

А. В. С у х о в, Б. П. Л а в р о в,
И. В. Г а в р и л е н к о, А. В. С е р г е е в

ГАЗОФАКЕЛЬНОЕ ВОСПЛАМЕНИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО

Разработана конструкция газофакельного воспламенителя, устраняющая недостатки традиционных воспламенительных устройств. Проведены экспериментальные исследования на имитаторах топлива с применением нового газофакельного воспламенительного устройства, которые подтвердили его высокую надежность и эффективность.

E-mail: daj@mx.bmstu.ru

Ключевые слова: твердые ракетные топлива, горение, воспламенение, микроволновая диагностика.

При разработке новых ракетных двигательных установок (РДУ) актуальной задачей является создание диагностической техники для исследования процессов горения твердого ракетного топлива (ТРТ). Скорость горения — одна из важнейших характеристик ТРТ и во многом определяющая при создании РДУ. Из всего разнообразия методов исследования процессов горения ТРТ наиболее перспективными являются микроволновые [1] ввиду высоких разрешающих (геометрической и временной) способностей и потенциально высокой точности. При использовании такого метода помимо требований, традиционно предъявляемых к воспламенительному устройству (ВУ) (малого времени задержки воспламенения, высокой надежности, технологичности, простоты использования и др.), добавляются также специальные требования. К ним можно отнести, например, отсутствие в канале СВЧ-тракта посторонних элементов, от которых возникает отражение электромагнитной волны, что приводит к снижению точности измерения. Кроме того, точность измерения СВЧ-методом снижается при отклонении характера горения образца ТРТ от плоскопараллельного и т.д.

В настоящее время в модельных установках для воспламенения используются накаливаемая проволока, дополнительный заряд или воспламенитель с разрушаемым корпусом [2].

Метод воспламенения накаливаемой проволокой, прикрепляемой к торцу исследуемого образца и нагреваемой постоянным электрическим током, — это один из наиболее часто используемых способов воспламенения топлива в модельной установке (рис. 1, а).

Достоинствами данного метода являются простота конструкции, технологичность, легкость снаряжения образца для эксперимента.

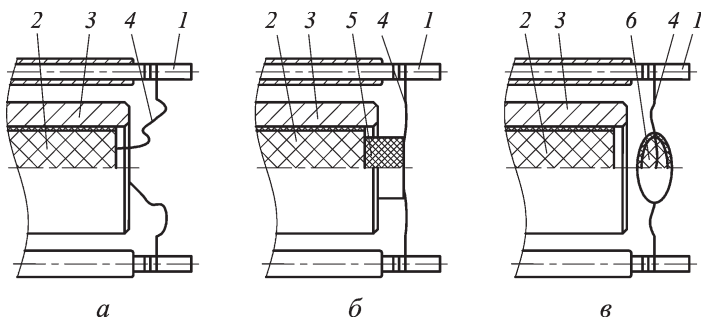


Рис. 1. Схемы ВУ с накаливаемой проволокой (а), дополнительным зарядом (б) и разрушаемым корпусом (в)

Однако такой метод имеет ряд недостатков:

- неравномерность воспламенения образца и, как следствие, непараллельность горения из-за конечных размеров проводника и возможной нестабильности теплового контакта проволоки накаливания и поверхности заряда;
- необходимость изоляции и крепления проводника к поверхности заряда, что дополнительно воздействует на поверхность горения и, как следствие, вносит погрешности при определении характеристик горения;
- необходимость ввода в волноводный тракт металлического элемента, что приводит к возникновению шума и искажению сигнала СВЧ-датчика и затрудняет определение фазовой длины образца.

Для уменьшения минимальной плотности теплового потока, приводящего к воспламенению образца ТРТ, необходимо увеличивать диаметр нагреваемого проводника [3]. Однако такое изменение параметров негативно сказывается на точности измерения при использовании СВЧ-метода, так как увеличивается объем металла в волноводе.

Использование дополнительного пиротехнического заряда при воспламенении позволяет избежать некоторых недостатков. В этом случае дополнительный пиротехнический заряд, который воспламеняет исследуемый образец ТРТ, размещается между исследуемым образцом и накаливаемой проволокой (рис. 1, б). Применение данного метода позволяет снизить неравномерность воспламеняемой поверхности образца ТРТ.

Однако при этом возникает ряд других недостатков:

- необходимость крепления дополнительного заряда к исследуемому образцу, а значит, возникновение упомянутых ранее факторов, вносящих погрешности в измерение скорости горения СВЧ-методом;
- увеличение времени от момента подачи напряжения на проволоку до момента воспламенения образца, что приводит к увеличению времени задержки воспламенения образца ТРТ;

- появление дополнительных трудностей с определением момента воспламенения исследуемого образца, что, в свою очередь, приводит к возникновению дополнительных погрешностей;

- поскольку накаливаемая проволока находится в канале СВЧ-тракта или на небольшом расстоянии от него, то возникают значительные помехи, которые вызваны перегоранием проволоки и генерацией высокочастотных помех в разрядном промежутке между концами перегоревшей проволоки.

Метод воспламенения с использованием ВУ с разрушенным корпусом позволяет снизить неравномерность воспламенения из-за конечных размеров накаливаемого проводника и погрешности, вносимые креплением дополнительного заряда. Воспламенитель с разрушаемым корпусом представляет собой навеску воспламенительного состава в разрушаемой оболочке (например, бумажной, с перфорацией для облегчения разрушения). Навеска воспламеняется накаливаемой проволокой, нагреваемой постоянным током, а исследуемый образец ТРТ воспламеняется продуктами сгорания навески (рис. 1, в).

Преимуществом ВУ с разрушаемым корпусом является более равномерное воспламенение поверхности образца и отсутствие его контакта с воспламеняемым топливом.

Данный метод имеет следующие недостатки:

- снижается точность измерения из-за наличия движущихся фрагментов оболочки корпуса воспламенителя, которые вносят возмущения в СВЧ-поле;

- возникают дополнительные помехи, связанные с присутствием в канале СВЧ-тракта проволоки.

В целях устранения указанных недостатков разработано новое газофакельное ВУ, удовлетворяющее требованиям СВЧ-метода.

Конструктивно разработанное газофакельное ВУ для стендовых испытаний представляет собой твердотопливный газогенератор (ТТГ) с осесимметричными радиальными отверстиями, направленными под углом к поверхности горения исследуемого образца (рис. 2). В дополнительном объеме ВУ расположена навеска пиротехнического воспламенительного состава (ВС), продукты сгорания которого воспламеняют исследуемый образец ТРТ. Диаметр каналов ВУ выбирают из условий закритичности отверстий для используемой длины волны в СВЧ-тракте и дозвукового истечения продуктов сгорания ВС. Для изоляции и герметизации накаливаемой проволоки ВС служат специальные керамические вставки.

Путем электрического нагрева металлической проволоки осуществляется воспламенение ВС с последующим воспламенением образца ТРТ потоком продуктов сгорания ВС.

Достоинствами такой конструкции ВУ являются размещение дополнительного заряда вне волновода, тем самым устраняются посторонние элементы из канала СВЧ-тракта, и воспламенение потоком продуктов сгорания ВС, что приводит к более равномерному воспламенению поверхности исследуемого образца ТРТ. Кроме того, проволочка, размещаемая в ВС, не перегорает после воспламенения, что исключает интенсивные высокочастотные помехи, свойственные ранее рассмотренным ВУ.

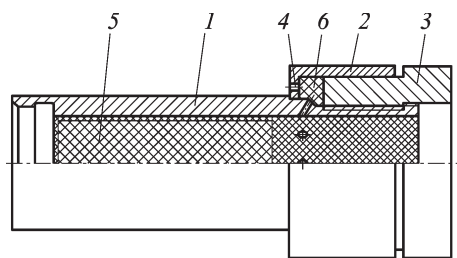


Рис. 2. Схема разработанного газофакельного ВУ

К недостаткам данной конструкции можно отнести большую сложность конструкции воспламенителя и большее время снаряжения и подготовки эксперимента.

В процессе разработки газофакельного ВУ проведено математическое моделирование работы ВУ. В разработанной модели воспламенитель представляется в виде элементов огневой части экспериментальной установки и СВЧ-цепи.

При рассмотрении ВУ как элемента газового тракта в программном комплексе ANSYS проведено моделирование движения газа в волноводе. Расчетной моделью является объем ТТГ и СВЧ-волновода (рис. 3, а), в котором происходит движение продуктов сгорания ВС. Критерием оценки результатов моделирования является равномерность полей скорости продуктов сгорания ВС и давления на поверхности горения образца ТРТ.

Из распределения давления и скорости (рис. 3, б и в) следует, что в области воспламенения образца топлива (нижняя часть модели) возникает застойная зона с повышенным давлением, что положительно сказывается на равномерности и надежности воспламенения.

При рассмотрении ВУ как элемента СВЧ-цепи в программном комплексе HFSS разработана модель горения заряда в волноводе.

При моделировании приняты следующие допущения:

- заряд горит параллельными слоями с постоянной скоростью;
- волновод идеальный и закритический.

Результаты моделирования обработаны и приведены на рис. 4.

Электромагнитное поле имеет регулярную структуру только в случае бесконечной длины волновода. В случае же конечного волновода в области его торцев возникают краевые эффекты, связанные с провисанием электромагнитного поля в волновод. Особенно сильно краевые эффекты проявляются на длине менее диаметра волновода.

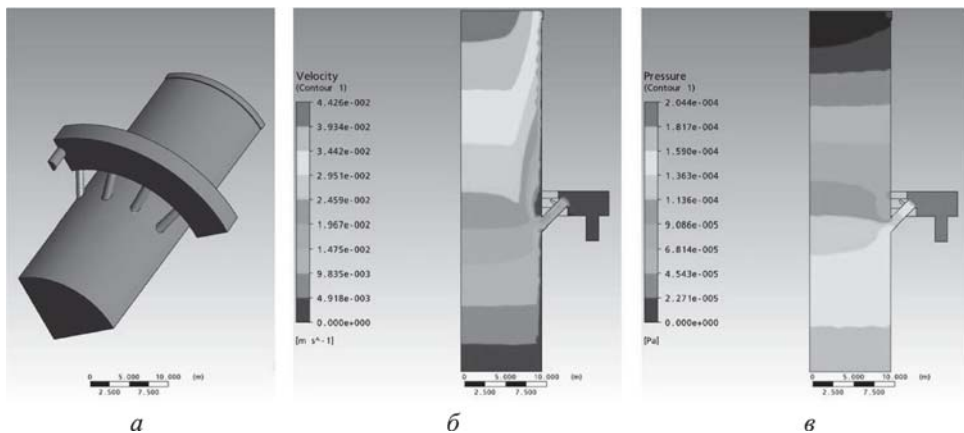


Рис. 3. Моделирование работы ВУ как элемента газового тракта:
a — вид расчетной модели; *б, в* —распределения скорости продуктов сгорания ВС и давления на поверхности образца

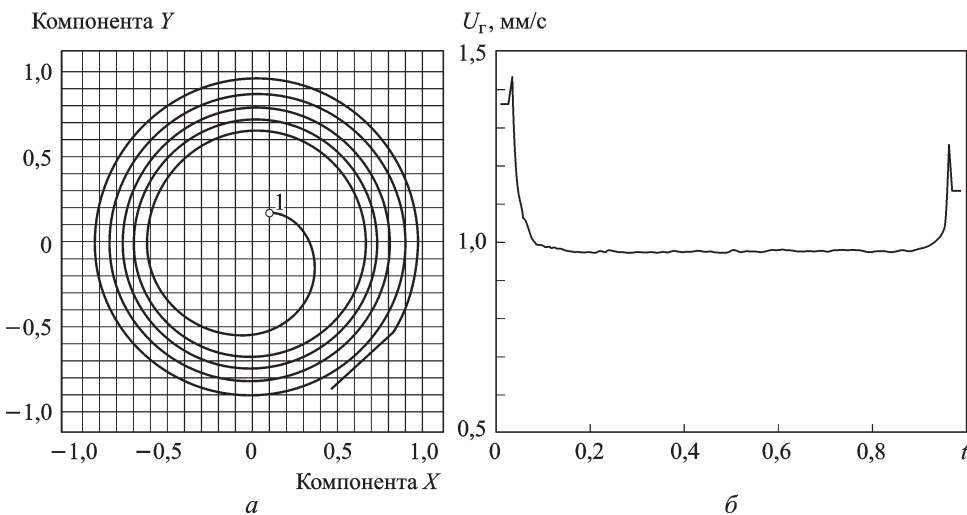


Рис. 4. Результаты моделирования ВУ как элемента СВЧ-цепи

При использовании волновода длиной, равной длине образца, приведенная ранее информация может оказаться недостаточно точной.

Экспериментальные исследования проводились на цилиндрических имитаторах, выполненных из полиметилметакрилата (ПММА) и эпоксидных смол, а также из штатного баллистического ТРТ типа Н. При этом использовались различные типы воспламенителей (газо-факельный, с разрушаемым корпусом и дополнительным зарядом) (рис. 5, 6). В настоящей статье приведены результаты обработки экспериментов с газофакельным ВУ, воспламенителем с разрушаемым корпусом и воспламенителем с дополнительным зарядом.

Поскольку без согласования СВЧ-тракта и измеряющей аппаратуры невозможно определить центр годографа комплексного коэффициента отражения, то качество работы воспламенителя можно оценить

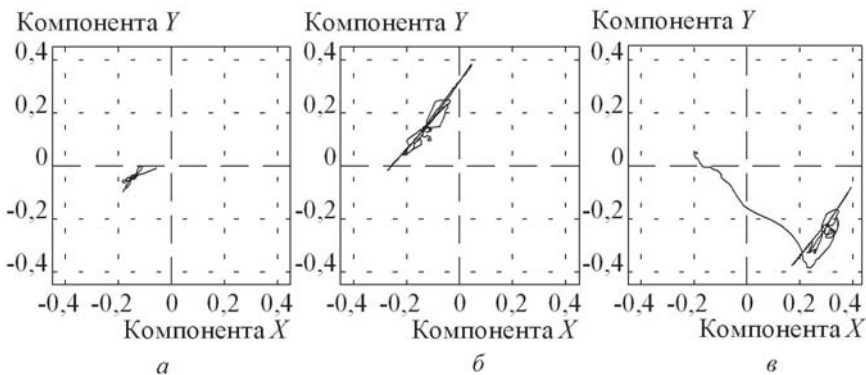


Рис. 5. Результаты обработки экспериментов (имитатор — ПММА):
a — газофакельный воспламенитель; *б* — воспламенитель с разрушаемым корпусом;
в — воспламенитель с дополнительным зарядом

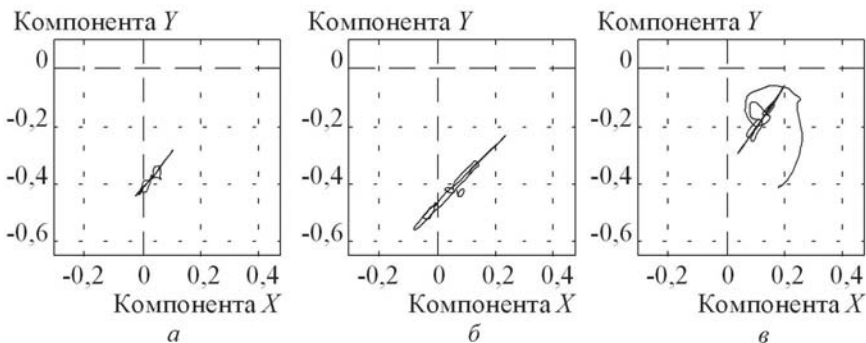


Рис. 6. Результаты обработки экспериментов (имитатор — эпоксидная смола):
a — газофакельный воспламенитель; *б* — воспламенитель с разрушаемым корпусом;
в — воспламенитель с дополнительным зарядом

по габаритным размерам помех. Установлено, что размер помех на комплексной плоскости минимален у газофакельного воспламенителя, и, следовательно, газофакельное ВУ обеспечивает наиболее точные экспериментальные данные. Полученные данные позволяют сделать вывод, что более высокие показатели модифицированного ВУ не зависят от материала исследуемого образца.

Таким образом, по результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы.

1. Разработана конструкция нового газофакельного воспламенителя, который имеет достаточно высокие надежность и эффективность, минимальное время выхода на режим, в котором устранены недостатки ранее использовавшихся традиционных ВУ, в частности, исключен металлический проводник в СВЧ-тракте, снижающий качество эксперимента.

2. Разработана модель, описывающая работу ВУ как элемента огневой части экспериментальной установки и как элемента СВЧ-цепи, что позволило найти оптимальные условия работы ВУ, и устранить

дополнительные помехи, снижающие точность измеряемых характеристик горения ТРТ.

3. Проведены экспериментальные исследования на имитаторах топлива и на баллиститном ТРТ типа Н с использованием нового газофакельного ВУ, что подтвердило его высокие надежность и эффективность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лавров Б. П., Шарай Ю. М., Сергеев А. В. Применение метода измерения S-параметров для исследования процесса горения твердых ракетных топлив // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – Т. 12. – № 3. – С. 46–51.
2. Strand L. D., McNamee R. P. Feasibility demonstration of a variable frequency driver regression rate measurement // AIAA Paper. – 1976. – Vol. 76. – P. 1–9.
3. Голдаев С. В., Козлов Е. А., Муленок Е. В. Расчет параметров зажигания конденсированного вещества накаливаемой проволокой // Физика горения и взрыва. – 1999. – Т. 35. № 2. – С. 58–62.

Статья поступила в редакцию 27.03.2010

Алексей Васильевич Сухов родился в 1937 г., окончил в 1961 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Ракетные двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных учебно-методических работ и изобретений в области ракетных двигателей.

A.V. Sukhov (b. 1937) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1961. D. Sc. (Eng.), professor of “Rocket Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 150 scientific publication and inventions in the field of rocket engines.

Борис Павлович Лавров родился в 1941 г., окончил в 1963 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Научный сотрудник кафедры “Ракетные двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области радиотехники и СВЧ-энергетики.

B.P. Lavrov (b. 1941) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1963. Researcher of “Rocket Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 20 publications in the field of radio engineering and microwave power-engineering.

Алексей Викторович Сергеев родился в 1982 г., окончил в 2005 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант, научный сотрудник кафедры “Ракетные двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 7 научных работ в области твердых ракетных топлив и СВЧ измерений.

A.V. Sergeev (b. 1982) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2005. Post-graduate, researcher of “Rocket Engines” Department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 7 publications in the field of solid propellants and microwave measurements.

Иван Викторович Гавриленко родился в 1982 г., окончил в 2006 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант кафедры “Ракетные двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 2 научных работ в области твердых ракетных топлив и СВЧ измерений.

I.V. Gavrilenko (b. 1982) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2006. Post-graduate of “Rocket Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 2 publications in the field of solid propellants and microwave measurements.