

УДК 621.436

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОМОТОРОВ ГОРЕНИЯ В УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВАХ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2013 Н. В. Петрухин, С. М. Сергеев, О. А. Прокопенко, М. О. Грек

ФАУ «25ГосНИИ химмотологии Минобороны России», г. Москва

Проведён анализ опубликованных данных и представлены результаты экспериментальных исследований авторов по действию промоторов горения – пероксидов и гидропероксидов на скорость турбулентного горения горючего ТС-1. Установлено, что возможно увеличение удельного импульса тяги модельного ИДД в 2,5 - 3,0 раза, в такой же степени и скорости горения ТВС. Обоснован механизм действия промоторов на повышение активности ТВС в процессе горения.

Импульсно-детонационный двигатель, гиперзвуковой двигатель, топливовоздушная смесь, детонация, гидроксильный и пероксидный радикалы, промотор, удельный импульс тяги.

Решение проблемы использования углеводородных топлив в импульсно-детонационных (ИДД) и гиперзвуковых (ГПВРД) двигателях возможно при значительном повышении горючести топливовоздушной смеси. В случае ИДД это необходимо для сокращения перехода горения в детонацию (ПГД) при низкой энергии инициирования. При использовании горючего в ГПВРД промоторы необходимы для сокращения периода самовоспламенения и повышения устойчивости пламени в камере сгорания в сверхзвуковом потоке воздуха.

Несмотря на различия в принципах работы и эксплуатации этих двигателей, решение обозначенной проблемы имеет общее – повышение реакционной способности ТВС в процессах воспламенения и горения. Известно, что свободные радикалы существенно влияют на стадию вос-

пламенения ТВС и соответственно на протекание процессов горения и детонации. Не вникая в подробности механизма горения углеводородов, отметим, что основными радикалами, ведущими процесс, являются метильный, гидроксильный и пероксидный. Наиболее активный из них – гидроксильный (табл. 1).

Скорость гибели его на два порядка выше пероксидного и на 2,5 порядка – метильного. При подъёме температуры ТВС число радикалов увеличивается, что при определённых условиях приводит к цепному воспламенению. Расчёт концентрации свободных радикалов в ТВС показывает, что при введении промотора в топливо при одинаковых условиях число гидроксильных радикалов резко увеличивается (табл. 2). Этот эффект приводит к активизации воспламенения ТВС.

Таблица 1. Расчётные значения скоростей гибели свободных радикалов при термоллизе углеводородных ТВС

Радикал	$\cdot\text{CH}_3$	$\cdot\text{OH}$	$\cdot\text{OON}$
Скорость гибели k , $\text{см}^3/\text{моль}\cdot\text{с}$ [1]	$4,4\cdot 10^{10}$	$1\cdot 10^{13}$	$1\cdot 10^{15}$

В табл. 3 приведены характеристики исследованных промоторов [2]. Как следует из приведённой таблицы, наиболее активными к образованию свободных

гидроксильных радикалов являются третбутилгидропероксид и бензоилпероксид.

Образование радикалов проходит по следующим реакциям [2]:

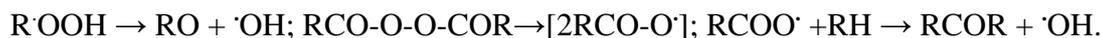


Таблица 2. Расчётные результаты зависимости роста активных радикалов с ростом температуры при введении пероксидного промотора

Радикал	Условие	T, K	C(R), частиц/см ³
$\cdot CH_3$	нагрев	500	10^{10}
$\cdot OH$	нагрев	500	10^{14}
$\cdot OH$	нагрев + введение в топливо 1% бензоилпероксид (БП)	500	10^{15}

Таблица 3. Характеристики исследованных промоторов

Название	Формула	$T_{пл.}, ^\circ C$	$T_{разл.}, ^\circ C$
Трет-бутилгидропероксид	$(CH_3)_3COOH$	-5,5	89
Бензоилпероксид	$(C_6H_5COO)_2$	103-104	70
Пероксид ацетона	$((CH_3)_2COO)_2$	132	190

Таким образом, скорость окисления углеводородного горючего прямо пропорциональна концентрации гидроксильных радикалов в зоне реакции. На начальной стадии воспламенения количество гидроксильных радикалов, образовавшихся в

результате разложения промотора, превышает количество радикалов, полученных в реакции разложения горючего.

Действие промоторов горения было исследовано с использованием баллистического маятника (рис. 1).

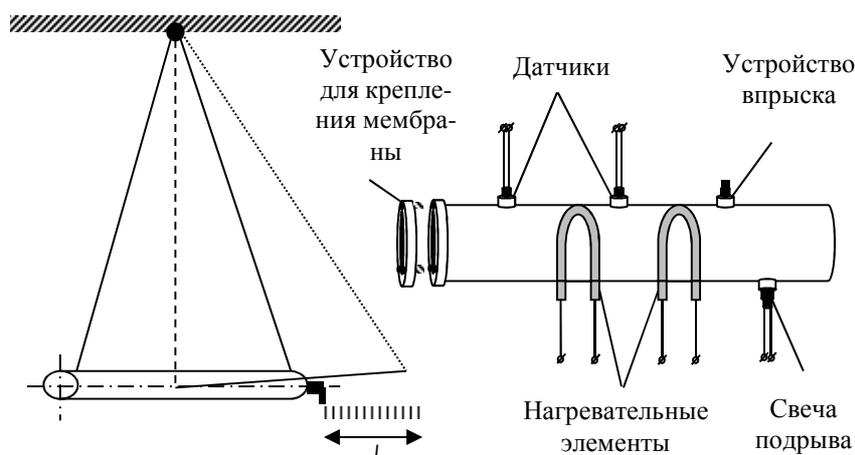


Рис.1. Схема баллистического маятника

Высота точек закрепления над центром масс $h = 4,5$ м. Масса сборки $m = 16,3$ кг. В каждом опыте после взрыва ТВС измеряли максимальное горизонтальное отклонение l маятника. Для документирования показаний прибора отклонение стрелки маятника относительно измерительной шкалы фиксировали с помощью видеокамеры. С учётом характеристик стенда расчёт импульса силы проводили по формуле

$$J = 23,8 \cdot l [Hc], \quad (1)$$

где l – отклонение маятника, м.

Величину удельного импульса ТВС рассчитывали по уравнению

$$J_{уд} = J / m [Hc], \quad (2)$$

где m – масса ТВС, кг.

На рис. 2 приведены зависимости удельного импульса ТВС от концентрации введенных промоторов пероксида водорода и пероксида бензоила в горючее ТС-1. Так, при добавлении 2% пероксида водорода удельный импульс тяги увеличивается в 3 раза, а при добавлении пероксида бензоила такой эффект достигается только при 3%-й добавке. Труднорастворимые промоторы вводили в горючее предвари-

тельно растворёнными в бутиловом спирте или бензоле. Было отмечено, что эффективность промотирования при увеличении их концентрации снижается.

Рабочий процесс ИДД включает четыре основных стадии: заполнение камеры взрывчатой смесью, инициирование детонационной волны, её распространение по камере сгорания – детонационной трубе, истечение продуктов детонации. Вследствие нестационарности рабочего процесса анализ тяговых характеристик таких двигателей более сложен, чем для силовых установок с установившимся течением.

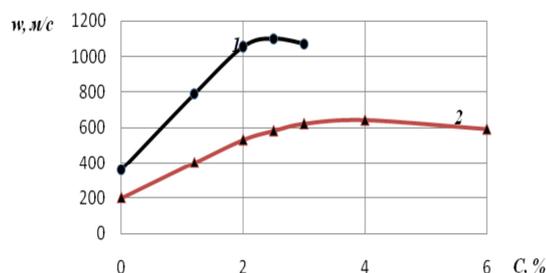


Рис. 2. Зависимость удельного импульса ТВС от концентрации промотора: 1 – ТС-1 + перексид водорода, 2 – ТС-1 + перексид бензоила.

Таблица 4. Характеристики сгорания топлив на экспериментальной установке ИДД

Топливо	C ₂ H ₄ -O ₂ [3]	C ₂ H ₄ -O ₂ [4]	C ₂ H ₄ -воздух [4]
Характеристики ИДД:			
длина трубы, м	0,10	1,0	1,000
диаметр трубы, м	0,05	0,1	0,072
Система инициирования	эл.свеча+предетонатор		
Масса заряда, г	0,27	10,87	3,27
Характеристики сгорания:			
Средняя скорость газов в рабочей камере, м/с	250	200	230
Скорость детонации, м/с	2370	2370	1975
Импульс тяги, Н·с	0,45	17,6	4,4
Удельный импульс тяги, Н·с/кг	1660	1620	1330

В табл. 4 приведены характеристики сгорания топлив на экспериментальной установке ИДД. Из представленных данных следует, что средняя скорость газов –

продуктов детонации в рабочей камере составляет 200 - 250 м/с при скорости детонации топливной смеси 1975 - 2370 м/с. При этом скорость истечения практически

не зависит от скорости детонации топливной смеси. Основную часть тяги, получаемой в ИДД за один цикл, составляет стадия истечения продуктов детонации из рабочей камеры. Эта стадия включает три фазы: выход детонационной волны, сверхзвуковое истечение и дозвуковое истечение.

На основании данных табл. 4 следует, что в формировании удельного импульса тяги ИДД основную долю вносят продукты детонации и инертные газы воздушной среды. Время прохождения детонационной волны составляет 20-50 мкс и, несмотря на высокое давление во фронте порядка 3-4 Мпа, её доля в импульсе тяги не превышает 1,5-2,0 вследствие её короткого действия на тяговую стенку.

Уровень скорости течения продуктов детонации в ИДД по данным табл. 4 составляет около 0,7 от скорости детонации ТВС (D).

Таким образом, полученная зависимость имеет вид

$$u = 0,7D.$$

Величина u практически соответствует удельному импульсу тяги ИДД:

$$J_{уд} \approx 0,7D.$$

В итоге импульс тяги ИДД определяется действием двух факторов:

- ударной волны на тяговую стенку;
- реактивной силы продуктов детонации и нагретых газов.

Действие ударной волны было подтверждено при проведении эксперимента с подрывом взрывчатого вещества (ТЭН) на баллистическом маятнике. Результаты экспериментов представлены в табл. 5.

Таблица 5. Зависимость удельного импульса тяги модельного ИДД от количества взрывчатого вещества

Количество взрывчатого вещества $m, г$	Импульс тяги $J, Н с$	Удельный импульс тяги $J_{уд}, Н с$
0,1	1,5	15000
0,3	3,0	10000
0,5	5,7	11400
0,7	8,2	11714

Вследствие использования в эксперименте малой массы взрывчатого вещества по сравнению с массой ТВС истечением газов в этом случае можно пренебречь. Как следует из приведённых результатов, при практическом отсутствии реактивной силы истечения газов удельный импульс достигает максимального значения.

Таким образом, на основании сравнительной оценки исследованных промоторов установлено, что:

1) наиболее эффективными из исследованных промоторов для применения

в качестве присадок к реактивным углеводородным топливам являются гидропероксиды;

2) добавка 2,5% гидропероксидных промоторов горения увеличивает удельный импульс тяги модельного ИДД в 2,5 - 3,0 раза;

3) максимально достижимая величина удельного импульса тяги для ИДД в единичном цикле составляет $\sim 12000 Н с/кг$.

Библиографический список

1. Гардинер, У. Химия горения [Текст] / У. Гардинер. – М.: Мир, 1988. – 238 с.

2. Антоновский, В.Л. Органические перекисные инициаторы [Текст] / В.Л. Антоновский. – М.: Химия, 1972.

3. Импульсные детонационные двигатели: удельный импульс, сопла и входные устройства [Текст] / Э. Даню, Ф. Фа-

лемпа, Г. Кантен [и др.] // Импульсные детонационные двигатели; под ред. д.ф.-м.н. С.М. Фролова – М.: ТОРУСС ПРЕСС, 2006. – С.447-474.

4. Тангирала В.Е. Численные исследования импульсного детонационного двигателя [Текст] // Импульсные детонационные двигатели; под ред. д.ф.-м.н. С.М. Фролова – М.: ТОРУСС ПРЕСС, 2006. – С. 373-412.

EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF USING COMBUSTION PROMOTERS IN HYDROCARBON FUELS FOR PERSPECTIVE JET ENGINES

© 2013 N. V. Petrukhin, S. M. Sergeev, O. A. Prokopenko, M. O. Grek

25 State Scientific-Research Institute of Chemmotology
of the Russian Ministry of Defense, Moscow

The article presents the analysis of published data and results of experimental studies performed by the authors regarding the effect of combustion promoters – peroxides and hydro-peroxides on the turbulent burning rate of fuel TS-1. It was determined that the specific pulse thrust of the model pulse-detonating engine may be increased by 2.5 - 3.0 times. The same goes for the degree and burning rate of the fuel-air mixture. The authors explain the mechanism of action of promoters for increasing the activity of the fuel-air mixture in the process of combustion.

Pulse-detonation engine, hypersonic engine, fuel mixture, detonation, hydroxyl radicals and peroxide, a promoter, specific impulse.

Информация об авторах

Петрухин Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России», Москва. E-mail: 25gosnihim@mail.ru. Область научных интересов: физическая химия реактивных топлив.

Сергеев Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент, начальник лаборатории, ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России», Москва. E-mail: ssm.58@mail.ru. Область научных интересов: повышение эффективности применения моторных топлив и разработка методов оценки их эксплуатационных свойств.

Прокопенко Олег Анатольевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России», Москва. E-mail: procopenko@mail.ru. Область научных интересов: совершенствование способов безопасной эксплуатации КЖРТ, разработка новых ракетных топлив.

Грек Максим Олегович, кандидат технических наук, преподаватель, Военная академия Ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого, г. Москва. Область научных интересов: физическая химия реактивных топлив.

Petrukhin Nicolay Vasilyevich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Chief Researcher, “25 State Scientific and Research Institute of Chemmotology of the Russian Ministry of Defense”, Moscow. E-mail: 25gosnihim@mail.ru. Area of research: physical chemistry of jet fuels.

Sergeev Sergey Mikhailovich, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Head of Laboratory, “25 State Scientific and Research Institute of Chemmotology of the Russian Ministry of Defense”, Moscow. E-mail: ssm.58@mail.ru. Area of research: increasing the efficiency of using power fuels and methods of assessing their performance characteristics.

Prokopenko Oleg Anatolyevich, Candidate of Science (Engineering), Senior Researcher, “25 State Scientific and Research Institute of Chemmotology of the Russian Ministry of Defense”, Moscow. E-mail: procopenco@mail.ru. Area of research: perfection of ways of providing safe operation of liquid jet fuel components, development of new rocket fuels.

Grek Maxim Olegovich, Candidate of Science (Engineering), Lecturer, Military Academy of Strategic Rocket Forces named after Peter the Great, Moscow. Area of research: physical chemistry of jet fuels.