

УДК 662.215.1

## ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ ТЭНА УДАРНИКОМ И ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНЫМ ПОТОКОМ ГАЗА

А. П. Ершов, А. О. Кашкаров, Э. Р. Прууэл

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, ers@hydro.nsc.ru

Проведено сравнение двух вариантов околопредельного инициирования тэна насыпной плотности: ударом пластины и внедрением в порошок интенсивного потока горячих газов. Использовалась синхротронная диагностика плотности вещества. Оба способа приводят к развитию детонации за время порядка 10 мкс, однако природа инициирования резко различается. При инициировании непроницаемым поршнем формируется плотная пробка сжатого материала, от фронта которой после некоторой задержки отделяется волна, развивающаяся за счет реакции в нормальную детонацию. При высокоэнтальпийном инициировании потоком горячих газов сжатие порошка невелико и процесс развивается в газопроницаемом веществе, начиная со стадии быстрого конвективного горения с последующим переходом в детонацию.

Ключевые слова: инициирование, детонация, горение, переход горения в детонацию.

DOI 10.15372/FGV20160113

### ВВЕДЕНИЕ

Классический сценарий перехода горения порошкообразных взрывчатых веществ (ВВ) в детонацию (ПГД), описанный, например, в [1], состоит из следующих основных этапов. Вначале в окрестности воспламенителя происходит медленное послыйное горение. Рост давления приводит к проникновению горения в поры, в результате чего развивается гораздо более быстрое конвективное горение, скорость распространения которого достигает сотен метров в секунду. По мере ускорения волны создаются условия, при которых сжатие вещества вызывает заметную химическую реакцию, и формируется волна низкоскоростной детонации, в свою очередь переходящая в нормальную детонационную волну. Поскольку начальный этап послыйного горения медленный, такой процесс занимает значительное (по сравнению с типичным детонационным) время — порядка сотен микросекунд — и поэтому реализуется при поджигании ВВ, заключенных в прочные оболочки.

В ряде работ [2–6] нами исследовалось инициирование пористых ВВ высокоэнтальпийным потоком газа. Поток создавался электри-

ческим взрывом проволоочки, прорывом продуктов горения из отдельной камеры после разрушения мембраны либо потоком продуктов газовой детонации. Во всех этих ситуациях реализовался один и тот же сценарий развития детонации: частицы ВВ воспламенялись потоком горячего газа, начиналось быстрое конвективное горение с начальной скоростью порядка 1 км/с, которое развивалось до нормальной детонации за время около 10 мкс. Такое ускорение ПГД объясняется исключением медленной стадии послыйного горения. Поскольку это время много меньше времени типичного классического ПГД, прочная оболочка не требуется. Детонация может быть реализована при диаметре заряда начиная с нескольких миллиметров. В частности, инициирование возможно в габаритах стандартного детонатора.

В последнее время новые результаты, полученные с помощью методики синхротронного просвечивания [7, 8], подтвердили эти представления. Для синхронизации процесса с работой ускорителя, порождающего синхротронное излучение (СИ), инициирующий поток газа генерировался взрывом небольшого активного заряда ВВ. Параметры потока за воздушной ударной волной, падающей на исследуемый заряд, были близки к тем, которые достигались при описанных выше способах инициирования, что приводило к совершенно аналогичной динамике процесса. Ударная волна в воздухе, таким образом, генерировала состояние газа с

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-03-00077) и программы Президиума РАН № 2 (проект № 7).

высокой энтальпией, достаточной для воспламенения порошка после проникновения потока в поры. Механическое воздействие воздушной волны было незначительным. Отметим, что к сходным выводам пришли авторы работы [9], изучавшие передачу детонации через воздушный зазор. Согласно [9] проникающий в поры газ поджигает частицы ВВ. При достаточно энергичной инжекции горение не затухает и далее за счет выделения газа в реакции ускоряется, переходя в детонацию также за время около 10 мкс. Для успешного инициирования достаточно начального давления торможения инициирующего потока несколько сотен атмосфер.

Это давление значительно меньше, чем требуется при инициировании порошка ударной волной (см., например, [10, 11]). Плавный фронт распространяющейся волны и слабое сжатие вещества в ней [2, 4] также отличаются высокоэнтальпийное инициирование от ударно-волнового. Однако при инициировании слабой ударной волной время развития детонации также может быть порядка нескольких микросекунд, что позволяет допускать сходную природу этих процессов.

К ударному инициированию примыкает подход (см. обзор [12]), при котором переход горения в детонацию происходил в отсутствие воспламенителя — заряд ВВ нагружался ударом поршня, движущегося со скоростью порядка 100 м/с. Мотивацией такого подхода было стремление получить более контролируемый одномерный процесс. Авторы выделяют отличный от классического [1] сценарий, названный ПГД типа 1: вначале ударник сжимает порошок и формируется плотная область, которая затем сравнительно медленно расширяется. На границе ВВ и ударника начинается воспламенение, после чего сжатие ускоряется, и в пределах уплотненной области возникает практически непроницаемая пробка. Разгон этой пробки продуктами горения приводит к формированию ударной волны в сжатом порошке, которая далее переходит в детонационную. По поводу классического сценария, в особенности конвективного этапа, высказывается довольно скептическое мнение, хотя допускается конвективный перенос по продольным каналам, формируемым в порошке напором газов, особенно при низкой плотности заряда.

Поэтому представляет интерес прямое сравнение инициирования высокоэнтальпийным потоком с инициированием непроницае-

мым ударником. Для сравнения, естественно, требуется соблюдать по возможности одинаковые условия эксперимента. В данной работе описаны результаты таких опытов с применением синхротронного просвечивания. Диагностика плотности по поглощению СИ позволяет невозмущающим методом проводить наблюдения внутри исследуемого вещества. Сравнение двух подходов, проведенное по возможности в идентичных условиях опыта, позволяет с максимальной наглядностью различать процессы, характерные для каждой постановки.

## ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Как и в [8], исследовался заряд тэна диаметром 16 мм и длиной 25 мм, насыпной плотности ( $1 \text{ г/см}^3$ ) в тонкой пластиковой оболочке. Размер частиц ВВ составлял  $\approx 0.3 \text{ мм}$ . В случае высокоэнтальпийного инициирования на открытый торец заряда воздействовал поток горячего газа, созданного взрывом навески тэна. В варианте инициирования ударником активный заряд разгонял алюминиевую пластинку, которая затем воздействовала на торец заряда. Динамика инициирования определялась с помощью синхротронной диагностики. Исследуемый заряд просвечивался пучком СИ от ускорителя ВЭПП-3 (Сибирский центр синхротронного излучения). Поглощение пучка определяется массой на луче, в простейшем случае — произведением плотности на толщину образца ( $\rho d$ ). В довольно грубом приближении (в пренебрежении поперечным расширением образца) можно по профилям  $\rho d$  судить о средней по лучу плотности. Площадь сечения пучка СИ  $20 \times 0.1 \text{ мм}$ . Излучение воспринималось линейным газовым детектором с

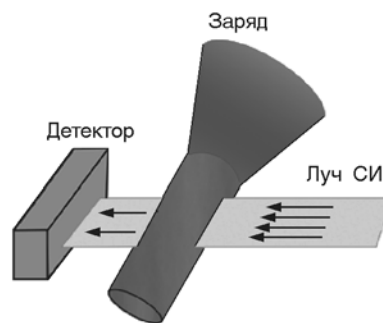


Рис. 1. Геометрия эксперимента

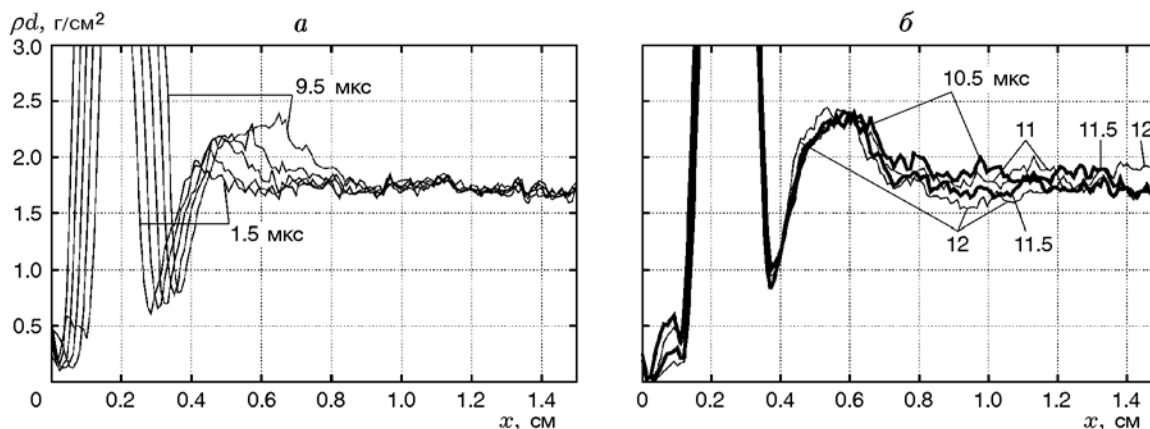


Рис. 2. Околопредельное инициирование ударником:

*a* — интервал времени 1.5 ÷ 9.5 мкс с момента касания ударника и заряда, промежуток между профилями 2 мкс; *б* — конечная стадия инициирования, промежуток между профилями 0.5 мкс

пространственным разрешением 0.1 мм. Использовалось продольное просвечивание заряда (рис. 1). При этом непосредственно наблюдаются волны сжатия, распространяющиеся по заряду. Для процесса высокоэнтальпийного инициирования ранее [8] были получены также данные поперечного рентгенографирования в ряде сечений заряда.

Активный заряд подбирался так, чтобы инициирование осуществлялось на пределе. При этом детонация в обоих вариантах развивалась примерно за 10 мкс, считая от времени начального воздействия.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При инициировании газовым потоком в пористый заряд проникает горячий газ, воспламеняющий частицы вблизи границы заряда, тогда как при воздействии ударником внешний газовый поток отсекается и реакция в конденсированной фазе вызывается прежде всего механической деформацией порошка.

На рис. 2 показана динамика массы на луче при инициировании заряда тэна плотностью 1.05 г/см<sup>3</sup> алюминиевым ударником — пластиной толщиной 1.5 мм. Ударник разгонялся давлением газов, произведенным взрывом навески ВВ, расположенной на расстоянии несколько сантиметров. Скорость ударника близка к критической — 125 м/с. Ударнику соответствует высокий (зашкаливающий) пик слева. Поскольку плоскость луча СИ горизонтальна, при продольном рентгенографировании горизонтальна и ось заряда. Для фиксации грани-

цы порошка между торцом заряда и ударником помещалась пороносовая вставка плотностью  $\approx 0.2$  г/см<sup>3</sup>, которая практически не мешала разгону пластины. Этой вставке на профилях  $\rho d$  соответствует провал справа от ударника, далее следует собственно заряд.

Вначале (рис. 2, *a*) образуется плотная пробка, динамика которой весьма медленна (скорость фронта около 400 м/с). Реакций в пробке и последующего разлета вещества не происходит — напротив, плотность растет. В пренебрежении боковым расширением плотность в пробке возрастает приблизительно в 1.4 раза, т. е. по крайней мере до 0.83 от кристаллической (ТМД). Однако к моменту  $t \approx 10$  мкс на переднем фронте сжатой области формируется волна, быстро ускоряющаяся до  $\approx 3$  км/с (рис. 2, *б*, интервал времени 11 ÷ 11.5 мкс). К моменту  $t = 12$  мкс фронт волны выходит за пределы области наблюдения. На двух последних профилях видно падение плотности за фронтами волн, вызванное газодинамическим разлетом вещества, что говорит о включении химической реакции. В пределах сжатой пробки по-прежнему нет заметной реакции (плотность порошка в ней не падает), при этом пробка медленно сдвигается влево под действием давления продуктов реакции.

В описанном выше опыте разгон ударника происходил до взаимодействия с образцом ВВ. В несколько упрощенной постановке ударник устанавливался вплотную к заряду и, таким образом, сам являлся фиксирующей границей. В этом случае воздействие на порошок было более плавным и фронт сжатия в порошке рас-

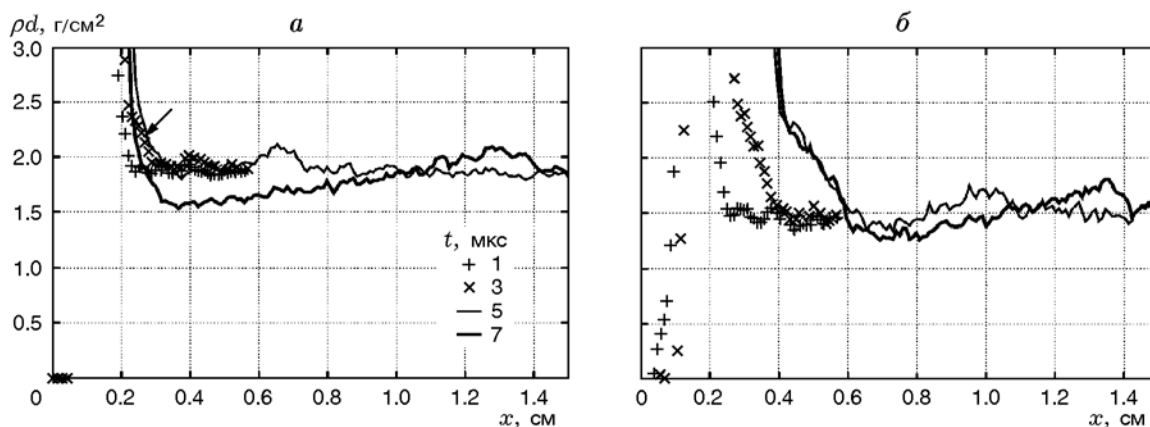


Рис. 3. Околопредельное инициирование ударником, расположенным вплотную к заряду: *а* — диаметр ударника равен диаметру заряда, *б* — диаметр ударника больше диаметра заряда

пространялся медленнее. На рис. 3, *а* показаны данные такого опыта. Сжатую пробку можно видеть в момент времени  $t = 3$  мкс (указано стрелкой). Здесь также возникает волна инициирования, причем заметно быстрее: в интервале  $5 \div 7$  мкс ее средняя скорость достигает  $3$  км/с. При  $t = 7$  мкс хорошо виден газодинамический разлет за счет химической реакции, а также смещение ударника назад давлением продуктов взрыва.

Для исключения прорыва разгоняющих ударник газов в части экспериментов использовался ударник большего диаметра, также установленный вплотную к заряду. Результаты показаны на рис. 3, *б*. В такой постановке оболочка заряда тоже деформируется ударником и рост массы на луче в ближней зоне перед ударником обусловлен частично «сгребанием» оболочки. При этом становится сложнее выделить сжатую пробку ВВ. Тем не менее из рис. 3, *б* видно, что на начальном этапе в течение  $2 \div 3$  мкс фронт волны уплотнения находится вблизи ударника и его скорость не превосходит  $600$  м/с при скорости ударника  $\approx 120$  м/с. В интервале  $3 \div 5$  мкс начинается выделение отдельного фронта волны от общего уплотнения перед ударником с последующим ускорением фронта. В обоих случаях, показанных на рис. 3, волна инициирования становилась отдельно различимой и начинала заметно ускоряться на глубине примерно  $4$  мм.

Можно сделать вывод, что инициирование слабой волной сжатия происходит следующим образом. Ударник создает плотную пробку сжатого порошка, которая расширяется со

скоростью сотни метров в секунду. С задержкой в несколько микросекунд от фронта пробки отделяется волна сжатия, за которой существенно химическая реакция. Нормальная детонационная волна развивается за время порядка  $10$  мкс. Наиболее четко такая картина наблюдается в постановке, соответствующей рис. 2.

Инициирование высокоэнтальпийным потоком происходит совершенно по-другому. Постановка эксперимента, насколько это возможно, повторяла описанную выше, но вместо алюминиевого ударника инициирующим агентом был поток горячего воздуха, созданный взрывом небольшого активного заряда тэна. Естественно, этот заряд был меньше того, который требовался для разгона ударника, и подбирались так, чтобы обеспечить развитие детонации за то же время — около  $10$  мкс. Такое условие выполнялось при скорости падающей воздушной ударной волны  $2.6$  км/с, что соответствует скорости потока  $2.2$  км/с. При торможении потока на границе исследуемого заряда достигались давление газа  $\approx 70$  МПа и температура  $\approx 5000$  К.

Результаты такого опыта показаны на рис. 4. Вначале (рис. 4, *а*) скорость волны порядка  $500$  м/с. Сжатие порошка на этой стадии незначительно — около  $17\%$ . Однако в интервале  $7.5 \div 8.5$  мкс (рис. 4, *б*) средняя скорость фронта сжатия возрастает до  $\approx 3.5$  км/с, и на этих профилях заметен газодинамический разлет в результате химической реакции. Следовательно, в интервале  $5 \div 7.5$  мкс волна становится самоподдерживающейся и разгоняется

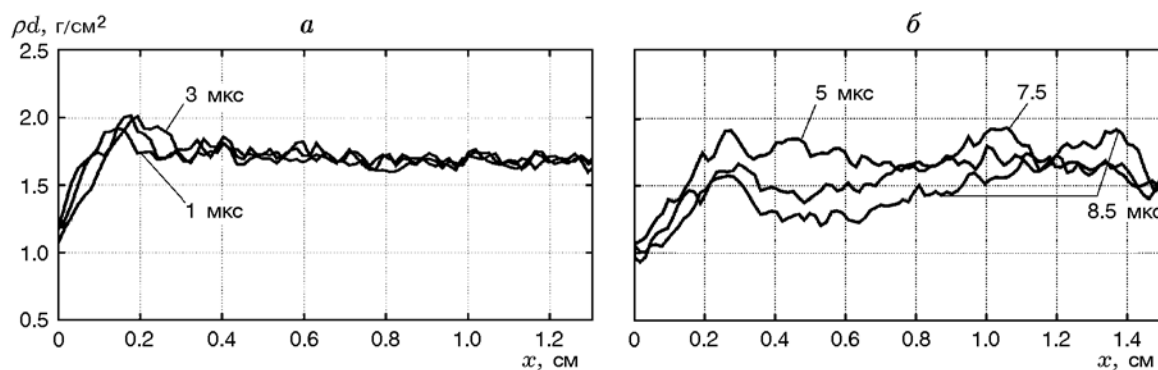


Рис. 4. Околопредельный режим инициирования высокоэнтальпийным потоком

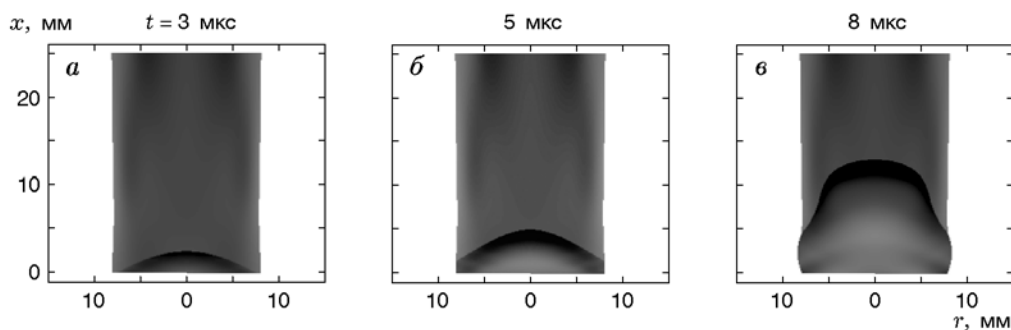


Рис. 5. Двумерные распределения плотности, восстановленные из данных СИ при высокоэнтальпийном инициировании

за счет реакции за фронтом. Нормальная для наших условий скорость детонации ( $\approx 5$  км/с) устанавливается еще через  $1 \div 2$  мкс. В отличие от экспериментов с ударниками, в этой постановке заметна также реакция в сжатой области, примыкающей к торцу заряда (локальный максимум  $\rho d$  опускается со временем). Воспламенение здесь, очевидно, вызвано воздействием проникающих в порошок газов. Присутствие газов (как инжестрированных извне, так и выделившихся при горении) уменьшает сжимаемость среды, чем и объясняется незначительная деформация в начале процесса.

Отметим, что на рис. 4,б профиль, соответствующий 5 мкс, сильно размазан, что затрудняет выделение фронта волны. Как показали более детальные измерения, в том числе с использованием поперечного рентгенографирования [8], на этой стадии фронт волны заметно искривлен и поэтому в продольной проекции существенно размывается. Это иллюстрируют томографические «кадры», извлеченные из

всей совокупности данных СИ, которые показаны на рис. 5. В промежуточное время  $t = 5$  мкс как искривление фронта, так и распределение плотности за ним способствуют размыванию одномерных продольных профилей. При меньшем времени, например  $t = 3$  мкс, эти эффекты слабее. В более поздние моменты ( $t = 8$  мкс) заметная неоднородность в наружной части заряда возмещается формированием сильной волны сжатия с незначительно искривленным фронтом в осевой части.

Несмотря на указанные осложнения интерпретации, можно утверждать, что при высокоэнтальпийном инициировании в течение всего времени наблюдения не происходит существенного сжатия вещества, которое характерно для инициирования ударником (ср., например, рис. 2 и 4). Поэтому на начальной стадии пористый скелет сохраняет высокую газопроницаемость, что и позволяет развиваться процессу быстрого конвективного горения.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При иницировании ударником постановка эксперимента сходна с описанной в [12]. Последовательность событий в целом укладывается в сценарий, описанный в [12] как ПГД типа 1. Хотя некоторые детали этого процесса (такие, как медленное горение в окрестности ударника или возникновение тонкой монокристаллической пробки) в наших экспериментах не разрешались, основная схема выглядит вполне приемлемой. Разница состоит в более быстрой динамике процесса: вместо сотен микросекунд в [12], детонация в наших опытах развивалась за  $\approx 10$  мкс. При таком небольшом времени не требуется прочной стальной оболочки, обычно применяемой при изучении ПГД, т. е. вполне эффективно инерционное удержание заряда.

Отметим, что в [12] и ряде цитированных там работ предпочтительным признается именно воздействие ударником или поршнем, поскольку традиционное поджигание может привести к развитию в порошке пустот — «каналов», по которым могут прорываться газы. По нашему мнению, преимущества такого выбора преувеличены. В основном они сводятся к достижению «одномерной интерпретируемости» эксперимента, что достигается ценой ухода от естественных условий ПГД. Неоднородность, и в том числе «каналы», с очевидностью расширяет возможности возникновения детонации и потому не должна исключаться только из соображений удобства. Поскольку основная цель исследования ПГД — повышение безопасности обращения с ВВ, одномерность процесса, тем более достигаемую немалыми усилиями, вряд ли следует включать в число определяющих факторов исследования.

Иницирование высокоэнтальпийным потоком газа резко отличается от иницирования ударником. Вплоть до последних стадий процесса сжатие порошка незначительно. Процесс начинается с быстрого конвективного горения, которое при достаточно энергичном начальном воздействии переходит в детонацию. Здесь исключается медленная стадия послонного горения, характерная при поджигании начиная с давления порядка атмосферного. По этой причине переход укладывается в 10 мкс и не требует прочной оболочки. Быстрота перехода исключает и сколько-нибудь существенные трехмерные эффекты типа формирования «каналов».

Таким образом, при внешней схожести ки-

нематики два варианта иницирования имеют принципиальные различия, которые удалось выявить благодаря использованию синхротронной диагностики.

При численном моделировании конвективного процесса [8] получено качественное совпадение с опытом. Ранее в [13] моделировалось воздействие вдува потока горячего газа на пористый заряд пороха. Интересно, что при значительно меньшей интенсивности вдува (характерная скорость порядка 10 м/с) в этой работе также воспроизведен процесс, развивающийся по конвективному «газокомпрессионному» сценарию, хотя и более медленный (сотни микросекунд) и соответственно требующий наличия жесткой оболочки. Отсюда видно, что конвективные режимы иницирования могут осуществляться в довольно широком диапазоне параметров.

В заключение следует заметить, что высокотемпературный иницирующий поток может возникнуть, например, при прорыве газа из замкнутой области в порошкообразное ВВ. Достаточные для быстрого ПГД параметры газа могут сформироваться, в том числе, динамически внутри объема, ограниченного слоем уплотненного порошка. Это указывает на возможность несанкционированных взрывов в отсутствие каких-либо оболочек и подобных условий, обычно считающихся необходимыми для развития детонации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев А. Ф., Боболев В. К., Коротков А. И., Сулимов А. А., Чуйко С. В. Переход горения конденсированных систем во взрыв. — М.: Наука, 1973.
2. Андреев В. В., Лукьянчиков Л. А. К механизму распространения детонации с малой скоростью в порошковом тэне при искровом иницировании // Физика горения и взрыва. — 1974. — Т. 10, № 6. — С. 912–919.
3. Андреев В. В., Лукьянчиков Л. А., Митрофанов В. В., Тесленко В. С. Возбуждение детонации порошковых ВВ взрывом газовых смесей // Физика горения и взрыва. — 1980. — Т. 16, № 5. — С. 153–155.
4. Андреев В. В., Ершов А. П., Лукьянчиков Л. А. Двухфазная низкоскоростная детонация пористого ВВ // Физика горения и взрыва. — 1984. — Т. 20, № 3. — С. 89–93.
5. Григорьев В. В., Лукьянчиков Л. А., Пруэлл Э. Р., Васильев А. А. Иницирование пористого взрывчатого вещества продуктами пересжатой газовой детонации // Физика

- горения и взрыва. — 2001. — Т. 37, № 5. — С. 90–97.
6. **Лукьянчиков Л. А.** Системы инициирования на вторичных взрывчатых веществах // ПМТФ. — 2000. — Т. 41, № 5. — С. 48–61.
  7. **Лукьянчиков Л. А., Прууэл Э. Р., Кашкаров А. О., Тен К. А.** Абляционное горение вторичных порошковых взрывчатых веществ // ПМТФ. — 2010. — Т. 51, № 4. — С. 5–16.
  8. **Ершов А. П., Кашкаров А. О., Лукьянчиков Л. А., Прууэл Э. Р.** Иницирование детонации пористого взрывчатого вещества высокоэнтальпийным потоком газа // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 1. — С. 91–105.
  9. **Беляев А. Ф., Садовский М. А., Тамм И. И.** Применение закона подобия при взрывах к явлению передачи детонации // ПМТФ. — 1960. — № 1. — С. 3–17.
  10. **Seay G. E., Seely L. B.** Initiation of a low-density PETN pressing by a plane shock wave // J. Appl. Phys. — 1961. — V. 32, N 6. — P. 1092–1097.
  11. **Андреев В. В.** Иницирование порошкового гексогена слабой ударной волной // Физика горения и взрыва. — 1979. — Т. 15, № 1. — С. 126–128.
  12. **McAfee J. M.** The deflagration-to-detonation transition // Non-Shock Initiation of Explosives / B. W. Asay (Ed.). — Berlin; Heidelberg; Springer, 2010. — Ch. 8. — P. 483–535. — (Shock Wave Science and Technology Reference Library; V. 5).
  13. **Ермолаев Б. С., Беляев А. А., Сулимов А. А.** Численное моделирование перехода горения в детонацию в пироксилиновых порохах // Хим. физика. — 2004. — Т. 23, № 1. — С. 62–72.

*Поступила в редакцию 18/XI 2014 г.*

---