заряда из исследуемого СВС на основе гексогена позволяет обеспечить получение ДВ с разновременностью не более 50 нс.

### Список литературы

1. German V.N., Fisenko A.K., Khokhlov N.P. Laser radiation induced detonation in HE samples produced by thermovacuum deposition // Proc. of the 1998 Life Cycles of Energetic Material. Conference, 29 March – 1 April 1998, Fullerton, USA. P.67
2. Ю.В.Шейков, С.М.Батьянов, О.Н.Калашникова, О.М.Луковкин, Д.В.Мильченко, С.А.Вахмистров, А.Л.Михайлов О механизме инициирования алюминизированных бризантных взрывчатых веществ лазерным излучением // ФГВ. 2018, т. 54, № 5 с.57- 60.
3. Способ изготовления термостойких светочувствительных взрывчатых составов и светодетонаторов на их основе. О.М.Луковкин, Ю.В.Шейков, С.М.Батьянов, С.А.Вахмистров, О.Н.Калашникова, Д.В.Мильченко. Патент РФ № 2637016 от 29.10.2017.

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ ДЕТОНАЦИИ В ВОЗДУШНОЙ И ВОДНОЙ СРЕДАХ ПРИ ВЗРЫВЕ ГРЕМУЧЕГО ГАЗА, ЗАКЛЮЧЕННОГО В УПРУГУЮ ОБОЛОЧКУ

*В.А. Васекин, Д.В. Гелин, Н.Д. Гелин, Д.А. Лысов, В.А. Марков, М.В. Маркова, А.В. Петюков, М.Ю. Сотский*

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Изучение детонационных волн в газах началось достаточно давно, однако в настоящее время вновь наблюдается всплеск интереса к этим явлениям. Продиктовано это, главным образом, стремлением использовать явление детонации в газовых смесях для практических целей в оригинальных импульсных установках и специальных энергетических системах для летательных аппаратов и ракет, в том числе и прототипах импульсного детонационного двигателя.

Известно, что детонационная волна может быть создана двумя разными способами: прямым инициированием и через так называемый процесс перехода горения в детонацию.

В первом случае достаточно мощный источник создает интенсивную ударную волну, за фронтом которой начинается химическая реакция – формируется детонационная волна. Такая ударная волна требует высокой плотности энергии источника.

Во втором случае для воспламенения газовой смеси в трубе используется источник с относительно малой энергией, такой, как искровая свеча зажигания. Турбулизация потока происходит и в гладких трубах; за счет этого увеличивается площадь поверхности пламени. При ускоряющемся движении фронта пламени перед ним формируется волна сжатия. Такая волна увеличивает турбулентность горючего газа, что в свою очередь приводит к дальнейшему ускорению движения фронта пламени и повышению давления перед ним. Возмущения на фронте складываются, его крутизна растет, и в результате возникает ударная волна, сопровождаемая химической реакцией, а значит, и детонация. Наши эксперименты основаны именно на этом физическом процессе.

Целями данной работы являются:

- Изучение механизмов перехода горения в детонацию при различных начальных условиях эксперимента.
- Экспериментальное исследование передачи детонации через воздух и через жидкую среду (воду) от активного заряда, состоящего из газовой смеси, заключённой в упругую оболочку, к пассивному заряду, также состоящему из газовой смеси, заключённой в упругую оболочку.

### Постановка эксперимента

Эксперименты проведены на лабораторной установке, созданной на кафедре «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана [1-4]. Установка представляет собой ударную трубу, изготовленную из прозрачной гладкостенной трубки из оргстекла длиной 1000 мм с внешним диаметром 40 мм и внутренним диаметром 30 мм. Трубка закреплена вертикально на специальном штативе. Ее нижняя часть помещена в металлический кожух. Кожух выполняет две задачи: 1) предотвращение разрыва трубки во время подрыва активного заряда; 2) подвод системы инициирования к активному заряду.

Активный заряд представляет собой наполненную газовой смесью упругую оболочку, помещённую в нижнюю часть ударной трубы. Пассивный заряд также представляет собой наполненную газовой смесью упругую оболочку, помещённую в верхнюю часть ударной трубы на заданном расстоянии от активного заряда. Акустическим импедансом упругих оболочек зарядов можно пренебречь в силу его малости.

По условиям экспериментов промежутки между зарядами был заполнен либо воздухом, либо жидкостью (водой).

Инициирование активного заряда осуществлялось электрическим разрядом с использованием автомобильной свечи зажигания в специальном иницирующем устройстве. Иницирующее устройство, связанное с активным зарядом гибкой прозрачной трубкой, позволяет с помощью системы клапанов накопить газовую смесь в камере сгорания, гибкой прозрачной трубке и активном заряде, осуществить в нужный момент времени воспламенение смеси и передать импульс к активному заряду. Установка располагалась во взрывной камере. Подсветка и видеорегистрация процессов осуществлялись через иллюминаторы высокоскоростной видеокамерой Phantom 1610. Скорость видеосъёмки составляла 84000 кадр/с.

Для создания четкой границы между зарядами и жидкостью была разработана методика подачи газа в пассивный заряд с одновременным использованием дренажной трубки для откачки воздуха, находящегося в ударной трубе.

В качестве взрывчатого вещества в экспериментах использовалась кислородо-водородная смесь в соотношении, близком к стехиометрическому. Для достижения постоянства состава газовой смеси система продувалась кислородо-водородной смесью не менее 5 мин.

### Результаты экспериментов

#### Эксперимент 1

Активный заряд:  $L=350$  мм; пассивный заряд:  $L=415$  мм; воздушный зазор:  $L=230$  мм. На кадрах видеорегистрации наблюдается следующее (рис. 1): по активному заряду (вверх по трубе) движется фронт горения со скоростью 850 м/с, затем при достижении границы раздела сред образуется отраженная ударная волна, которая распространяется вниз по трубе со скоростью 1470 м/с и постепенно затухает. После разрушения оболочки активного заряда по воздушной среде вверх бежит ударная волна со скоростью 1340 м/с, сопровождаемая продуктами детонации активного заряда. В пассивном заряде волна распространяется со скоростью 2846 м/с. Происходит инициирование пассивного заряда в режиме детонации.



Рисунок 1. Видеорегистрация эксперимента № 1

### Эксперимент 2

Активный заряд:  $L=400$  мм; пассивный заряд:  $L=320$  мм; воздушный зазор:  $L=237$  мм. Видеорегистрация показывает следующее (рис. 2): считаем, что инициирование активного заряда сразу происходит в режиме детонации, так как волна распространяется вверх по активному заряду со скоростью 2753 м/с. В момент достижения границы раздела происходит распад контактного разрыва – вверх уходит ударная волна вместе с продуктами детонации (скорость волны 1270 м/с), вниз – отраженная ударная волна. Далее происходит возбуждение детонации в пассивном заряде и распространение детонации по пассивному заряду (скорость детонационной волны – 2925 м/с).

Таким образом, в эксперименте 2 мы также наблюдаем передачу детонации от активного заряда к пассивному через прослойку воздуха.

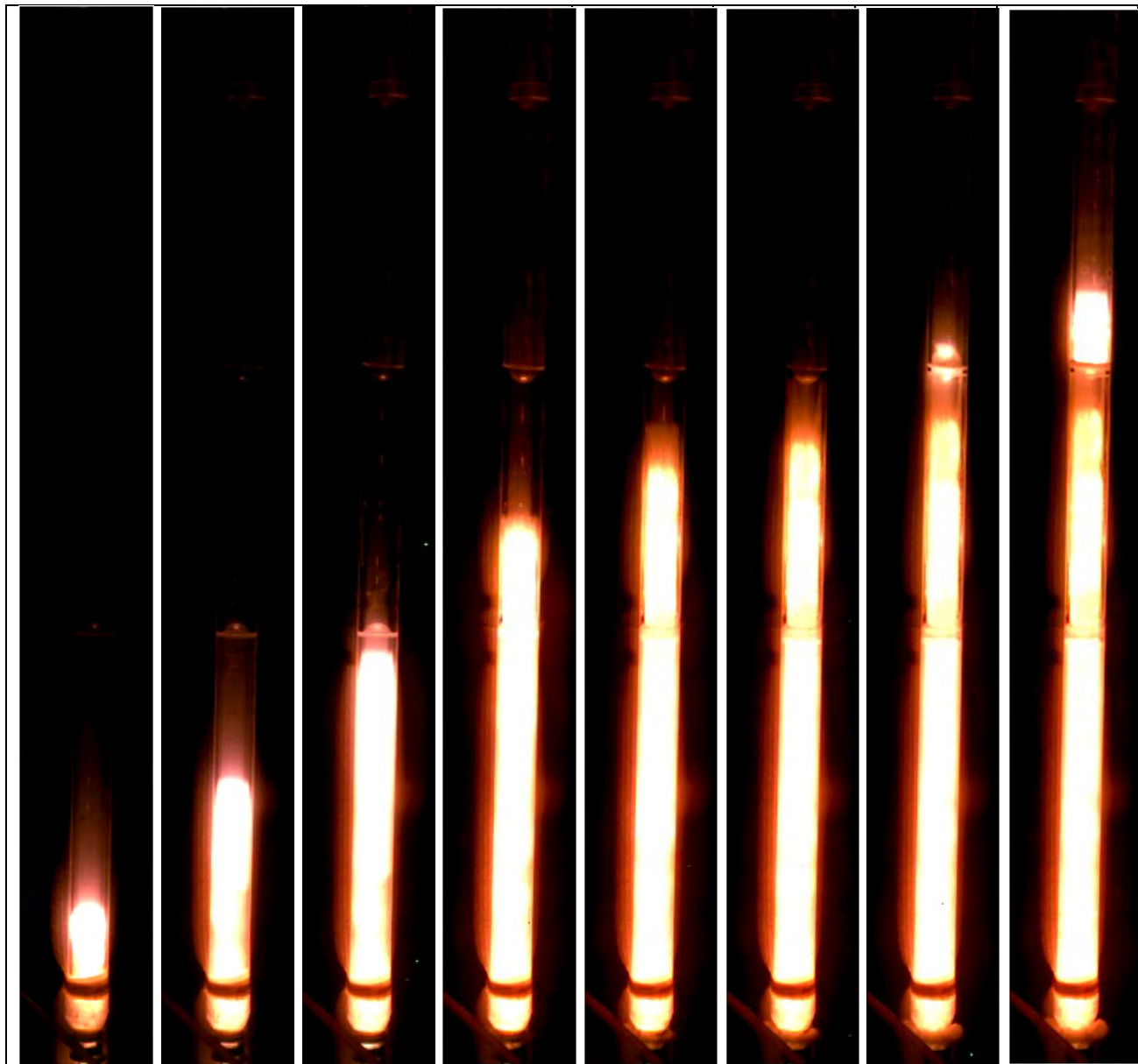


Рисунок 2. Видеорегистрация эксперимента № 2

### Эксперимент 3

Активный заряд:  $L=400$ мм; пассивный заряд:  $L=500$ мм; зазор, заполненный жидкостью (водой):  $L=10$  мм. На видеорегистрации наблюдается следующее (рис. 3): инициирование активного заряда происходит в режиме горения (волна распространяется вверх по трубке со скоростью 708 м/с); вследствие поджатия газа в отраженной волне происходит образование очага детонации у верхней границы активного заряда. Затем детонационная волна распространяется вниз по трубке по всей длине активного заряда со скоростью 2216 м/с. Вместе с этим продукты детонации, увлекая за собой упругую оболочку, сообщают импульс воде, которая, как поршень, вдавливает оболочку пассивного заряда. После того, как детонационная волна в активном заряде достигает нижнего торца, происходит ее отражение и вверх начинает распространяться отраженная ударная волна со скоростью примерно 1500 м/с. Далее происходит инициирование пассивного заряда в режиме детонации и распространение детонационной волны вверх по заряду.

Таким образом, в эксперименте 3 мы наблюдаем передачу детонации от активного заряда к пассивному через зазор толщиной 10 мм, заполненный жидкостью (водой).



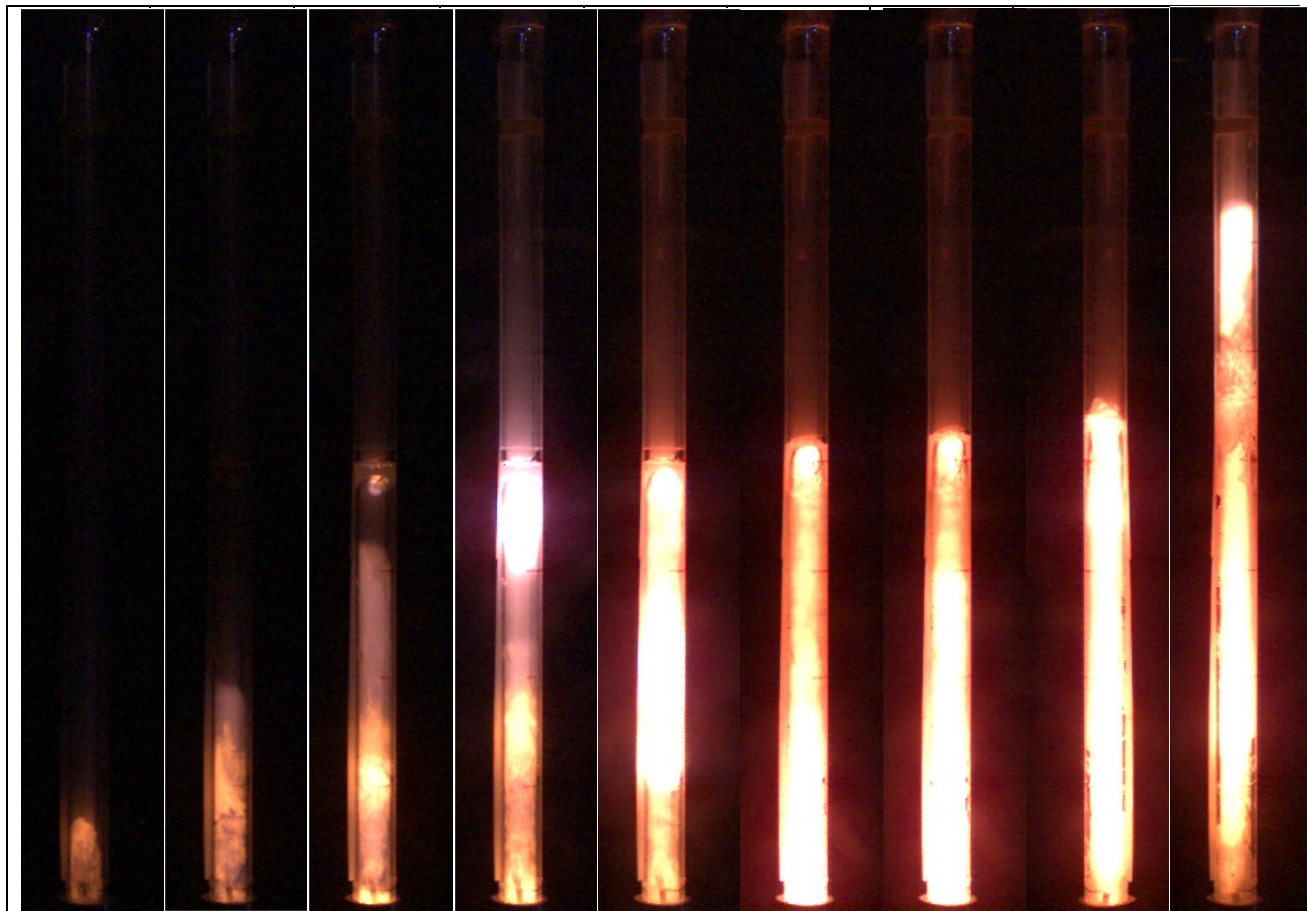


Рисунок 3. Видеорегистрация эксперимента № 3

#### Выводы:

- показана возможность изучения механизмов перехода горения в детонацию с помощью оптических методов регистрации быстропротекающих процессов;
- экспериментально доказана передача детонации через зазоры определенных размеров, заполненные различными средами (воздух, вода).

Результаты экспериментов могут быть использованы для валидации численных моделей исследованных процессов.

Работа выполнена с использованием оборудования ГЗ 3.6196.2017/7.8 и ГЗ 3.6257.2017/7.8.

#### Список литературы

1. Определение параметров взрыва кислородно-водородной смеси в упругой оболочке с помощью модуля ударно-волновых исследований «научно-экспериментального комплекса кафедры СМ4 МГТУ им. Н.Э. Баумана» / Гелин Д.В., Лысов Д.А., Марков В.А., Маркова А.Е., Селиванов В.В. // Труды Международной конференции XVII Харитоновские тематические научные чтения «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. С. 773-775.
2. Патент 2619501 Российской Федерации. Исследовательская пусковая установка / Гелин Д.В., Гелин Н.Д., Лысов Д.А., Марков В.А., Марков И.В., Селиванов В.В., Сотская М.М., Сотский М.Ю. Оpubл. в 2017, Бюл. № 14.
3. Патент 2625404 Российской Федерации. Способ ускорения тела в баллистическом эксперименте и устройство для его осуществления / Гелин Д.В., Гелин Н.Д., Лысов Д.А., Марков В.А., Марков И.В., Селиванов В.В., Сотская М.М., Сотский М.Ю. Оpubл. в 2017, Бюл. № 20.
4. Наблюдение нестационарных процессов в баллистических опытах для верификации расчетных моделей / Сотский М.Ю., Гелин Д.В., Гелин Н.Д., Лысов Д.А., Марков В.А., Марков И.В., Селиванов В.В., Сотская М.М. // Материалы XXIII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т. 2. М.: ООО «ТР-принт», 2017. С. 170-172.