

УДК 536.46

*И. А. Зырянов, С. М. Решетников,
А. П. Позолотин, А. Г. Будин*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ПОЛЯ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВНОЙ ШАШКИ В ГРД

В работе представлены результаты экспериментального исследования скорости горения топливного блока из полиметилметакрилата (ПММА) в гибридном ракетном двигателе (ГРД) при воздействии электростатического поля. Горение происходит в высокоэнтальпийном потоке, который максимально приближен к тепловому потоку реализуемому в реальных энергетических установках. Особенностью исследования является введение дисперсных примесей в зону горения для контроля концентрации избыточного заряда в пламени. Дисперсные примеси (оксид железа) вводятся в состав топливной шашки, при этом сами примеси в реакции горения не участвуют. Электрическое поле создается между двумя электродами: первый расположен по оси двигателя, второй – с внешней стороны топливной шашки. Показано, что направление напряженности поля не влияет на результирующее изменение линейной скорости горения ПММА.

Ключевые слова: горение, электростатическое поле, ГРД.

Исследование вопросов гетерогенного горения в присутствии электростатических полей представляют интерес как с научной, так и практической точки зрения. В научном плане результаты раскрывают особенности электрических процессов в зоне горения. В практическом применении – позволяют разрабатывать системы управления горением с помощью электрических полей.

Ранее авторами обнаружено [1], что электростатическое поле способно выступать как катализатором, так и ингибитором горения в зависимости от его конфигурации и места приложения. Для горящего полимера и жидкости воз-

действие электрического поля может приводить к существенному увеличению скорости, что связано с изменением механизма фазового перехода. Результирующий эффект влияния определяется только значением напряженности поля и не зависит от ее направления. С другой стороны электрическое поле оказывает существенное влияние на факел пламени. Воздействие электрического поля на факел пламени можно объяснить следующими эффектами [2] – это влияние «ионного ветра», прямое воздействие поля на кинетику химических реакций в газовой фазе, а также прямой переход энергии поля в теплоту. Данные механизмы применяются для описания изменения горения, например [4–5]. Следует отметить, что эффект воздействия на пламя определяется не только значением модуля напряженности поля, но и ее направлением.

В работе ставится задача экспериментального исследования влияния направления напряженности поля на скорость горения полимерного материала, ПММА, в условиях максимально приближенным к условиям горения в реальных энергетических установках.

Горение в реальных энергетических установках происходит в условиях высокоэнтальпийных потоков. В связи с этим исследования проведены на экспериментальном стенде подробно описанном в [3]. Рабочим участком стенда является модельный гибридный ракетный двигатель (ГРД). В данной работе используется модельный двигатель с коаксиальной топливной шашкой. Схема двигателя приведена на рис. 1.

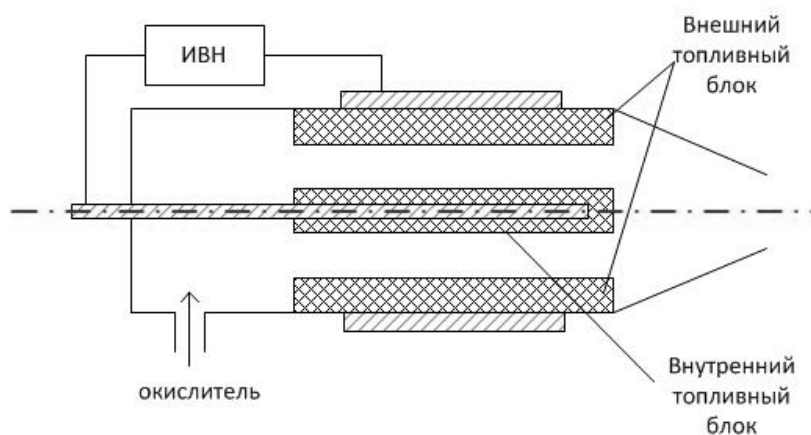


Рис. 1. Схема двигателя.

Камера сгорания двигателя образована двумя коаксиально расположенными топливными блоками: внешний блок представляет собой толстостенную трубу с внутренним диаметром 22 мм и толщиной стенки 5 мм, внутренний – цилиндр диаметром 12 мм. Длина блоков составляет 50 мм. В экспериментах используются центральные блоки следующих составов: полиэтилен, полиэтилен+40% дисперсной добавки, полиэтилен+60% дисперсной добавки. Внешний топливный блок во всех экспериментах выполнен из ПММА. В зазоре между блоками продувается окислитель – кислород. Расход окислителя остается постоянным и составляет $5 \text{ кг/м}^2\text{с}$

Электрическое поле создается между двумя электродами: первый металлическая труба расположенная с внешней стороны внешнего топливного блока, второй – металлический стержень помещенный по оси внутреннего блока. Таким образом внутренний топливный блок выполняет роль изолятора и жертвенного покрытия для электрода. Значение разности потенциалов в экспериментах остается постоянным и составляет 5 кВ, полярность электродов изменяется.

Исследована скорость горения внешней топливной шашки. Результаты приведены на рис. 2. В легенде представлена полярность центрального электрода. По горизонтальной оси отложена концентрация дисперсной примеси.

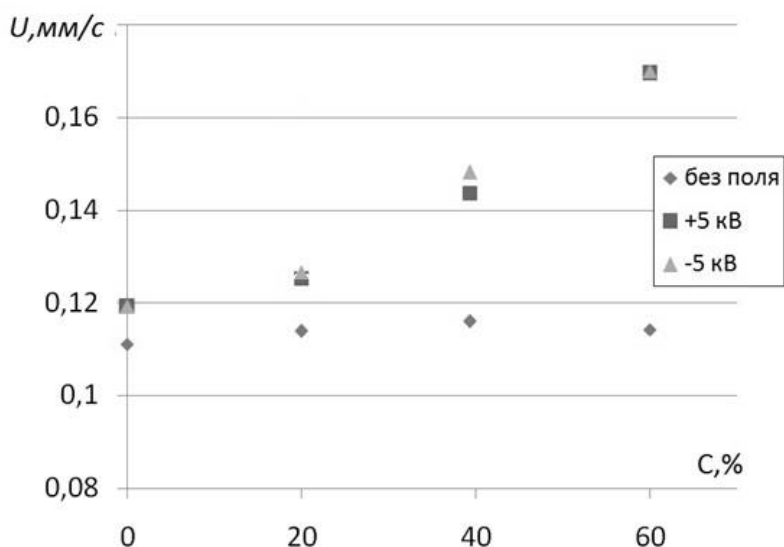


Рис. 2. Изменение эффекта влияния поля при увеличении концентрации примеси

Изменение материала центрального блока приводит к изменению процессов в зоне горения, а именно, изменению концентрации дисперсных примесей. С точки зрения скорости горения внешнего топливного блока данные процессы не имеют существенного значения. Скорость горения в пределах погрешности остается постоянной (рис. 2, точки без поля).

Наложение внешнего электрического поля приводит к увеличению скорости горения. Данные свидетельствуют о существенном влиянии концентрации дисперсных частиц в зоне газофазных реакций на результирующее изменение скорости убыли массы ПММА в электрическом поле.

На рис. 2. приводятся данные по изменению скорости горения топливного блока при изменении направления напряженности поля. В пределах погрешности эффект увеличения скорости горения в поле не изменяется. Прирост линейной скорости горения ПММА остается неизменным.

Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом. Как было отмечено выше скорость горения при воздействии электрического поля может изменяться в результате влияния на фазовые превращения и на процессы в газовой фазе. Изменения фазовых превращений определяются модулем напряженности поля и не зависят от ее направления. Во всех экспериментах напряженность поля в области топлива остается постоянной. Следовательно, увеличение эффекта влияния поля обусловлено изменениями в газовой фазе.

Как показано в работе [6], введение дисперсных примесей в пламя приводит к увеличению проводимости факела. Это свидетельствует об изменении величины избыточного заряда в зоне горения. В нашем случае концентрация дисперсных частиц в пламени возрастает с увеличением их содержания в центральном блоке. Следовательно, возрастает и избыточный заряд, накапливаемый в пламени. Воздействие поля на заряженные частицы может приводить, как к возникновению массовых сил [7], так и дополнительной турбулизации потока реагирующей смеси [8]. Массовые силы смещают горячие области пламени к поверхности топлива, а турбулизация потока осуществляет дополнитель-

ное перемешивание реагентов. Это приводит к интенсификации теплообмена между газовой и конденсированной фазами, в результате чего происходит увеличение скорости горения топливной шашки. В [9] приводятся данные моделирования накопления заряда на дисперсных частицах в пламени. Указано, что частицы в разные моменты жизни накапливают различный по знаку заряд. Этим объясняется отсутствие влияния направления напряженности поля на изменение скорости горения.

Таким образом, в работе представлены результаты исследования скорости горения полимерного материала в ГРД при воздействии электрического поля. Показано, что при электрополевым воздействием скорость горения возрастает, при этом направление напряженности поля значения не имеет.

Список литературы

1. Решетников, С. М., Зырянов И. А. Влияние электростатического поля на макрокинетику горения алканов и керосина // Вестник КГТУ. 2011. № 1. С. 120–128.
2. Степанов Е. М., Дьячков Б. Г. Ионизация в пламени и электрическое поле. М.: Металлургия, 1968. С. 311.
3. Решетников С. М. Влияние электростатического поля на скорость горения в гибридном ракетном двигателе / С. М. Решетников, И. А. Зырянов, А. П. Позолотин, А. Г. Будин // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. 2015. № 1. С. 52–57.
4. Volkov E. N. Towards the mechanism of DC electric field effect on flat premixed flames / E. N. Volkov, A. V. Sepman, V. N. Kornilov, A. A. Konnov, Y. S. Shoshin, L. P. H. de Goeij // Department of Proceedings of the European Combustion Meeting. 2009
5. Ilchenko E. P., Shevchuk V. G. Role of charged soot grains in combustion of liquid hydrocarbon fuels in external electric field // Ukr. J. Phys. 2005. V. 50. № 2. P. 144–150.
6. Даутов Г. Ю., Сабитов Ш. Р., Файрушин И. И. Исследование распределений потенциала и концентрации электронов в пылевой плазме // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. 2007. № 4. С. 29–32.
7. Решетников С. М., Бобров А. С., Зырянов И. А. Влияние электрического поля на структуру диффузионного пламени при различных коэффициентах избытка окислителя // Известия вузов. Авиационная техника. 2010. № 2. С. 59–62.

8. *Афанасьев В. В., Кидин Н. И.* Диагностика и управление устойчивостью горения в камерах сгорания энергетических установок // Litres. 2016.

9. *Савельев А. М., Старик А. М.* Особенности взаимодействия ионов и электронов с наночастицами в плазме, образующейся при горении углеводородного топлива // Журнал технической физики. 2006. Т. 76. Вып. 4. С. 53–60.

ЗЫРЯНОВ Илья Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной физики, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: b185@mail.ru

РЕШЕТНИКОВ Станислав Михайлович – доктор технических наук, профессор, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: rsm@e-kirov.ru

ПОЗОЛОТИН Александр Павлович – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной физики, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: firewxcross@mail.ru

БУДИН Артемий Геннадьевич – аспирант, ассистент кафедры инженерной физики, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: cynercoyc@rambler.ru