

ЧАСТЬ 4

ПЛЕНАРНАЯ ДИСКУССИЯ

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ГОРЕНИЯ
И ВЗРЫВА

**А. А. Борисов, Н. М. Рубцов, Г. И. Скачков,
К. Я. Трошин**

Об очаговом самовоспламенении газов

Мы хотели бы обсудить вопрос об очаговом самовоспламенении газов и о связи этого явления с отрицательным температурным коэффициентом (ОТК) скорости реакции. Установление факта очагового воспламенения в области низких температур в условиях статической установки перепускного типа замыкает серию экспериментальных результатов, полученных другими авторами [1, 2] в условиях ударной трубы и машины быстрого сжатия. Эти три методики обеспечивают измерения задержек воспламенения в широком диапазоне температур и давлений и позволяют измерять задержки воспламенения газовых систем продолжительностью от 1 мкс до 10 с, т. е. охватывают весь диапазон задержек воспламенения, имеющих практическое значение.

Оказалось, что, несмотря на различные способы нагрева газа до заданной температуры, воспламенение всегда носит очаговый характер, в то время как классические теории цепного и теплового воспламенения [3, 4] подразумевают одновременное воспламенение смеси в объеме. Предположение о том, что очаговость воспламенения связана с внесением в объем реактора каких-либо активных центров, образовавшихся в результате гетерогенных реакций на стенках реактора при взаимодействии их с обтекаемым потоком газа, маловероятно, поскольку эти реакции исключены в условиях холодных стенок на установках быстрого сжатия и ударных трубах. Кроме того, как показывают оценки, размер частиц, способных вызвать преждевременное (по сравнению с объемным) воспламенение смеси слишком велик для того, чтобы они свободно витали в реакторе. Это подтверждает и эксперимент с добавками малых активных частиц в смесь. Термодинамические флуктуации температуры

или концентрации активных центров реакции (например, атомов или радикалов, приводящих к разветвлению) также не способны вызвать наблюдаемую в эксперименте разницу в периодах индукции в очагах и в объеме. По всей видимости, очаговость воспламенения связана с неоднородным распределением температуры исследуемой смеси в реакторе, связанной со способом нагрева смеси, что вполне объяснимо в рамках любой методики измерения задержек воспламенения: дополнительные возмущения за фронтом волны в ударных трубах, наблюдаемые в эксперименте, образование волн давления в ходе движения поршня и возникновение пограничного слоя в машинах адиабатического сжатия, неравномерность нагрева смеси при быстром ее напуске в нагретый сосуд в статических перепускных установках.

Обращает на себя внимание тот факт, что при очаговом воспламенении первоначальные очаги при задержках воспламенения в области нескольких секунд имеют конечный размер 1,5–2 см, который соответствует критическому размеру области с температурной неоднородностью, способной самовоспламениться по теории теплового взрыва в данных условиях. Процессы теплопроводности не успевают сгладить эту неоднородность за время задержки воспламенения, что и приводит к самовоспламенению реакционноспособной смеси. Форму этих областей нельзя считать строго сферической. Она, как правило, носит диффузный характер в отличие от формы фронта пламени, создаваемого электрической искрой.

Существенно также и то, что в последнем случае фронт пламени имеет голубой цвет, в то время как очаги самовоспламенения имеют ярко желтый цвет. Это также свидетельствует о том, что в очаге происходит объемное воспламенение, при котором хемилюминесценция должна быть выражена слабее, чем в пламени, где неравновесная концентрация радикалов и атомов в зоне реакции всегда выше, чем при объемном воспламенении, вследствие их притока из высокотемпературной зоны. В случае искрового зажигания скорость распространения фронта пламени в 6–7 раз ниже скорости развития очага самовоспламенения. Это связано с тем, что в случае искрового зажигания (рис. 1) механизм распространения фронта пламени имеет диффузионно-теплопроводностную природу, в то время как распространение пламени от очага самовоспламенения носит индукционный характер, т. е. наблюдается так назы-

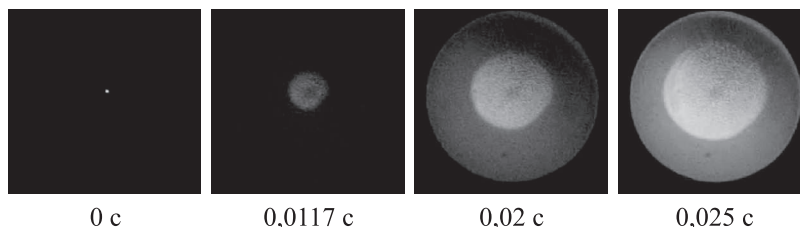


Рис. 1 Зажигание электрической искрой. Положение фронта пламени в разные моменты времени. Начальные условия: стехиометрическая смесь *n*-пентана с воздухом, $T_0 = 597$ К, $P_0 = 1$ ата; частота съемки 600 кадров/с

ваемое индукционное горение, предсказанное Я. Б. Зельдовичем с соавторами в [5]. Этим также объясняется переход горения в детонацию от очага воспламенения, наблюдаемый в ударных трубах на расстоянии нескольких сантиметров, в то время как при нормальной температуре никому не удавалось наблюдать перехода горения в детонацию в случае сферического распространения пламени даже в очень реакционноспособных топливно-кислородных смесях.

Экспериментальные исследования показывают, что механизм воспламенения в реальных неидеальных условиях значительно сложнее описываемого классическими теориями. К сожалению, очаговость воспламенения не проливает свет на механизм таких низкотемпературных явлений как ОТК, стадийность воспламенения, холодные пламена. Очаги воспламенения, наблюдаемые визуально, очень быстро развиваются и, по сути, являются началом горячего воспламенения, в то время как стадийное воспламенение и холодные пламена предшествуют горячепламенному воспламенению. Хотя запись давления в ходе реакции свидетельствует о холоднопламенном воспламенении исследуемой смеси в виде небольшой ступеньки, предшествующей основному подъему давления и появляющейся значительно раньше, чем появляется фиксируемый камерой очаг воспламенения, на фотографиях холодного пламени мы не наблюдали. По всей видимости, в видимом диапазоне излучения невозможно визуально наблюдать холодные пламена, поскольку повышение температуры в этих случаях недостаточно для появления светящихся

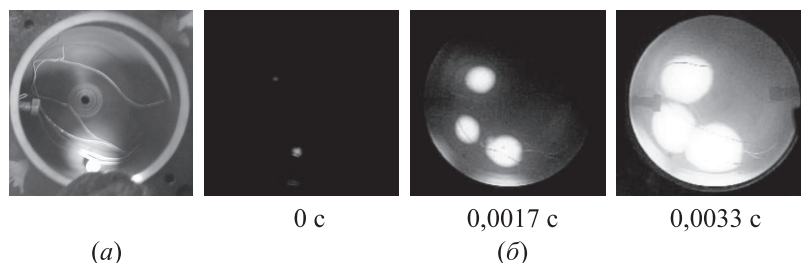


Рис. 2 Расположение проволоки платинородиевой термопары в реакторе (а) и последовательные кадры воспламенения воздушной стехиометрической смеси н-пентана (б). Начальные условия: $T_0 = 628$ К, $P_0 = 2$ ата; частота съемки 600 кадров/с

промежуточных продуктов реакции, а яркость хемилюминесцентного излучения недостаточна для регистрации используемой скоростной видеокамерой.

Своеобразное воздействие на воспламенение оказывает введение в реактор каталитической поверхности в виде проволоки платинородиевой термопары (рис. 2).

Оказалось, что в различных температурных областях влияние этой каталитической поверхности на воспламенение различно. В области низких температур наличие каталитической поверхности не проявляет заметного влияния на величину задержки воспламенения. Однако при переходе в температурную область, в которой обычно наблюдается явление ОТК, наличие этой же поверхности ликвидирует явление ОТК. В этом случае очаги воспламенения располагаются вдоль каталитической поверхности проволоки, т. е. она служит как бы источником зажигания. Поскольку задержки воспламенения в этом случае ведут себя так, как будто никакой разницы между холоднопламенным и горячим воспламенением нет в температурной области, соответствующей ОТК, можно сделать вывод, что каталитическая поверхность ликвидирует стадию торможения реакции после возникновения холодного пламени.

На наш взгляд, этот факт очень важен для дальнейшего исследования и выяснения природы промежуточных продуктов реакции, приводящих к ее торможению.

В. В. Власенко, А. А. Ширяева

О сравнении рабочего процесса в импульсных детонационных двигателях с разным направлением движения волн детонации

Мы хотели бы обсудить один аспект управления рабочим процессом в перспективных воздушно-реактивных импульсных детонационных двигателях (ИДД), а именно: влияние направления распространения детонационной волны на тяговую характеристику двигателя. За последние 20 лет предложено много различных вариантов конструкции ИДД, отличающихся методами устойчивой генерации детонации, принципами извлечения полезной нагрузки, способами возобновления импульсного рабочего цикла и др. [6]. Большинство схем ИДД можно разделить еще на две группы, отличающиеся направлением движения детонационной волны по камере по отношению к направлению воздушного потока: вниз или вверх по потоку. Мы попытались сопоставить эти варианты организации рабочего процесса в ИДД средствами численного моделирования. Расчеты основаны на уравнениях Рейнольдса для осесимметричной задачи. Использовали численный метод, кратко описанный в [7].

Сначала рассмотрели идеальный ИДД (рис. 3, *a*), который представляет собой детонационную камеру, закрытую с одной стороны

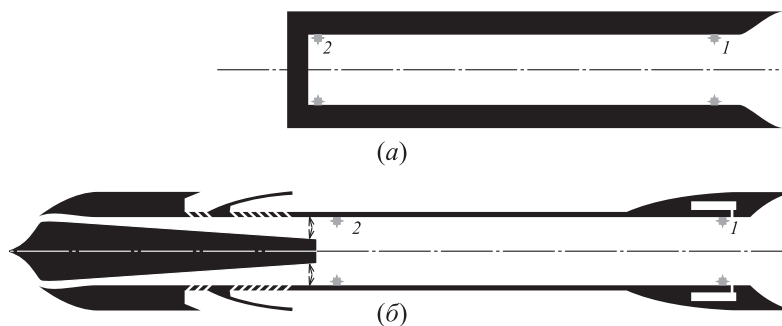


Рис. 3 Рассмотренные варианты ИДД: (*a*) идеальный ИДД; (*b*) модельный ИДД бесклапанной схемы. 1 и 2 — варианты расположения места поджига. Масштаб в радиальном направлении увеличен

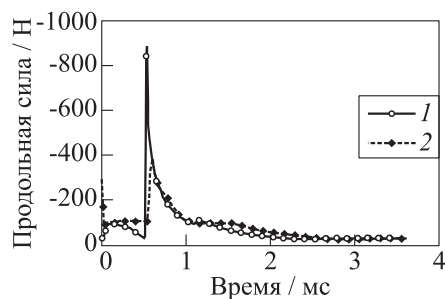


Рис. 4 Зависимости продольной силы от времени, полученные в расчетах рабочего процесса в идеальном ИДЦ при поджиге водородно-воздушной смеси в положениях 1 и 2 (см. рис. 3 а)

и снабженную расширяющимся соплом с другой. В начальный момент времени камеру заполняли стехиометрической смесью водорода с воздухом. Считали, что окружающее пространство заполнено покоящимся воздухом с тем же давлением. Далее смесь зажигали путем локального подвода энергии у стенок камеры (моделирование электрической свечи). Сравнивали два варианта расположения места поджига — 1 и 2 (см. рис. 3, а). В варианте 1 сначала возникла детонация, которая бежала по камере влево, сжигая горючую смесь, а затем превращалась в сильную ударную волну, которая отражалась от закрытого конца и выходила из камеры через сопло. В варианте 2 возникла детонация, которая бежала вправо и выходила через сопло. Моделирование процесса прекращалось, когда давление на закрытом конце камеры становилось ниже, чем давление воздуха в окружающем пространстве.

На рис. 4 приведено сравнение полученных зависимостей интегральной продольной силы, приложенной к стенкам камеры, от времени. Отрицательные значения соответствуют направлению силы влево. В варианте 1 за счет отражения бегущей волны от стенки достигается большее максимальное значение продольной силы. Однако средняя за время процесса продольная сила в варианте 1 оказалась немного меньшей, чем в варианте 2 (82 и 84 Н соответственно). По-видимому, это связано с тем, что волны разрежения, идущие вслед за бегущей влево пересжатой детонационной волной, умень-

шают интенсивность (до тех пор пока детонация не превратится в волну Чепмена–Жуге) и препятствуют превращению части энергии, выделяющейся при сгорании топлива в полезную работу. При этом вариант 1 позволяет достичь существенно большей равномерности продольной нагрузки.

Для демонстрации влияния внешнего обтекания и способа возобновления рабочего цикла рассмотрели также ИДД бесклапанной схемы (рис. 3, б), конструкция которого близка к рассмотренной в [7]. Такая упрощенная модельная схема ИДД, хотя и не обеспечивает равномерной по времени полезной силы, зато позволяет провести параметрические расчеты в осесимметричной постановке. Мы представим результаты расчетов для режима внешнего обтекания с числом Маха $M = 3$ при двух расположениях поджига (1 и 2 на рис. 3, б), которые обеспечивают движение детонационной волны вверх и вниз по потоку.

С. М. Фролов

Об управлении рабочим процессом в камерах сгорания с вращающейся детонацией

Я хочу привлечь внимание к очень, на мой взгляд, многообещающей схеме устройства для управляемого детонационного сжигания горючего. Это схема камеры сгорания с вращающейся детонацией, впервые предложенная в СССР Б. В. Войцеховским в 1959 г. [8]. Впоследствии с этой схемой активно работали несколько научных групп у нас в стране (ИГиЛ СО РАН) и за рубежом (США, Польша, Франция, Япония и Китай).

Чтобы понять, как работает такая камера сгорания, рассмотрим кольцевой канал, образованный стенками двух коаксиальных цилиндров одинаковой длины. Если к днищу цилиндров приладить смесительную головку и обеспечить подачу компонентов горючего в кольцевой зазор, а другой конец канала оборудовать реактивным соплом, получится проточный кольцевой реактор. Организовать горение в таком реакторе можно по-разному: как в обычном жидкостном ракетном двигателе (ЖРД) или по схеме Войцеховского, когда смесь сгорает в детонационных волнах, бегущих в одном (тангенциальном) направлении вдоль днища кольцевого канала. Дето-

национная волна «съедает» горючую смесь, вновь поступившую в камеру сгорания в «хвосте» за передней волной или за время своего оборота по окружности кольцевого канала (если волна одна). Круговая частота детонационных волн в камерах средних размеров имеет величину порядка 10^5 об/мин и выше. Чтобы отличать такой реактор от ЖРД, будем называть его двигателем с вращающейся детонацией (ДВД).

Как известно, в детонационной волне химическая реакция окисления горючего протекает в режиме самовоспламенения при высоких избыточных давлениях и температурах. Поэтому эффективность процесса горения в ДВД при прочих равных условиях будет выше, чем в ЖРД (процесс протекает при более высоких давлениях за ударной волной [9]). По крайней мере, теоретически применение ДВД сулит большие выгоды для аэрокосмической техники и энергетики. В частности, ввиду того, что горючее в ДВД горит непрерывно, на выходе из сопла можно установить турбину, которая будет размещена на общем валу с компрессором, обеспечивающим подачу воздуха в кольцевую камеру сгорания. Если учесть, что частота вращения турбины имеет величину порядка 10^4 об/мин, за один оборот турбины детонационная волна сделает десять и более оборотов, т. е. поток выхлопных газов через венцы турбины будет практически равномерным. В такой конфигурации ДВД очень похож на турбореактивный двигатель (ТРД), только вместо непрерывного горения в кольцевой камере непрерывно циркулирует детонация. Если к валу турбины присоединить электрогенератор и утилизировать энергию истекающих газов, полученная машина может стать эффективной стационарной энергетической установкой.

На сегодняшний день наибольших успехов в организации непрерывного детонационного горения добились наши коллеги из Новосибирска (Ф. А. Быковский, А. А. Васильев, Е. Ф. Ведерников и С. А. Ждан; большой вклад в решение проблемы внес ушедший из жизни В. В. Митрофанов). Ими проведены систематические экспериментальные исследования непрерывно вращающейся детонации в проточных кольцевых и дисковых камерах сгорания разной конструкции как с топливно-кислородными, так и с топливно-воздушными смесями, с газовым и жидким горючим, а недавно они опубликовали результаты успешных опытов по детонационному сжиганию смесей древесно-угольной пыли с воздухом.

Несмотря на эти успехи, о практическом применении ДВД пока говорят с большой долей осторожности. Дело в том, что тепловые потоки в стенки камеры сгорания в окрестности смесительной головки, где циркулируют детонационные волны, достигают колоссальных значений. Чтобы камера не разрушилась, ее надо изготавливать из сверхжаропрочных материалов и дополнительно охлаждать. Неудивительно, что время работы существующих лабораторных образцов ДВД составляет всего доли секунды или, в лучшем случае, несколько секунд.

Кроме проблемы охлаждения существует и множество других проблем, связанных с организацией рабочего процесса и его управлением. Достаточно перечислить лишь несколько сопутствующих физико-химических явлений, чтобы понять всю сложность процесса. Для устойчивой («стационарной») циркуляции детонационной волны необходимо, чтобы состояние горючей смеси перед бегущим фронтом не изменялось или изменялось настолько незначительно, чтобы это не отражалось на скорости и структуре волны. Этого можно добиться, только обеспечив (в среднем) стационарные условия подачи и смешения горючего и окислителя, исключив возможность самопроизвольного зажигания свежей смеси на горячих боковых поверхностях камеры в окрестности смесительной головки, и сведя к минимуму горение смеси на развитой контактной границе с горячими продуктами детонации за фронтом волны. Следует иметь в виду, что тангенциальное распространение детонационной волны в кольцевом канале конечной кривизны сопровождается дифракционными явлениями на внешней и внутренней цилиндрических поверхностях. Это приводит к образованию «наведенных» поперечных волновых структур, взаимодействующих с собственными бегущими поперечными волнами детонационного фронта. В местах столкновения поперечных волн разных структур то и дело могут возникать области с аномально высоким давлением, значительно превышающим давление подачи топливных компонентов в питающих магистралях смесительной головки, или с пониженным давлением. Первое приведет к проникновению продуктов детонации в отверстия головки, а второе — к преждевременной подаче топливных компонентов в продукты детонации. Картина усугубляется тем, что для полного молекулярного смешения топливных компонентов между собой необходимо конечное время, т. е. вблизи сме-

сительной головки имеется слой вещества, не способного к детонационному превращению. Этот слой, по-видимому, подвергается сжатию и разогреву в косом ударном фронте, присоединенном к детонационной волне. Если еще учесть, что течение за фронтом детонационной волны подвержено сильному боковому расширению (по направлению к соплу), становится очевидным, что картина течения в целом существенно нестационарная и трехмерная.

Приведенные выше рассуждения относятся к «стационарному» режиму работы ДВД. В переходных процессах, таких как запуск или повторный пуск двигателя, смена рабочего режима и т. д., ситуация еще сложнее. Разумеется, чтобы выделить определяющие факторы в этой сложной картине и попытаться выйти на практические рекомендации, необходимо привлекать самые современные численные методы решения задач газовой динамики.

До сих пор анализ этой задачи проводился лишь на основе невязких уравнений течения в плоской постановке с периодическими граничными условиями на концах рассматриваемого интервала. Фактически во всех проведенных исследованиях решалась задача на установление стационарного решения. При этом игнорировались эффекты кривизны траектории детонационной волны и эффекты, связанные с конечной скоростью турбулентного и молекулярного смещения топливных компонентов друг с другом и с продуктами детонации. В такой постановке невозможно определить тепловые потоки в стенку камеры и их пространственное распределение и в полной мере исследовать устойчивость решения к тем или иным случайным возмущениям.

По моему убеждению, в данном случае нельзя ограничиваться решением стационарной двумерной задачи. Необходимо решать нестационарные трехмерные уравнения турбулентного сжимаемого реагирующего течения с учетом конечных скоростей химических превращений, используя геометрию кольцевой камеры сгорания и смесительной головки, максимально приближенную к реальной. Особенно внимательно следует отнестись к моделированию течения у днища камеры сгорания. В существующих моделях на днище ставятся граничные условия квазистационарного расхода для гомогенной горючей смеси: расход смеси определяется отношением давления в «ресивере» к локальному мгновенному значению давления на днище (с учетом запирания); отрицательный расход не допуска-

ется. Чтобы правильно моделировать течение у днища, необходимо включить в рассмотрение процессы истечения топливных компонентов из соответствующих «ресиверов» через отверстия в камеру сгорания.

В 2010 г. в лаборатории детонации ИХФ РАН начаты работы по нестационарному трехмерному численному моделированию рабочего процесса в ДВД. План работ включает следующие этапы:

- (1) предварительные расчеты с целью определения характерных времен сопутствующих физико-химических процессов;
- (2) численное моделирование запуска двигателя с кольцевой камерой сгорания простейшей геометрии;
- (3) определение условий выхода рабочего процесса на «предельный» цикл при простейших граничных условиях на днище камеры;
- (4) численное моделирование работы двигателя с ресиверами окислителя и горючего;
- (5) анализ течения в камере сгорания (устойчивость «предельного» цикла к разным возмущениям; полнота сгорания; степень равномерности потока в выходном сечении сопла, распределения тепловых потоков на внутренней и внешней стенках камеры и т. д.);
- (6) расчет суммарной осевой и тангенциальной силы, действующей на ДВД, с учетом инициирующего импульса;
- (7) расчет тяговых характеристик ДВД в условиях сверхзвукового полета;
- (8) расчет обтекания лопаток турбины продуктами детонации, истекающими из сопла ДВД;
- (9) формирование облика компоновочной схемы ДВД–турбина–сопло.

На этапе (4) планируется начать работы по проектированию и изготовлению лабораторного образца ДВД с его последующими испытаниями.

На рис. 5 представлен пример расчета, выполненного при решении задач этапа (3). Показано распределение давления в детонационной волне, распространяющейся против часовой стрелки в кольцевом слое стехиометрической водородно-воздушной смеси. Снизу

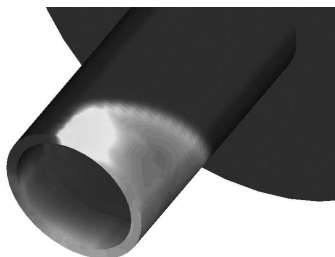


Рис. 5 Расчетное распределение давления в детонационной волне, распространяющейся в кольцевом слое стехиометрической водородно-воздушной смеси

через днище кольцевой камеры сгорания подается предварительно подготовленная горючая смесь. Сверху к камере присоединен большой буферный объем с воздухом при атмосферном давлении. На некоторой высоте внутренний цилиндр переходит в конус, образуя расширяющееся кольцевое сопло.

Н. А. Халтуринский

О снижении горючести полимеров

Я хотел бы обратить внимание на комплексную научную проблему снижения горючести полимеров, которая стала особенно актуальной ввиду крупных пожаров, происходящих в последнее время в РФ и за рубежом. Возникновение пожаров часто связывают с применением горючих материалов на основе полимеров.

Для снижения горючести полимеров необходимо рассматривать вопросы связанные с зажиганием, горением, дымообразованием, выделением токсичных продуктов при пиролизе и горении и пр.

Это большая комплексная проблема, решение которой под силу только крупным исследовательским центрам с новейшим оборудованием и творческим коллективом.

Для решения этой проблемы необходимо иметь представления о горении в целом, горении предварительно перемешанных смесей,

особенностях диффузионного горения (что реализуется при горении полимеров), механизме термического и термоокислительного пиролиза, критических условиях горения полимеров, влиянии внешних условий (температуры, концентрации окислителя, скорости натекающего потока, внешних полей и пр.), влиянии антипиренов на пиролиз полимеров при горении и др.

Один из важнейших вопросов для решения этой проблемы — правильная постановка исследований. Подчеркну, что большинство «исследователей» всего мира для выяснения механизма действия антипиренов изучают пиролиз в инертной атмосфере (в азоте и аргоне). Это равносильно методике тренировки балерины в запаянном противогазе.

«Исследователи» всего мира не утруждают себя изучением закономерностей процессов горения полимеров. Например, принято за правило использовать доказанные идеи ингибирования горения предварительно перемешанных смесей для объяснения механизма ингибирования диффузионного горения полимеров. Как результат, несмотря на большое количество работ в этой области, на сегодняшний день нет однозначных рекомендаций по снижению горючести полимеров.

Уверен, что только в коллективе научной школы Н. Н. Семёнова можно создать атмосферу взаимопонимания химиков-синтетиков и физиков и обеспечить правильную постановку этой задачи и ее решение.

С. В. Чуйко

О проблемах управления горением смесевых твердых топлив

Считаю необходимым и важным обратить внимание исследователей проблемы управления горением твердых топлив, прежде всего молодых исследователей, на ряд обстоятельств, которые нельзя игнорировать при поисках новых приемов воздействия на процессы горения, если есть желание сделать практически полезное дело. Таковыми являются: влияние предлагаемого приема на энергетику системы, на чувствительность системы к внешним воздей-

ствиям, на технологичность системы, на химическую стабильность системы. Очевидна важность экономических и производственных аспектов.

Разработка концепции взаимодействующих подсистем компонентов смесевых твердых топлив [10–14] позволила дать классификацию смесевых систем и соответствующих им методов управления горением в связи со свойствами конкретных рецептур. Успешное решение реальных задач доказало практическую эффективность концепции. Не наша вина, что разработчики топлив зачастую не знают или не понимают научных основ регулирования горения, предпочитают, как и полвека назад, действовать «на авось», без анализа системы и т. д.

В качестве примеров я приведу особенности использования активных катализаторов, нанодисперсных компонентов, АДНА и других соединений.

И. Г. Ассовский

О проблеме управления горением в ракетных двигателях на твердом топливе

Я хотел бы обратить внимание на некоторые вопросы управления горением в ракетных двигателях на твердом топливе (РДТТ).

В ракетных двигателях в качестве источников энергии и рабочего тела широко используются твердые ракетные топлива (ТРТ). Наряду с известными преимуществами ТРТ по сравнению с жидкими ракетными топливами их существенным недостатком является сложность управления горением в процессе работы двигателя. Необходимость такого управления и его пределы обычно диктуются условиями применения РДТТ.

Среди существующих методов управления горением в РДТТ наибольшее распространение получили два: (1) гашение топлива (путем впрыска хладагента или вскрытия дополнительных сопел), чередующееся с его повторным воспламенением; (2) непрерывное изменение скорости горения путем изменения давления в камере сгорания за счет соответствующего изменения критического сечения сопла двигателя (примерная схема такого устройства представлена на рис. 6).

Потенциально второй метод включает первый как частный случай, однако реализация второго метода технически более сложна и предъявляет необычные требования к закону горения ТРТ.

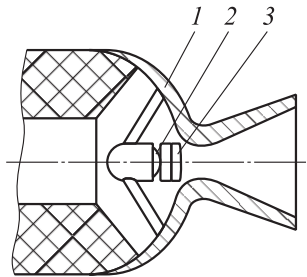


Рис. 6 Схема РДТТ с регулируемым критическим сечением сопла [15]. 1 — стойки; 2, 3 — центральное тело и его различные положения

Изменение давления P в камере сгорания определяется (согласно закону сохранения массы) соотношением между скоростью расхода газа через сопло — $AP\sigma$ (A — коэффициент истечения, кг/с·кГс; σ — площадь критического сечения сопла, м²) и скоростью суммарного газовыделения Sm (S — площадь поверхности горения, м²; m — массовая скорость газовыделения с единицы поверхности горения, кг/(с·м²), которая зависит от давления и температуры топлива T обычно в виде: $m = m_1(T)P^\nu$) [16, 17].

Уравнение для изменения давления удобно представить в виде:

$$t_p \frac{dP}{dt} = K_1 P^\nu - P, \quad t_p = \frac{W}{ART_b \sigma}, \quad K_1 = \frac{m_1 S}{A \sigma}, \quad (1)$$

где t_p — характерное время релаксации давления в камере сгорания; K_1 — отношение скоростей газовыделения и расхода при $P = 1$ атм; $R = R^\circ/\mu$ — газовая постоянная; T_b — температура продуктов горения топлива; W — свободный объем камеры сгорания.

Из (1) следует, что стационарные значения давления P^0 (отличные от нулевого), устойчивые к малым возмущениям, возможны лишь при $\nu < 1$. Величина стационарного давления определяется выражением:

$$P^0 = K_1^\varepsilon, \quad \varepsilon = \frac{1}{1 - \nu}, \quad (2)$$

из которого видно, что с приближением показателя ν к единице быстро растет величина P^0 : от K_1^2 при $\nu = 0,5$ до K_1^5 при $\nu = 0,8$. Поэтому одним из главных требований, предъявляемых к закону горения топлив, используемых в РДТТ с постоянным критическим сечением сопла, является малая величина показателя ν . Ситуация

меняется в случае РДТТ с регулируемым критическим сечением сопла.

Прежде всего, для управления газоприходом при малом значении ν требуются большие изменения давления и соответственно большие времена, что неприемлемо для целей управления. Кроме того, как следует из (1) и (2), чувствительность относительного изменения силы тяги двигателя $F \sim P\sigma$ к относительному изменению площади критического сечения сопла быстро возрастает с приближением показателя ν к единице:

$$\left| \frac{d \ln F}{d \ln \sigma} \right| \sim \frac{\nu}{1 - \nu},$$

что указывает на востребованность ТРТ с относительно высокими значениями ν для РДТТ с регулируемой тягой.

Аналогичное требование к показателю ν в законе горения ТРТ возникает и в случае РДТТ, управляемого с помощью отсечки тяги (пригасания) при сбросе давления с последующим воспламенением или самовоспламенением [18]. Так, давление, при котором наступает пригасание топлива при экспоненциальном спаде давления от начального значения P_0 до конечного P_f с характерным временем спада t_0 , определяется выражением [18]:

$$\frac{P^-}{P_0} = \left[\left(\frac{t_1(P_0)}{t_0} \right) \left(1 - \frac{P_f}{P^-} \right) \right]^{1/(2\nu)}, \quad (3)$$

где $t_1(P)$ — характерное время тепловой инерции волны горения. Из (3) следует, что чем меньше значение ν , тем глубже спад давления, при котором происходит пригасание, что нежелательно для РДТТ многократного включения–отключения.

Значения показателя ν , близкие или превышающие единицу, характерны для артиллерийских порохов. Это обусловлено высокими давлениями, при которых происходит горение в артиллерийских системах, и, соответственно, ведущей ролью газофазных бимолекулярных реакций в волне горения (см. [18], с. 231–258).

При давлениях до 100–150 атм, характерных для РДТТ, важную (подчас ведущую) роль играют процессы в конденсированной фазе (к-фазе) волны горения (см., например, [19]). Влияние давления усиливается, если тепловой эффект реакций в к-фазе относительно мал, но велика теплота испарения (сублимации) к-фазы,

например за счет введения специальных компонент. Усиление роли газовой фазы характерно также для современных металлизированных ТРТ, содержащих высокодисперсные порошки энергоемких металлов. Вместе с тем, очевидно, что высокое содержание к-фазы в продуктах горения металлизированных ТРТ осложняет работу управляющих механизмов РДТТ.

Применение топлив с показателем ν , близким к единице, в РДТТ с регулируемым расходом сопла требует контроля давления и системы обратной связи для стабилизации давления, чтобы избежать возникновения и развития вибрационного режима горения [20, 21]. В качестве такой связи используется комбинация пропорционального и интегрального законов изменения σ [22]:

$$\sigma(t) = \sigma_0 + a [P(t - t_\sigma) - P_0] + b \int_0^{t-t_0} [P(t) - P_0] dt', \quad (4)$$

где P_0 и σ_0 — заданные стационарные значения давления и площади критического сечения сопла; t_σ , a и b — время запаздывания и параметры системы управления.

Применение в РДТТ системы стабилизации давления (4) не исключает возникновения при определенных условиях низкочастотной неустойчивости горения ТРТ, как было показано в [21, 22]. В двигателях с постоянной величиной σ низкочастотная неустойчивость возникает при относительно малом свободном объеме камеры сгорания, когда характерное время релаксации давления t_p (1) становится сравнимым или меньше характерного времени t_1 инерционности волны горения [16, 17]: $\chi = t_p/t_1 \leq \chi^*$. Критическое значение χ^* критерия χ зависит от многих характеристик системы, прежде всего геометрии заряда и камеры сгорания, коэффициента температурной чувствительности скорости горения: $\beta = \partial \ln m / \partial T_0$, а также чувствительности температуры поверхности к-фазы топлива T_s и температуры продуктов горения T_b к начальной температуре топлива T_0 и давлению [18, 20, 21]. Кроме того, важную роль оказывает периодическое (неакустическое) распределение температуры в продуктах горения, вызванное колебаниями давления (Махе-эффект) [20]. Так, в случае канального заряда ТРТ положение границы устойчивости на плоскости $(\chi, \beta(T_s - T_0))$ принципиально

изменяется в зависимости от относительной величины предсоплового объема камеры сгорания [21].

В РДТГ с системой стабилизации давления появляются дополнительные факторы, оказывающие влияние на пределы устойчивого горения ТРТ [22, 23]. Так, время запаздывания t_σ от момента измерения давления до момента создания требуемого критического сечения сопла играет наиболее важную роль в возникновении вибрационного горения даже по сравнению с ролью тепловой инерционности волны горения. В случае относительно большой величины времени t_σ интегральная составляющая в законе управления (4) оказывает дестабилизирующее действие на процесс горения.

В заключение перечислю основные требования, предъявляемые к топливам, перспективным для применения в РДТГ с изменяемым критическим сечением сопла: (i) ведущая стадия горения должна протекать в газовой фазе; (ii) макрокинетика горения должна соответствовать бимолекулярным реакциям; (iii) температура и другие термодинамические параметры продуктов горения должны слабо зависеть от давления. Эти требования являются дополнительными к требованиям по конструкции двигателя и заряда (таким как достаточно большая величина предсоплового объема), а также требованиям к системе стабилизации давления (достаточно малое время запаздывания t_σ).

**П. В. Комиссаров, Г. Н. Соколов, И. О. Шамшин,
А. А. Борисов**

О генерации взрывных волн, усиленных реакцией продуктов взрыва с внешней средой (в воздухе и воде)

Нам хотелось бы привлечь внимание к проблеме управления параметрами взрывных волн в воздухе и воде, используя окислительные свойства этих сред. По нашему мнению, использование окислителя внешней среды (кислорода воздуха или воды при подводных взрывах) можно рассматривать как перспективный метод повышения интенсивности взрывных волн.

Предварительное создание смеси горючего с воздухом (так называемая двухтактная традиционная схема объемно детонирующих

систем) *в идеале* позволяет почти полностью использовать повышенные энергетические возможности взрывчатой системы на единицу веса заряда, расчетное значение которого для обычных углеводородов может в 10 раз превышать величину, характерную для штатных взрывчатых веществ (ВВ). Однако малая плотность облака такой смеси сильно ограничивает достигаемую амплитуду взрывной волны и вследствие малой степени расширения продуктов детонации *реальное* увеличение энергетического эффекта взрыва, идущее на генерацию ударной волны, оказывается приблизительно в два раза ниже. К тому же, достигнуть достаточно хорошего смешения горючего с воздухом с равномерным распределением горючего и окислителя по объему облака практически невозможно, что также снижает общую энергетическую эффективность системы.

Двухтактные системы не могут использоваться при подводных взрывах. Разделение взрыва на две стадии также не делает данные системы привлекательными. Поэтому представляется рациональным обратиться к так называемым одноктактным схемам, в которых детонирует заряд, содержащий избыточное горючее. При этом ожидается, что смешение расширяющихся продуктов детонации с воздухом будет поддерживать взрывную волну.

Предварительно оценить возможность реализации одноктактной схемы и ее эффективность можно численным решением простой задачи: рассмотреть расширение в воздухе сжатой высокотемпературной области продуктов взрыва, содержащих избыток горючего. На границе раздела будет происходить смешение продуктов с воздухом со скоростью, пропорциональной некоторому задаваемому эффективному коэффициенту диффузии, а также химическая реакция.

Такая задача была нами решена для взрыва заряда смеси нитрат аммония – алюминий (50/50) при различных значениях коэффициента диффузии. Расчеты показали, что при коэффициенте диффузии $k = 10 \text{ м}^2/\text{с}$ зависимость амплитуды волны от расстояния практически не отличается от таковой для нулевого коэффициента диффузии. В расчетах учитывали реакции как алюминия, так и водорода, образовавшегося в продуктах взрыва, с воздухом. Даже при $k = 60 \text{ м}^2/\text{с}$ ни водород, ни алюминий полностью не прореагировали. Отметим, что коэффициент молекулярной диффузии в таких условиях приблизительно в 10^6 раз меньше.

Следует, однако, учесть, что граница раздела «продукты взрыва–воздух» гидродинамически неустойчива и реальная площадь поверхности границы раздела значительно больше, чем гладкая сферическая поверхность. Численное решение задачи в трехмерной постановке показало, что гидродинамическая неустойчивость не способна увеличить скорость смещения до требуемой величины.

Главный вывод из проведенных расчетов: чтобы использовать энергетику вторичных реакций продуктов взрыва с окружающим воздухом для повышения параметров взрывных волн, требуется резкое увеличение поверхности раздела «продукты–воздух» на начальной стадии взрыва.

Несферическая форма заряда (например, цилиндрическая) может дать определенный эффект, однако для полной реализации энергии, запасенной в продуктах, не может быть и речи. Все эксперименты со взрывами алюминизированных зарядов дают весьма низкие тротиловые эквиваленты этих зарядов, не соответствующие ожидаемым. Отмеченное в литературе повышение тротилового эквивалента можно частично отнести к вкладу экзотермической реакции алюминия с водой в продуктах взрыва и образованию водорода.

Наиболее перспективным методом повышения эффективности нам представляется организация взрыва с возникновением струйного истечения продуктов. В этом случае к увеличению площади границы раздела за счет образования струй добавляется еще и гидродинамическая неустойчивость типа Кельвина–Гельмгольца, которая в ряде случаев увеличивает поверхность границы раздела более эффективно, чем неустойчивость Ламба–Тейлора, действующая в случае сферического взрыва. При таком методе реализуется так называемый низкоскоростной режим детонации, при котором после прохождения детонации по заряду в воздух расширяются продукты неполного превращения. Хотя начальная амплитуда взрывной волны при этом меньше, чем при полноценной детонации заряда, продолжающаяся реакция в разлетающихся продуктах не только поддерживает ударную волну, но также поддерживает высокую температуру в продуктах, смешивающихся с воздухом, и увеличивает неоднородность потока (т. е. эффективный коэффициент диффузии). Подтверждением такой гипотетической физической схемы взрыва может служить высокий локальный тротиловый эквивалент,

близкий к 4, зафиксированный в [24] при взрыве заряда в режиме низкоскоростной детонации.

Следует подчеркнуть, что все данные по так называемому общему тротиловому эквиваленту, приводимые для неидеальных и объемных взрывов, к которым относятся как детонация облаков топливно-воздушных смесей, так и любые взрывы одноктактных систем, не могут считаться объективной физической характеристикой. Дело в том, что анализ расчетных данных и экспериментальных регистраций давления на различных расстояниях от эпицентра взрыва четко демонстрирует зависимость этого эквивалента от расстояния. В связи с этим тротильный эквивалент как техническую характеристику можно указывать только как его среднее значение в конкретном диапазоне давлений на фронте. При этом следует указывать также и тротильный эквивалент по импульсу, зависимость которого от расстояния не совпадает с аналогичной зависимостью для амплитуды волны.

Теперь обсудим возможность организации подводного объемного взрыва. Наши эксперименты показывают [25], что реакция избыточного алюминия при взрыве в воде (как в режиме высокоскоростного конвективного горения, так и в режиме низкоскоростной детонации) может протекать практически до конца. Вследствие большой скорости звука в воде и медленного смешения продуктов взрыва с водой (из-за большой плотности воды) реакция алюминия с водой не может оказать влияния на амплитуду первичной ударной волны. Однако выделение энергии при сгорании частиц алюминия в воде протекает с достаточно высокой скоростью, что приводит к генерации вторичного импульса давления за времена, превышающие 500 мкс, для зарядов массой менее 200 г с высокой амплитудой и длительностью. Параметры импульса и полноту реагирования алюминия (в случае больших зарядов) можно регулировать предварительным барботированием газа вокруг заряда.

Таким образом, повышение энергетики взрыва за счет реакции избыточного алюминия в заряде вполне реально. При этом импульс давления, генерируемый в воде, имеет более «мягкую» форму (меньшую амплитуду, но большие длительность и работоспособность), чем импульсы, генерируемые взрывами обычных ВВ. Такие характеристики взрыва наиболее полно соответствуют требовани-

ям, предъявляемым в ряде практических приложений: разрушение льда, сейсморазведка, штамповка листовых материалов и формовка изделий из них, гидроакустика и добыча ценных горных пород без их дробления.

В. А. Теселкин

О некоторых аспектах регулирования и прогнозирования механической чувствительности энергетических материалов

Я хотел бы обсудить проблему безопасного приготовления и использования энергетических конденсированных систем (ЭКС).

Очевидно, для решения этой проблемы необходимо иметь надежную информацию о механической чувствительности ЭКС и механизме их инициирования. О чувствительности судят по величине критического напряжения возбуждения взрыва — $P_{кр}$ (чем оно ниже, тем выше чувствительность). Однако такую оценку нельзя считать полной. Для полной оценки чувствительности, как показано Г. Т. Афанасьевым, помимо $P_{кр}$ нужны сведения о пределе прочности и детонационной способности вещества.

На основании анализа закономерностей инициирования взрыва композиций окислитель–горючее, полученных более чем за 40-летний период, нами предложены некоторые возможные пути регулирования и прогнозирования чувствительности ЭКС. Они базируются на результатах исследования $P_{кр}$ смесей в зависимости от физико-химической природы, размера частиц и соотношения компонентов, термостойкости и теплотворной способности горючей добавки. Важное место при этом отводится установлению степени влияния физического и химического взаимодействия компонентов на процесс образования эффективных очагов взрыва при механическом нагружении слоев ЭКС.

Для композиций ПХА–горючее нами (совместно с И. А. Карпухиным) предложена физическая модель инициирования взрыва смесей, согласно которой важную роль в этом процессе играет химическое взаимодействие продуктов низкотемпературного разложения ПХА с горючей добавкой в очагах механического разогрева. Воз-

действуя на интенсивность химического взаимодействия за счет активирования или ингибирования низкотемпературного разложения ПХА, можно регулировать чувствительность бинарных композиций. Тепловыделение и уровень максимальной температуры химического взаимодействия зависят, в частности, от теплотворной способности горючей добавки. Нами экспериментально доказано, что с увеличением калорийности горючего чувствительность композиций возрастает. К такому же результату приводит использование в смесях горючих добавок с низкой термостойкостью. Вывод о возрастании чувствительности композиций с увеличением теплотворной способности горючего имеет универсальный характер и практически не зависит от природы окислителя.

Крупные кристаллы окислителя по отношению к мелким обладают большей общей дефектностью, макродефектами поверхности, играющими важную роль в процессах химического взаимодействия компонентов. Микрокапсулирование частиц окислителя специально подобранными пленкообразующими материалами с низкой реакционной способностью приводит к блокированию поверхностных дефектов и позволяет повысить температуру начала разложения ПХА и соответственно величину критического давления иницирования взрыва до уровня $P_{кр}$ смесей с мелким малодефектным окислителем. Этот прием может использоваться для флегматизации ЭКС.

Наряду с капсулированием энергоемких компонентов ЭКС (окислители, ВВ) для регулирования чувствительности могут использоваться эвтектические сплавы и молекулярные комплексы на основе ВВ, различные приемы модификации поверхности кристаллов, включая обработку ингибиторами, высаживание на поверхность материалов различной реакционной способности. В частности, осаждение на поверхности окислителя борорганических добавок или металлокарборанов может приводить к созданию высокочувствительных систем на уровне азидов свинца или гремучей ртути.

На примере модельных ВВ-содержащих твердотопливных композиций нами рассмотрены способы регулирования их чувствительности. Представляя рецептуру топлив как совокупность элементарных подсистем (индивидуальные ВВ, пары окислитель–ВВ, окислитель–горючее, ВВ–металл и др.), можно выделить состав («базовая подсистема»), который определяет чувствительность всей

взрывчатой системы в целом. Термин «базовая подсистема» впервые был предложен в работах С. В. Чуйко с сотрудниками при исследовании механизма горения смесевых ТРТ. По смыслу «базовая подсистема» формирует уровень тех или иных свойств всей системы в целом и описывается характеристиками, практически совпадающими по своей величине с характеристиками сложной композиции. Воздействуя на условия возбуждения взрыва «базовой подсистемы» (например, за счет изменения реакционной способности входящих в ее состав компонентов), можно целенаправленно повышать или снижать чувствительность модельных топлив. В качестве примеров я приведу конкретные данные по прогнозированию чувствительности некоторых бинарных композиций.

В. И. Пепекин

О чувствительности и детонационной способности взрывчатых веществ

Хочу высказать свое мнение о существующих подходах к решению задач чувствительности и детонационной способности ВВ. Чувствительность — очень важная составляющая в проблеме эксплуатационной безопасности ВВ. Она сохраняет свою актуальность на протяжении всей истории применения ВВ. Чувствительность не предсказывается и определяется только экспериментально. Задача прогнозирования чувствительности всегда привлекала внимание ученых.

В ИХФ для оценки чувствительности без привлечения эксперимента был применен энергетический подход. Принятая модель проста и понятна — энергоемкость ВВ пропорциональна чувствительности. Высоким концентрациям энергии соответствует высокая детонационная способность, сопровождаемая высокой чувствительностью. При снижении энергоемкости ниже некоторого критического значения ВВ становится недетонационноспособным.

В качестве энергоемкости принята максимальная теплота взрыва Q_{\max} (в ккал/кг). Это единственная энергетическая константа ВВ, характеризующая энергетический потенциал молекулы ВВ. Она позволяет сравнивать различные ВВ по запасу энергии и рас-

считывается исходя из химического состава и энтальпии образования того или иного ВВ. Максимальная теплота взрыва — комплексная характеристика ВВ, отражающая его химический состав и строение. Химический состав учитывается максимальным энергосодержанием продуктов взрыва, а строение — энтальпией образования.

Связь параметров, определяющих чувствительность ВВ, при механическом и ударноволновом воздействиях с Q_{\max} позволила установить критерий оценки чувствительности — энергоемкость молекулы, элементарно рассчитываемая из химического состава и энтальпии образования ВВ.

Теперь выскажу свое мнение о подходах к оценке детонационной способности ВВ. В качестве меры детонационной способности Ю. Б. Харитон предложил критический диаметр детонации. Прецизионные исследования А. Я. Апина в 1950–60-е гг. показали, что $d_{\text{кр}}$ не является константой ВВ и существенно изменяется в зависимости от его физического состояния. Обобщая экспериментальный материал, Апин показал, что $d_{\text{кр}}(\rho)$ описывается единой зависимостью, имеющей минимум и две ветви: ниспадающую ветвь для порошкообразных ВВ насыпной плотности и экспоненциально растущую ветвь для сплошных ВВ (прессованных и монокристалльных).

Принципиальный недостаток $d_{\text{кр}}$ как меры детонационной способности — полное игнорирование химического состава и свойств ВВ. Использование в XXI в. критерия, основанного на $d_{\text{кр}}$, приводит к ошибочным заключениям о детонационной способности ряда ВВ. Приведу пример.

Нитрогуанидин и ТАТБ не детонируют в условиях лабораторных методик, характерных для бризантных ВВ, т. е. критический диаметр заряда не может характеризовать их детонационную способность. На самом деле, нитрогуанидин и ТАТБ — детонационноспособные ВВ с высокой скоростью детонации (~ 8000 м/с). Нитрогуанидин при $\rho = 1,77$ г/см³ имеет скорость детонации 8200 м/с и метательную способность 76% октогена при $\rho = 1,695$ г/см³. Скорость детонации ТАТБ при $\rho = 1,91$ г/см³ равна 7500 м/с при диаметре заряда 60 мм. Взрывчатое вещество ТАТБ широко используется в современной спецтехнике.

Таким образом, по моему мнению, критерием оценки чувствительности и мерой детонационной способности является константа

ВВ — энергетический потенциал молекулы, элементарно и с высокой точностью рассчитываемый из химического состава и строения. Что касается критического диаметра детонации, то он, на мой взгляд, имеет историческое значение как этап в развитии отечественной науки о ВВ начала 1940-х гг.

Литература

1. Livengood, J. C., and W. A. Leary. 1951. Autoignition by rapid compression. *Ind. Eng. Chem.* 43(12):2797–805.
2. Saytzev, S. G., and R. I. Soloukhin. 1962. Study of adiabatically-heated gas mixture. *8th Symposium (International) on Combustion*. P. 344–347.
3. Семенов Н. Н. Цепные реакции. — Л.: Госхимтехиздат, 1934.
4. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — М.: Наука, 1967.
5. Zel'dovich, Y. B., B. E. Gelfand, S. A. Tsyganov, S. M. Frolov, and A. N. Polenov. 1987. Concentration and temperature nonuniformities of combustible mixtures as reason for pressure waves generation. *Dynamics of explosions*. Eds. A. L. Kuhl, J. R. Bowen, J.-C. Leyer, and A. Borisov. Progress in astronautics and aeronautics ser. 114:99–123.
6. Импульсные детонационные двигатели / Под ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2006.
7. Ремеев Н. Х., Власенко В. В., Хакимов Р. А. Численное моделирование и экспериментальное исследование рабочего процесса в модели импульсного детонационного двигателя прямоточной схемы // Импульсные детонационные двигатели / Под ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2006. С. 311–348.
8. Войцеховский Б. В. Стационарная детонация // Докл. АН СССР, 1959. Т. 129. № 6. С. 1254–1256.
9. Зельдович Я. Б. К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения // ЖТФ, 1940. Т. 10. Вып. 17. С. 1453–1461.
10. Соколовский Ф. С., Чуйко С. В., Нечай Г. В. Динамический критерий гетерогенности смесевых топлив // Хим. физика, 2004. Т. 23. № 7. С. 51–61.
11. Чуйко С. В., Соколовский Ф. С., Нечай Г. В. Взаимодействие подсистем компонентов в смесевых топливах // Хим. физика, 2005. Т. 24. № 9. С. 66–74.

12. Нечай Г. В., Соколовский Ф. С., Чуйко С. В. Влияние свойств базовой подсистемы компонентов на характеристики горения смесового топлива // Хим. физика, 2006. Т. 25. № 8. С. 47–54.
13. Чуйко С. В., Соколовский Ф. С., Нечай Г. В., Чернышев С. П. Регулирование скорости горения смесового топлива с учетом ее температурной чувствительности // Хим. физика, 2008. Т. 27. № 6. С. 68–72.
14. Чуйко С. В., Соколовский Ф. С., Нечай Г. В. Модель гетерогенного катализа горения конденсированных систем // Хим. физика, 2010. Т. 29. № 3. С. 67–75.
15. Фахрутдинов И. Х., Котельников А. В. Конструкция и проектирование ракетных двигателей твердого топлива. — М.: Машиностроение, 1987, с. 247.
16. Зельдович Я. Б. Теория горения пороха и приложение ее к реактивным снарядам. — М.: ИХФ АН СССР, 1942. (Перепечатано в сб. «Теория горения порохов и взрывчатых веществ». — М.: Наука, 1982. С. 186–225.)
17. Лейпунский О. И. К вопросу о физических основах внутренней баллистики реактивных снарядов. Докт. дисс. — М.: ИХФ АН СССР, 1945. (Перепечатано в сб. «Теория горения порохов и взрывчатых веществ». — М.: Наука, 1982. С. 226–277.)
18. Ассовский И. Г. Физика горения и внутренняя баллистика. — М.: Наука, 2005, 357 с.
19. Манелис Г. Б., Назин Г. М., Рубцов Ю. И., Струнин В. А. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ и порохов. — М.: Наука, 1996, 223 с.
20. Assovskiy I. G., Rashkovskiy S. A. 1999. 'Mache effect and combustion instability in solid rocket motor. *Propul. Power*, 1999. 15(6):856–60.
21. Ассовский И. Г., Рашковский С. А. Низкочастотная неустойчивость РДТТ. Влияние Махе эффекта и геометрии заряда // ФГВ, 2001. Т. 37. № 3. С. 83–93.
22. Рашковский С. А., Милёхин Ю. М., Федорычев А. В., Ассовский И. Г. Устойчивость горения в ракетном двигателе на твердом топливе с системой стабилизации давления // ДАН, 2009. Т. 428. № 2. С. 206–210.
23. Ассовский И. Г., Рашковский С. А. Устойчивость горения твердых ракетных топлив в двигателях с управляемой тягой // Перспективные материалы и технологии для ракетно-космической техники. Т. 3. Сер. «Космический вызов 21-го века». — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2007. С. 306–309.

24. Борисов А. А., Сулимов А. А., Сукоян М. К., Комиссаров П. В., Шамшин И. О., Ибрагимов Р. Х., Михайлов Ю. М. Взрывные волны в открытом пространстве при неидеальной детонации высокоплотных смесевых составов, обогащенных алюминием // Хим. физика, 2009, Т. 28. № 11. С. 59–68.
25. Комиссаров П. В., Соколов Г. Н., Борисов А. А. Особенности подводного взрыва неидеально детонирующего энергетического материала, богатого алюминием // Хим. физика, 2011. Т. 30. № 2. С. 62–69.