

УДК 662.311;536.16

О ПОДВОДНОМ ГОРЕНИИ БАЛЛИСТИТНОГО ТОПЛИВА В ПОЛЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ ПРИ ДВИЖЕНИИ ФРОНТА ГАЗООБРАЗОВАНИЯ ПО НАПРАВЛЕНИЮ ВЕКТОРА ПЕРЕГРУЗОК

В. Д. Барсуков, С. В. Голдаев, Н. П. Минькова, С. А. Басалаев

НИИ прикладной математики и механики при Томском государственном университете, 634050 Томск
barsukov@niipmm.tsu.ru

Обсуждены результаты экспериментов по подводному горению баллиститного топлива в поле центробежных сил при движении фронта газообразования по направлению действия перегрузок. Реализация необходимых условий горения обеспечивалась использованием подвижного локализатора зоны горения, представляющего собой надеваемый на исследуемый образец топлива стакан из термостойкого материала.

Ключевые слова: баллиститное топливо, перегрузка, водная среда, подвижный локализатор зоны горения, фронт газообразования.

ВВЕДЕНИЕ

В научно-технической литературе широко представлены работы по исследованию горения конденсированных веществ в поле массовых сил, когда процесс протекает в газовой среде [1–4]. С другой стороны, известны работы по исследованию подводного горения конденсированных веществ [5–7]. Вызывает интерес исследование процесса горения при совместном действии указанных факторов. Эти вопросы могут оказаться важными и для практики. Действительно, глубоководные силовые устройства, в которых предлагается использовать баллиститные топлива типа пороха Н в качестве источников сжатого газа [6], в процессе эксплуатации могут испытывать ускорение. Поэтому для их проектирования знание закономерностей подводного горения в поле массовых сил может оказаться полезным.

Настоящая работа посвящена экспериментальному подтверждению возможности горения баллиститного топлива в условиях перегрузок и наличия окружающей водной среды при движении фронта газообразования по направлению действия центробежных сил, а также в цели работы входили разработка и реализация методики определения массовой скорости горения топлива в этих условиях и получение соответствующей приближенной формулы для ее оценки.

Авторам не удалось обнаружить в литературе сведений о реализации (без технических средств) горения в поле центробежных сил непосредственно в водной среде. Отсутствует также описание технических средств, необходимых для осуществления такого процесса, не говоря уже о получении экспериментальной зависимости массовой скорости горения от перегрузки. Поэтому было разработано новое устройство [8], которое позволяет не только реализовать (по-видимому, впервые) горение топлива в таких условиях, но и визуализировать процесс и определить массовую скорость горения при различных перегрузках.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На испытуемый цилиндрический образец 1 с электровоспламенителем 2 в виде изолированной плоской спирали накаливания надет подвижный локализатор зоны горения (ПЛЗГ) 3, выполненный в виде термостойкого стакана (рис. 1). Снаряженный образец помещают в дискообразную камеру сжигания 5, установленную на валу 4 с возможностью ее вращения. В камере имеется прозрачная крышка 6 из плексигласа с центральным отверстием для ввода электроконтакта и выхода газов. Один конец образца закреплен на шарнирной опоре 7 с боковой неустойчивостью, допускающей поворот вокруг вертикальной оси. ПЛЗГ снабжен охватывающей образец направляющей 8, закрепленной на подставке 9, нахо-

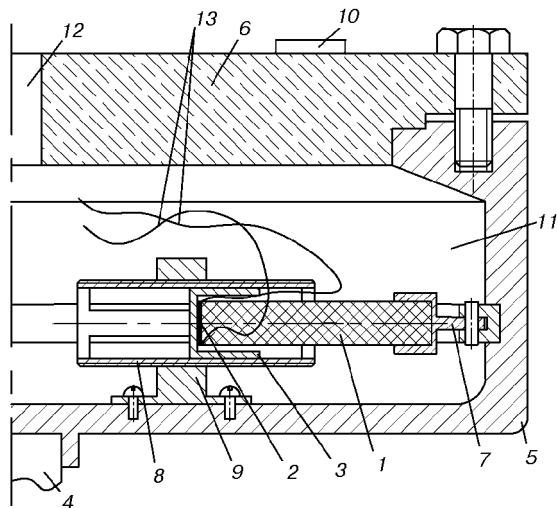


Рис. 1. Устройство для проведения экспериментальных исследований:

1 — образец твердого топлива, 2 — электровоспламенитель, 3 — подвижный локализатор зоны горения, 4 — вал, 5 — дискообразная камера сжигания, 6 — прозрачная крышка, 7 — шарнирная опора, 8 — направляющая, 9 — подставка, 10 — видеорегистратор, 11 — вода, 12 — центральное отверстие, 13 — электропровода

дящейся на днище камеры. По длине охватывающая часть направляющей соответствует части образца, предназначенной для сжигания.

Направляющая имеет вид трубки с продольными отверстиями для прохода продуктов горения. Подставка и направляющая выполнены в виде резьбовой пары. На прозрачной крышке установлен регистратор процесса 10. Электровоспламенитель и источник питания связаны между собой проходящим через центральное отверстие 12 в крышке стержнем со скользящими контактами его верхней части (на схеме не показаны) и электропроводами 13. На рис. 2 представлена фотография установки (без крышки) со снаряженным образцом.

Перед испытанием камеру сжигания заполняют водой 11. После запуска электромотора и набора необходимого числа оборотов вода приобретает отличный от горизонтального уровень. Подача напряжения на электровоспламенитель приводит к его разогреву, испарению прилегающей воды и зажиганию топлива сначала по торцевой части испытуемого образца, а затем и по его боковой поверхности, защищенной от воды подвижным локализатором зоны горения. Образующиеся продукты горения, вытеснив воду из полости ПЛЗГ, попа-



Рис. 2. Камера сжигания установки для исследования подводного горения унитарных твердых топлив в поле центробежных сил

дают в основной водный объем. Далее продукты горения барботируют за счет силы Архимеда, которая многократно усилена действием центробежных сил, и затем, уже охлажденные, через центральное отверстие в крышке поступают в атмосферу.

При установившемся режиме горящая часть образца внутри ПЛЗГ приобретает форму усеченного конуса (см. рис. 3, на котором сечение образца изображено без штриховки), и через образовавшийся зазор происходит истечение продуктов горения. Причем по мере выгорания топлива подвижный локализатор зоны горения, ввиду воздействия на него поля центробежных сил, движется вдоль образца, «сле-

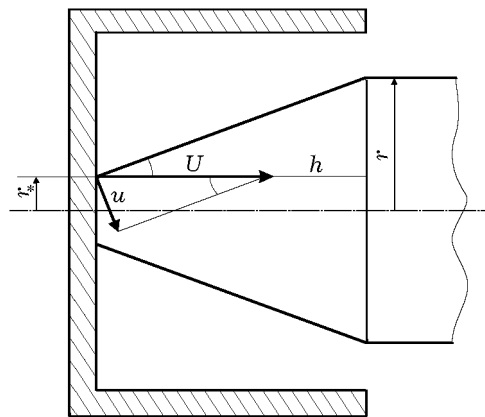


Рис. 3. Продольное сечение ПЛЗГ и горящего образца топлива с изображением векторов скоростей

дя» за фронтом горения и осуществляя при этом непрерывную локализацию зоны газообразования в динамическом режиме.

В опытах использовались небронированные образцы баллиститного топлива типа пороха Н скругленной формы (ручная обработка) диаметром $14.5 \div 15$ мм и длиной 80 мм. Для регистрации скорости вращения применялся геркон, соединенный с персональным компьютером через аудиоразъем для микрофона. Запись и обработка сигнала велись с помощью программы PowerGraph. Перемещения ПЛЗГ регистрировал видеорегистратор INTEGO VX-90, обеспечивающий скорость съемки 30 кадр/с.

С помощью программы VirtualDub в видеофайл «монтировалась» виртуальная линейка. Далее фрагмент видеозаписи от начала и до конца горения «вырезался» и разбивался на серию кадров, продолжительность каждого кадра $1/30$ с. Положение ПЛЗГ соотносилось с виртуальной линейкой. После масштабирования проводился перерасчет переменного расстояния верхней части ПЛЗГ от центра вращения. По полученным данным строилась зависимость координаты движения ПЛЗГ R от времени его движения t .

На рис. 4 приведен типичный график движения ПЛЗГ при средней относительной перегрузке 252.8. Наблюдаются три режима его

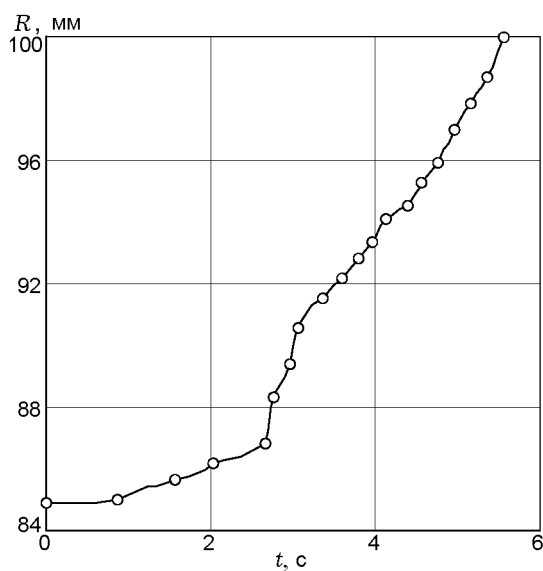


Рис. 4. Зависимость координаты ПЛЗГ от времени при частоте вращения 25.5 с^{-1} и диапазоне перегрузки $250 \div 255$

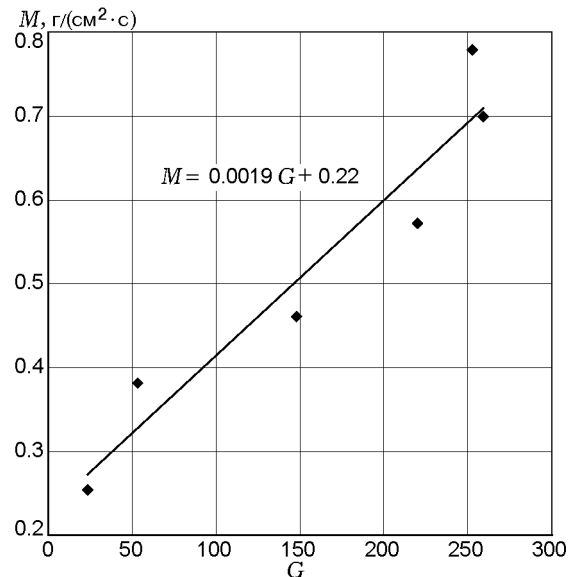


Рис. 5. Экспериментальная зависимость массовой скорости горения топлива от перегрузки

движения, а следовательно, и темпа газообразования (массовой скорости горения). Сначала с небольшой скоростью осуществляется движение, связанное с горением плоской поверхности торца. Затем движение ускоряется, что обусловлено сломом образовавшегося топливного «штырька». Далее процесс выходит на установившийся режим с поддержанием конусной формы поверхности горячей части топлива.

Для определения скорости движения ПЛЗГ выбирали участок графика с приблизительно постоянным углом наклона кривой $R(t)$. С помощью программы Microsoft Excel 2010 осуществлялась линейризация этого участка. Производная от линейной функции $R(t)$ давала непосредственно скорость движения ПЛЗГ. Полученные экспериментальные данные и результаты их обработки представлены на рис. 5.

При проведении исследований значение перегрузки определялось с относительной погрешностью не более 6.5 %, а массовая скорость — с погрешностью не более 13 %.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Процесс подводного горения твердого топлива в поле центробежных сил при движении фронта газообразования по направлению действия перегрузок имеет ряд особенностей. Во-первых, фронт газообразования постоянно смещается в сторону возрастающих перегрузок,

поэтому горение сопровождается ростом гидростатического давления воды. Во-вторых, возрастающие перегрузки увеличивают силу поджатия ПЛЗГ к поверхности газообразования. Оба названных фактора, каждый в определенной степени, оказывают влияние на увеличение темпа газообразования. Процесс горения твердого топлива и движения ПЛЗГ представляется следующим.

При подаче напряжения на спираль накаливания изолирующая прослойка плавится и происходит воспламенение топлива по всей торцевой поверхности. Далее продукты горения вытесняют воду из полости ПЛЗГ, попутно воспламеняя топливо по обнажающейся боковой поверхности образца. При этом между торцевой поверхностью горения и дном ПЛЗГ может сохраняться газовая прослойка, площадь которой затем уменьшается из-за горения образца по боковой поверхности. Когда поверхность становится настолько малой, что оттекающие от нее газы не могут компенсировать действие перегрузки, ПЛЗГ «садится» непосредственно на торец образца и горение торца прекращается. Связано это с тем, что ПЛЗГ, изготовленный из высокотеплопроводного материала (сталь), контактирует с окружающей водой и его температура достаточно низка. По боковой же поверхности горение продолжается, и, следовательно, площадь торца, контактирующего с дном ПЛЗГ, продолжает уменьшаться.

При достижении некоторого критического диаметра контакта под действием перегрузки конечная часть образца разрушается и ПЛЗГ скачкообразно продвигается по направлению действия центробежных сил. При этом к горению подключаются новые участки боковой поверхности образца, в результате чего происходит дополнительное увеличение интенсивности газообразования. Поскольку некоторая часть топлива периодически разрушается, форма горячей поверхности имеет вид усеченного конуса. Причем эта поверхность обдувается выходящими из ПЛЗГ продуктами газообразования.

При разработке упрощенной математической модели движения ПЛЗГ возможным влиянием обдувающего потока на скорость горения пренебрегалось. Не учитывалось также влияние перегрузки на скорость горения топлива по конической поверхности (речь идет о влиянии на структуру области горения в газовой фазе,

не связанной с изменением гидростатического давления).

Результатом влияния периодического разрушения «носика» конуса на темп газообразования является уменьшение толщины горящего свода в радиальном направлении. Поэтому для приближенного расчета скорости продвижения ПЛЗГ использовалось подобие треугольников (см. рис. 3), построенных на профиле усеченного конуса поверхности горения и на векторах скорости горения u и скорости движения ПЛЗГ U (с учетом разрушения топлива при достижении критического радиуса r_*):

$$\frac{U}{u} = \frac{[h^2 + (r - r_*)^2]^{0.5}}{r - r_*}, \quad (1)$$

где h — высота газовой полости ПЛЗГ, r — радиус образца топлива.

Оценка критического радиуса, зависящего от прочностных характеристик топлива и размера массовых сил, получена из соотношения

$$r_* = \left(\frac{mgG}{\pi\sigma} \right)^{0.5}, \quad (2)$$

где m — масса ПЛЗГ, g — ускорение свободного падения, G — среднее значение перегрузки, σ — допустимое напряжение для исследуемого топлива. Перегрузка G определялась как отношение центробежной силы к силе тяжести:

$$G = (2\pi n)^2 R/g, \quad (3)$$

где n — частота оборотов камеры сжигания, а величину R требуется пояснить: это расстояние от оси вращения центрифуги не до поверхности горящего торца, а до центра тяжести ПЛЗГ (в экспериментах центр тяжести ПЛЗГ отстоял от донной части на 10 мм).

С учетом выражения (2) соотношение для скорости движения ПЛЗГ принимает вид

$$U = \frac{u\{h^2 + [r - (Gmg/\pi\sigma)^{0.5}]^2\}^{0.5}}{r - (Gmg/\pi\sigma)^{0.5}}. \quad (4)$$

Для топлива, использованного в экспериментах в пределах реализованных давлений p , закон горения аппроксимируется линейной зависимостью $u = 1.94p + 0.45$, где p — [МПа], u — [мм/с].

Размер приращения гидростатического давления Δp_1 , создаваемого центробежной силой, по сравнению с атмосферным на уровне центра тяжести ПЛЗГ зависит от толщины

слоя воды и может быть определен из следующего соотношения [9]:

$$\begin{aligned}\Delta p_1 &= 2\rho\pi^2 n^2 (R^2 - R_0^2) = \\ &= 2\rho\pi^2 n^2 H(R + R_0),\end{aligned}\quad (5)$$

где ρ — плотность воды, R_0 — расстояние от оси вращения камеры сжигания до поверхности воды, H — расстояние от поверхности воды до координаты центра тяжести ПЛЗГ.

Однако нормальная скорость горения определяется давлением на выходе из ПЛЗГ (ввиду его жесткости), который находится ниже по направлению перегрузки на величину l . Поэтому необходимо учесть добавку к давлению

$$\begin{aligned}\Delta p_2 &= 2\rho\pi^2 n^2 [(R + l)^2 - R^2] = \\ &= \rho g l G + 2\rho\pi^2 n^2 l^2.\end{aligned}\quad (6)$$

После подстановки этих добавок, включая атмосферное давление, в выражение для скорости горения получаем соотношение для нормальной скорости горения при давлении, имеющем место при действии перегрузок:

$$\begin{aligned}u &= 1.94[0.1 + \rho g(0.5H + l)G + \\ &+ 2\rho\pi^2 n^2 (HR_0 + l^2)] + 0.45.\end{aligned}\quad (7)$$

Совокупность соотношений (4) и (7) с учетом плотности топлива ρ_p позволяет перейти к выражению для массовой скорости горения M при движении фронта газообразования по направлению действия перегрузок:

$$\begin{aligned}M &= \rho_p \{1.94[0.1 + \rho g(0.5H + l)G + \\ &+ 2\rho\pi^2 n^2 (HR_0 + l^2)] + 0.45\} \times \\ &\times \frac{\{h^2 + [r - (Gmg/\pi\sigma)^{0.5}]^2\}^{0.5}}{r - (Gmg/\pi\sigma)^{0.5}}.\end{aligned}\quad (8)$$

Здесь выражение в первых фигурных скобках определяется ростом нормальной скорости горения при повышении гидростатического давления, обусловленного наличием массовых сил, выражение во вторых фигурных скобках вместе со знаменателем связано с увеличением поверхности горения за счет ПЛЗГ и с периодическим разрушением острия конусной части горящего образца. Обе составляющие при повышении перегрузки приводят к росту массовой скорости горения.

G	M, г/(см ² ·с)	
	эксперимент	расчет
23.4	0.25	0.33
53.2	0.38	0.36
148	0.46	0.47
220.2	0.57	0.54
252.8	0.78	0.59
259.5	0.76	0.59

Для сравнения с данными экспериментов по полученным соотношениям проведены расчеты скорости движения ПЛЗГ и массовой скорости горения. При этом использовались следующие характеристики: $h = 20$ мм, $r = 7.5$ мм, $m = 41.3$ г, $\sigma = 10$ МПа, $l = 15$ мм, $R_0 = 26$ мм, $\rho_p = 1.59$ г/см³. Результаты приведены в таблице. Видно, что за исключением крайних точек расчетные и экспериментальные значения удовлетворительно согласуются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Впервые осуществлено горение в водной среде баллистического топлива в условиях действия перегрузок при движении фронта газообразования по направлению действия центробежных сил. Процесс горения обеспечивается использованием подвижного локализатора зоны горения.

- Предложена и реализована методика определения массовой скорости горения топлива в этих условиях с частичной визуализацией процесса. Показано, что при увеличении относительной перегрузки от 23.4 до 259 массовая скорость подводного горения возрастает от 0.25 до 0.70 г/(см²·с).

- Получена приближенная формула для массовой скорости подводного горения в поле массовых сил при движении фронта газообразования по направлению действия перегрузок, позволяющая оценить влияние водной среды и конструктивных характеристик локализатора зоны горения на исследуемый процесс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Орджоникидзе С. К., Марголин А. Д., Похил П. Ф. Горение конденсированных ВВ при перегрузках // Материалы 3-го Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. — М.: Наука, 1972. — С. 83–86.

2. Максимов Ю. М., Максимов Э. И., Виллюнов В. Н. Влияние перегрузок на горение модельных смесевых металлизированных составов // Физика горения и взрыва. — 1974. — Т. 10, № 2. — С. 169–177.
3. Архипов В. А., Барсуков В. Д., Березиков А. П., Третьяков Н. С. Особенности горения конденсированных систем с катализаторами в условиях перегрузки // Хим. физика и мезоскопия. — 2006. — Т. 9, № 1. — С. 43–51.
4. Бабук В. А., Васильев В. А., Потехин А. Н. Экспериментальное исследование процесса агломерации при горении алюмизированных твердых топлив в поле перегрузок // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 1. — С. 38–46.
5. Барсуков В. Д., Голдаев С. В., Минькова Н. П., Муленок Е. В. О горении унитарных твердых топлив в жидкой среде // Изв. вузов. Физика. — 1993. — № 4. — С. 110–118.
6. Барсуков В. Д., Голдаев С. В. Подводное зажигание и горение унитарных твердых топлив. Теория, эксперимент, технические приложения. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003.
7. Мухутдинов А. Р. Визуальное изучение процесса горения твердого топлива // Проблемы энергетики. — 2007. — № 1, 2. — С. 60–64.
8. Пат. 2425283 РФ, МПК F23B 99/00, F02K 9/08. Устройство для исследования подводного горения унитарных твердых топлив при перегрузках / В. Д. Барсуков, С. В. Голдаев, К. В. Пахнутов, С. А. Басалаев. — Заявл. 11.08.2009; Опубл. 27.07.2011, Бюл. № 21.
9. Альтшуль А. Д., Животовский Л. С., Иванов А. П. Гидравлика и аэродинамика. — М.: Стройиздат, 1987.

*Поступила в редакцию 1/IV 2012 г.,
в окончательном варианте — 5/III 2013 г.*