

Предисловие

Развитие взрыва из первичного очага химического превращения (горения), созданного благодаря воздействию какого-либо инициирующего импульса, на прилегающие слои энергетического материала (ЭМ) получило название переход горения в детонацию (ПГД). Большой интерес к изучению этого процесса пришелся на 1960–1970-е гг., на время разработки и внедрения новых мощных взрывчатых веществ (ВВ) на основе гексогена и октогена и твердых ракетных топлив (ТРТ) с высокой энергетикой. Интерес подогревался авариями при изготовлении и транспортировке этих изделий и аварийными взрывами при стендовых испытаниях ракетных двигателей.

Профессор А. Ф. Беляев с сотрудниками были первыми, кто в своих исследованиях применил подход, состоящий в разделении ПГД на составляющие стадии, которые имели разную природу и свойства. Этими стадиями были конвективное горение и низкоскоростная детонация (НСД). Конвективное горение возникает после срыва послойного горения, благодаря тому что продукты горения проникают по порам (трещинам, щелям и прочим каналам) в глубь слоя ЭМ, окружающего очаг, и поджигают его. Результатом является резкое, самоускоряющееся развитие горения благодаря увеличению поверхности горения и росту давления, которое, в свою очередь, еще более ускоряет горение. Скорость, с которой волна конвективного горения распространяется по ЭМ (скорость конвективного горения), быстро растет, пробегая (если отсутствуют какие-либо сильные факторы, вызывающие сброс давления) диапазон от нескольких до 400–500 м/с. Давление в волне может достигать нескольких килобар.

Переход от конвективного горения к НСД происходит, когда уплотнение и деформация ЭМ в волне конвективного горения достигают уровня, достаточного для инициирования химического превращения в горячих точках. Наиболее вероятным механизмом образования горячих точек являются диссипативный нагрев поверхности пор в ходе вязкопластических деформаций. Такой же механизм действует и при нормальной детонации. Низкоскоростная детонация создает детонационно-подобную структуру с ударно-волновым фронтом, зоной реакции и поверхностью Чепмена–Жуге. Однако скорость волны и амплитуда давления оказываются заметно ниже, чем при нормальной детонации, благодаря низкой скорости химического превращения. Низкоскоростная детонация занимает диапазон от 800 до 3000 м/с по скорости волны и от нескольких до 20–25 кбар по давлению. Развитие НСД завершается переходом к нормальной детонации.

В обычных условиях обе стадии, особенно конвективное горение, обладают высокой склонностью к самоускорению. Предотвратить переход в нормальную детонацию для большинства ЭМ, если превышены пороговые условия срыва послыного горения, обычно можно лишь ценой энергичной разгрузки (например, если заряд не имеет оболочки или заключен в очень слабую оболочку), да и то при небольшой массе заряда. И вместе с тем, формальные характеристики этих процессов — скорость волны и давление — оказываются весьма привлекательными для ряда технических приложений. Речь, прежде всего, может идти о получении высоких скоростей горения ЭМ в импульсных ракетных и метательных устройствах и струйных инжекторах. Однако, чтобы эти возможности стали реальностью, понадобились годы исследований, направленных на выяснение свойств, закономерностей и механизмов конвективного горения и НСД в различных условиях. Нужно было научиться управлять характеристиками этих процессов, доказать их воспроизводимость, найти условия, исключаящие опасность перехода в нормальную детонацию.

Книга, предлагаемая вниманию читателей, обобщает результаты многолетних исследований по переходу горения во

взрыв и детонацию в пористых ЭМ, которые проводились сотрудниками Института химической физики Российской академии наук (ИХФ РАН) в лаборатории взрывных процессов. Руководителями этой лаборатории в разное время были проф. А. Ф. Беляев, проф. А. А. Сулимов и Б. С. Ермолаев. В 1973 г. по результатам работ была опубликована монография [1], в которой впервые в мировой научной литературе были изложены в систематизированном виде физические представления о переходе горения твердых и жидких ЭМ во взрыв и детонацию.

В предлагаемую книгу включены результаты исследований, которые были получены после 1973 г. Значительная часть этих исследований проводилась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

Книга состоит из введения, 7 глав, приложения и списка литературы. Во введении дан обзор современного состояния исследований по ПГД в твердых ЭМ. Выделены промежуточные стадии взрывного процесса, рассмотрены их особенности и условия, при которых происходит смена стадий. Дан анализ особенностей развития взрыва с участием больших масс ВВ и порохов, когда ключевую роль играет взаимодействие конвективного горения с разгрузкой очага горения за счет разброса (диспергирования) горящего материала и его прилегающих слоев. Предложена лабораторно-полигонная методика испытаний, получившая название «метод критической высоты слоя», результаты которой могут быть рекомендованы для оценки загрузки по массе сыпучих ЭМ в аппараты и контейнеры и расчета прочности вышибных мембран, обеспечивающих безвзрывное протекание аварийных загораний. Рассмотрены научные подходы и методы исследований. Семь глав книги разбиты на две части.

Первая часть посвящена рассмотрению фундаментальных свойств конвективного горения и НСД и состоит из двух глав. В первой главе приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований, которые демонстрируют общие свойства конвективного горения и важные различия, связанные с типом ЭМ и условиями горения. Анализируются подходы,

которые позволяют замедлить развитие конвективного горения и получить процесс с квазистационарными характеристиками. Вторая глава посвящена свойствам и механизмам НСД. Рассмотрено влияние размера частиц ЭМ, пористости заряда и свойств оболочки на устойчивость, область существования и скорость волны НСД. Приведены оценки скоростей химического превращения для материалов разного типа с использованием процедуры, связанной с теоретической обработкой экспериментальных данных по зависимости скорости неидеальной детонации от диаметра заряда и толщины оболочки.

Результаты фундаментальных исследований легли в основу подходов и методов, позволяющих контролировать и при необходимости осуществлять управление конвективным горением и НСД. Это открыло перспективы для возможных практических приложений. Цикл исследований, связанных с анализом применения конвективного горения и НСД в ствольных, метательных и взрывных устройствах, рассмотрен во второй части книги, которая включает главы с третьей по седьмую.

Третья глава посвящена горению и баллистическим свойствам метательных высокоплотных зарядов конвективного горения. Приведены данные, которые доказывают высокую прогрессивность горения блочных зарядов, что дает возможность значительно повысить плотность заряжения при выстреле. Рассмотрены результаты баллистических испытаний. Получены уникальные диаграммы давления платообразной формы, которые обеспечивают прирост дульной скорости с блочным зарядом, превышающим 12% по сравнению с зарядом классической конфигурации при сохранении постоянным максимума давления в камере в стрелковых устройствах калибром 7,62 и 14,5 мм.

Четвертая глава посвящена использованию высокоплотных блоков конвективного горения в качестве присоединенного заряда (ПЗ) в комбинированной схеме выстрела. Дан обзор исследований в области ПЗ. Приведены результаты выстрелов в 23-миллиметровой гладкоствольной лабораторной установке, которые показали хорошую воспроизводимость баллистических характеристик с блочным ПЗ. Получены уникальные диаграм-

мы давления, имеющие второй горб на спадающей ветви за максимумом давления, который связан с горением ПЗ. Достигнут прирост дульной скорости, составивший 20% и более.

Пятая глава посвящена применению высокоплотных блочных зарядов конвективного горения в импульсных сопловых устройствах. Приведены экспериментальные данные, показывающие, что в зависимости от свойств используемого ЭМ могут быть получены диаграммы давления пикообразной формы длительностью 1–5 мс и диаграммы длительностью 10–20 мс, имеющие участок плато на уровне 60–150 МПа. Показана хорошая воспроизводимость тяговых характеристик при удельном импульсе тяги выше 200 с и плотностях заряжания в диапазоне 0,8–1,2 г/см³.

В шестой главе анализируются характеристики импульсного устройства с отстрелом массы и импульсного соплового устройства, которые работают в режиме НСД. Устройство с отстрелом массы, оснащенное приборами для измерения импульса тяги, давления и разгона метаемого тела, является удобным инструментом для изучения энергетических свойств НСД и полноты химического превращения. На сопловом устройстве проведены прямые измерения давления в разных точках по длине работающей камеры, рассмотрены условия, обеспечивающие получение удельного импульса на уровне 250 с и более.

В седьмой главе приведены результаты измерений характеристик взрывных волн, генерируемых в цилиндрической трубе и в открытом воздушном пространстве при детонации смесевых прессованных составов на основе алюминия, перхлората аммония (ПХА) и пластифицирующего компонента с 20% гексогена. Прямым сравнением с взрывными волнами от заряда тротила равной массы показано, что смесевые составы имеют существенно более высокие значения давления на фронте и импульса давления (в среднем в 1,6 раза) по отношению к тротилу.

В приложениях П1–П4 приведены уравнения теоретических моделей, используемых в книге для анализа конвективного горения и НСД, а также экспериментальные данные по скоро-

стям нормального горения порохов и ВВ при давлениях до 400 МПа.

Заканчивая предисловие, полезно напомнить читателям о том, что помимо конвективного горения существует еще один процесс, в котором фильтрация газов и теплопередача в пористом материале играют ключевую роль. Этот процесс, известный как фильтрационное горение, широко исследуется в связи с применением горения для синтеза тугоплавких соединений (см. работы Мержанова А. Г. и Алдушина А. П. с сотрудниками, например работу: *Алдушин А. П., Мержанов А. Г. Теория фильтрационного горения: общие представления и состояние исследований // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах / Под ред. Ю. Ш. Матроса. — Новосибирск: Наука, 1988. С. 9–52*). Различие между процессами состоит в том, что при фильтрационном горении газ подается извне, и хотя в газификации могут участвовать небольшие примеси, она не приводит к существенному повышению давления. Напротив, при конвективном горении именно превращение твердого ЭМ в газ с огромным увеличением объема и давления определяет ключевые свойства процесса.

И, наконец, мы с удовольствием выражаем искреннюю благодарность сотрудникам ИХФ РАН А. А. Беляеву, А. А. Борису, В. Ф. Мартынюку, В. С. Посвянскому, А. В. Романькову, Б. А. Хасаинову, В. Е. Храповскому и В. Г. Худавердиеву, чьи вклад и помощь в проведении исследований, вошедших в эту книгу, трудно переоценить. Мы помним уже ушедших от нас М. К. Сукояна и В. А. Фотеенкова, сотрудничество с которыми было крайне плодотворным.