

ДИСКУССИОННЫЙ РАЗДЕЛ

В данном разделе публикуются некоторые материалы пленарной дискуссии на тему **«Распространение горения в узких каналах и пористых средах»**, которая прошла в рамках ежегодной научной конференции отдела горения и взрыва ИХФ РАН (г. Москва, 10–12 февраля 2016 г.). В конференции приняли участие сотрудники ИХФ РАН и специалисты из других российских научных центров (ИАП РАН, ИНХС РАН, ИНЭПХФ РАН, ИСМАН, ИТ СО РАН, ОИВТ РАН и др.), научно-производственных организаций (НПО «Энергомаш» им. академика В. П. Глушко, ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», ЗАО «Компомаш-ТЭК», НИФХИ им. Л. Я. Карпова, ОКБ им. А. Люльки, ООО «АВЛ», ООО «ПироВзрыв», ФЦДТ «Союз», ФГУП ЦИАМ, 25 ГосНИИ МО РФ и др.) и высших учебных заведений (МГТУ им. Н. Э. Баумана, МГУ им. М. В. Ломоносова, МФТИ, НИЯУ МИФИ, РГУ нефти и газа и др.), а также из Национальной академии наук Беларуси (ИТМО НАН Беларуси), всего около 150 человек.

ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЯХ ТВЕРДЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ. ДВЕ СТОРОНЫ МЕДАЛИ

Б. С. Ермолаев¹

Образование дефектов (отслоений, каверн, микротрещин и т.д.) при механических деформациях твердых ракетных топлив, в которые при горении может проникать пламя, резко увеличивая поверхность горения, создает предпосылки для нештатной ситуации и аварийного взрыва. Естественно, с точки зрения взрывобезопасности этот процесс является негативным, и его подавляют, стараясь повысить адгезию компонентов и прочность топлива на растяжение или сдвиг.

Существует, однако, другая сторона вопроса, связанная с быстрогорящими топливами, горение которых протекает в режиме конвективного горения, хотя в нормальных условиях их газопроницаемость равна нулю. В качестве известных примеров таких топлив можно назвать смесевое топливо НТБС [?], изготавливаемое методом свободного литья, и быстрогорящие смесевые композиции (VHBR) на основе гидрида бора, разработанные в США [?]. Топливо НТБС, содержащее 50% быстрогорящего энергетического материала БТФ, размер частиц 0,2 мм, матрицу из пластифицированной сферической нитроцеллюлозы и ряд добавок, имеет газонепроницаемую пористость 2%–3%. Порог конвективного горения 27 МПа, скорость конвективного горения 40–60 м/с при давлении 100 МПа, показатель степени по давлению 0,2. Газопроницаемость на уровне 10^{-2} – 10^{-3} Дарси появляется при нагружении образца давлением выше 1 МПа. Пример возбуждения конвективного горения в бомбе с дожигательной секцией в заряде топлива НТБС дан на рисунке.

Смесевые композиции на основе гидрида бора также горят в режиме конвективного горения, скорость горения в зависимости от состава изменяется от 1 до 500 м/с при давлении 100 МПа. Газопроницаемость появляется под действием сдвиговых напряжений, генерируемых при горении заряда, которые вызывают появление пористости (процесс, названный *deconsolidation*). Конвективное горение протекает с образованием облака мелкодисперсных горящих частиц топлива.

В целом, управление характеристиками горения этих топлив, необходимое для их применения, представляет определенные трудности. Согласно нашему опыту, капсулирование частиц топлива тонкими полимерными пленками дает возможность решить проблему, предотвращая опасность взрывного развития горения и придавая горению регулярные свойства.

¹Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук,
boris.ermolaev@yahoo.com



Пример возбуждения конвективного горения (пороговое давление 27 МПа, средняя скорость около 30 м/с) в бомбе с дожигательной секцией в заряде топлива НТБС (диаметр заряда 10 мм, длина 120 мм). Время слева направо, расстояние сверху вниз

Литература

1. Сулимов А. А., Ермолаев Б. С., Храповский В. Е., Сукоян М. К. Конвективное горение литевых смесевых композиций // 5-я Всеросс. конф. «Энергетические конденсированные системы» — Черногловка, 2010. С. 62–63.
2. Baer P. G., May I. W. Traveling-charge effect // *Gun propulsion technology* / Ed. L. Stiefel. — Progress in astronautics and aeronautics ser. — Washington, DC, USA: AIAA Inc., 1988. Vol. 109. P. 499–536.

КОНВЕКТИВНОЕ ГОРЕНИЕ В ТРЕЩИНАХ СМЕСЕВЫХ ТВЕРДЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ

А. А. Сулимов¹

В 1960-х гг. в ИХФ РАН были проведены обстоятельные исследования конвективного горения в трещинах смесевых твердых ракетных топлив (СТРТ). Полученные результаты представлены в [?, ?, ?]. Актуальность этих работ была обусловлена необходимостью разобраться в причинах аварийных взрывов ракетных двигателей с зарядами из СТРТ, имевших место на ранней стендовой стадии их отработки.

¹Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, aasul@chph.ras.ru

В то время СТРТ состояло из полимерного инертного связующего, перхлората аммония, алюминия и каталитических добавок. Исследовались искусственные недеформируемые трещины, образованные двумя плоскопараллельными пластинами толщиной 3–5 мм из реальных СТРТ, которые заключались в прочные оболочки. В опытах изменялись глубина трещины (в диапазоне 50–100 мм), ее раскрытие (расстояние между пластинами пороха) и начальное давление. Была разработана установка, позволяющая проводить одновременно скоростную киносъемку процесса распространения пламени вдоль трещины, регистрацию давления в зависимости от времени непосредственно в горячей трещине и ее гашение резким сбросом давления. Определены критические условия, механизм и последствия проникания горения в трещину.

Были получены неожиданные результаты: (1) горение способно проникать в тончайшие трещины СТРТ с раскрытием порядка 0,01 мм с высокими скоростями (порядка десятка и сотен метров в секунду), при этом в трещине реализуется высокое избыточное давление, достигающее сотен атмосфер; (2) избыточное давление вызывает разрушение стенок трещины, создает высокоскоростной поток истекающих продуктов, приводящий к интенсивному эрозионному разгоранию стенок трещины. Все эти факторы вызывают резкое увеличение газопритока из области трещины и, следовательно, давления в двигателе.

Были получены количественные зависимости, связывающие скорость конвективного воспламенения и избыточное давление с начальным раскрытием и глубиной трещины. В специальной серии опытов изучался рост трещины, находящейся в массиве топлива. Учитывалось расширение трещины вследствие деформации окружающего ее топлива. Выявлена важная роль физико-механических свойств и коэффициента сцепления топлива. Определены условия, при которых начинается рост трещины. В зависимости от начальных геометрических размеров были выделены четыре характерные области: механической и практической устойчивости, область ограниченного роста, где увеличение глубины конечно, и область безграничного самоподдерживающегося роста. Выявлен эффект ветвления растущей трещины.

Таким образом, наличие трещин (даже единичной) приводит к увеличению поверхности горения, дополнительному газопритоку из области горячей трещины, к росту давления в двигателе, что может вызывать наблюдаемое на практике разрушение двигателя. Подчеркнем, что эти выполненные своевременно исследования способствовали целенаправленному поиску путей подавления образования, развития трещин и обеспечению нормальной безаварийной работы ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ). Это было достигнуто за счет существенного улучшения технологии изготовления и физико-механических свойств топлив. Отметим, что полученные результаты соответствуют СТРТ на инертном связующем, когда стадия конвективного горения являлась конечной стадией развития взрывного процесса.

Иная картина наблюдается, если в составе смесового топлива используются мощные взрывчатые вещества (ВВ) (октоген, гексоген). Американские исследова-

дователи столкнулись с проблемой трещин позднее, в 1970-х гг. при отработке октогенсодержащих топлив к РДТТ типа Трайдент. При этом наблюдались взрывы детонационного характера. Для решения этой проблемы были привлечены видные американские исследователи. О размахе проведенных в то время работ свидетельствуют многочисленные публикации, посвященные горению в трещинах, подтвердившие в основном наши результаты, а также работы по переходу горения в детонацию пористых октогенсодержащих композиций. В большинстве этих работ содержатся ссылки на монографию [?], переведенную к тому времени на английский язык. Таким образом, можно констатировать, что развитие горения в трещинах ВВ-содержащих топлив не ограничивается стадией конвективного горения. Однако, несмотря на обширные исследования, механизм возникновения детонационноподобных процессов в ВВ-содержащих топливах в условиях РДТТ остается неясным. Установленный факт существования в таких топливах низкоскоростной детонации [?, ?], представляется полезным при прояснении данного механизма.

Литература

1. Сулимов А. А. Изучение нарушения устойчивого послойного горения газопроницаемых и трещиноватых систем. Дисс. . . . канд. физ.-мат. наук, 1965. 151 с.
2. Беляев А. Ф., Боболев В. К., Коротков А. И., Сулимов А. А., Чуйко С. В. Переход горения конденсированных систем во взрыв. — М.: Наука, 1973. 293 с.
3. Сулимов А. А., Сукоян М. К. Исследования взрывных процессов в твердых ракетных топливах. — Черногловка, 1978. Препринт. 31 с.
4. Сулимов А. А., Ермолаев Б. С. Низкоскоростная детонация в литых смесевых топливах // Горение и взрыв, 2016. Т. 9. № 1. С. 125–130.

О ТЕПЛОМАССОБМЕНЕ И ПРЕДЕЛАХ ГОРЕНИЯ В МИКРО- И НАНОПОТОКАХ

И. Г. Ассовский¹

Аннотация: Обсуждаются парадоксальные особенности теплообмена в потоках газа в микро- и наноканалах, характеризующихся большими значениями критерия Кнудсена и малыми значениями критерия Рейнольдса. Определенное внимание уделяется влиянию транспортных процессов на распространение горения в узких каналах в предельном случае свободно-молекулярного течения.

Ключевые слова: микро- и нанотечения; теплообмен; распространение химической реакции; горение; гетерогенный катализ

¹Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, assov@chph.ras.ru

Литература

1. *Knudsen M.* Eine Revision der Gleichgewichtsbedingung der Gase. Thermische Molekularströmung // *Ann. Phys.*, 1910. Vol. 31. P. 205–229.
2. *Knudsen M.* Thermischer Molekulardruck der Gase in Röhren // *Ann. Phys.*, 1910. Vol. 338, No. 16. P. 1435–1448.
3. *Karnidakis G., Beskok A., Aluru N.* Microflows and nanoflows. Fundamentals and Simulation. (Foreword by Chih-Ming Ho). — Interdisciplinary Applied Math. Springer Science + Business Media, Inc., 2005. 817 p.
4. *Берд Г.* Молекулярная газовая динамика / Пер. с англ. — М.: Мир, 1981. 319 с. (*Bird G. A.* Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows. — Oxford University Press, 1994. 479 p.)
5. *Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П.* Физическая кинетика. — М.: Наука, Физматлит, 1979. 528 с.
6. *Белоцерковский О. М., Ерофеев А. И., Яницкий В. Е.* О нестационарном методе прямого статистического моделирования течений разреженного газа // *Ж. вычислит. мат. мат. физ.*, 1980. Т. 20. С. 1174.
7. *Тимохин М. Ю., Иванов И. Э., Крюков И. А.* Применение системы моментных уравнений для математического моделирования газовых микротечений // *Ж. вычислит. мат. мат. физ.*, 2013. Т. 53. № 10. С. 1721–1738.
8. *Коган М. Н., Галкин В. С., Фрилендер О. Г.* О напряжениях, возникающих в газах вследствие неоднородности температуры и концентраций. Новые типы свободной конвекции // *УФН*, 1976. Т. 119. С. 111.
9. *Рашковский С. А., Ассовский И. Г.* Термо- и электрофорез при горении капель металлов. Научная конференция ИХФ РАН. — М.: ИХФ РАН, 2002. С. 45–46.
10. *Зельдович Я. Б.* Теория горения газов. — М.: АН СССР, 1944. (Перепечатано в сб. Теория горения и взрыва. — М.: Наука, 1981. С. 306–346.)
11. *Assovskiy I. G.* Propagation rate and wave structure of heterogeneous catalytic combustion // 3rd Russia–China Seminar on Catalysis. — Новосибирск: Ин-т катализа СО РАН, 2004.
12. *Ассовский И. Г., Рашковский С. А.* О релаксации бинарных капель к равновесным формам // *Докл. РАН. Физ. химия*, 2002. Т. 385. № 1. С. 75–79.
13. *Megaridis C. M., Guvenc A., Libera J. A., Gogotsi Y.* Attoliter fluid experiments in individual closed-end carbon nanotubes: Liquid film and fluid interface dynamics // *Phys. Fluids*, 2002. Vol. 14. No. 2. P. L5–L8.
14. *Assovskiy I. G.* Metallized SWCNT — promising way to low sensitive high energetic nanocomposites // *Propell. Explos. Pyrotech.*, 2008. Vol. 33. Iss. 1. P. 51–54.