

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА  
СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ ПО НАПРЯЖЕНИЮ ВОЛНОВОДА  
С СОГЛАСУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ  
ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ  
ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ**

А.К. Шостов

shostov@bmstu.ru

К.В. Федотова

fedotova@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

**Аннотация**

Скорость горения энергетической конденсированной системы является основным внутрибаллистическим параметром при проектировании двигательных установок летательных аппаратов. Вследствие сложности аналитического определения скорости горения разрабатывают различные экспериментальные методы, одним из которых является микроволновая диагностика. При использовании этого метода для исследования скорости горения применяют элементы микроволновой техники, к которым относится согласующее устройство из диэлектрического материала. Оно предназначено для согласования трактов круглого сечения с разными диаметрами, заполненными воздухом и образцом исследуемой энергетической конденсированной системы. Одним из показателей качества волноводного тракта является коэффициент стоячей волны по напряжению, значение которого для реальных устройств находится в интервале 1,02–2,00. Рассмотрены следующие материалы: капрон, стеклотекстолит, полиметилметакрилат и полилактид. Для каждого материала определены интервалы частот электромагнитной волны, при которых возникает наименьшее число паразитных отражений. Определены геометрические параметры заполненного воздухом металлического волновода. Численное моделирование волноводного тракта показало, что согласующее устройство из стеклотекстолита дает наибольшее

**Ключевые слова**

*Микроволновый метод,  
коэффициент стоячей волны  
по напряжению, антенна,  
диэлектрическая проницае-  
мость, волновод*

значение коэффициента стоячей волны по напряжению. Это негативно влияет на измерение параметров исследуемого сигнала. Вероятно, это связано с наименьшим значением диаметра минимального сечения вследствие высокого значения диэлектрической проницаемости стеклотекстолита (4,6). Сogласующее устройство из капрона, полиметилметакрилата и полилактида обеспечивает значение коэффициента стоячей волны по напряжению менее 2 в интервале частоты 8,8...9,5 ГГц

Поступила 07.06.2024

Принята 25.11.2024

© Автор(ы), 2025

---

**Введение.** В настоящее время в двигательных установках (ДУ) космических систем различного назначения в качестве источника энергии используются энергетические конденсированные системы (ЭКС). Скорость горения ЭКС — ключевой внутриваллистический параметр, необходимый для проектирования ДУ. Аналитически определить значение этого параметра невозможно, поэтому разрабатываются различные экспериментальные методы [1].

Одним из наиболее перспективных экспериментальных методов является микроволновая диагностика. Преимущества этого метода — высокие разрешающие способности по времени и пространству, возможность исследования процессов горения в нестационарных условиях [2, 3]. Однако следует отметить и недостатки, к числу которых относится наличие паразитных отражений электромагнитных волн от различных неоднородностей при прохождении через волноводный тракт, что может привести к появлению дополнительных мод колебаний. Это вызывает искажение исследуемого сигнала и, как следствие, большую погрешность измерения скорости горения [4].

Для уменьшения числа паразитных отражений к конструкции волноводного тракта предъявляется требование высокой точности изготовления [5, 6]. Как правило, тракт может состоять из нескольких элементов. Одной из причин возникновения паразитных отражений является наличие дефектов в местах стыков элементов и на участках перехода одного сечения в другое (различных как по форме, так и по геометрическим размерам). Эта проблема вполне успешно решается на предприятиях-изготовителях, выпускающих оборудование для микроволновой техники.

Однако при измерении линейной скорости горения ЭКС с использованием микроволновой диагностики возникает проблема перехода волноводной секции, заполненной воздухом, к круглому волноводу с исследуемым образцом. Конструкция такой установки подробно описана в [7].

Падающая волна изначально распространяется в воздухе, для которого относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_v$  и относительная магнитная проницаемость  $\mu_v$  близки к единице (соответственно, и их произведение). Для исследуемых образцов ЭКС магнитная проницаемость  $\mu_{\text{ЭКС}}$  близка к единице, однако диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_{\text{ЭКС}}$  может достигать нескольких единиц. В связи с этим основная часть волны будет отражаться от границы раздела воздуха и ЭКС, что приведет к невозможности измерения скорости горения образца. Для устранения отражений от границы раздела веществ с разным комплексом  $\epsilon\mu$  применяются согласующие устройства из диэлектрических материалов [8].

Ранее этому вопросу не посвящалось отдельное исследование, так как конструкция экспериментальной установки позволяла работать только с гомогенными ЭКС, для которых проницаемость  $\epsilon_{\text{ЭКС}}$  остается практически постоянной вне зависимости от состава. Для гетерогенных ЭКС этот параметр может сильно изменяться ввиду наличия порошкообразных металлических добавок.

*Цель работы* — выбор диэлектрических материалов, из которых может быть изготовлено согласующее устройство, определение для них интервалов допустимых частот электромагнитного излучения, профилирование внешней поверхности антенны и численное исследование коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) волноводного тракта при применении выбранных материалов для согласующего устройства.

**Проектирование согласующего устройства.** При проектировании устройств микроволновой техники одним из показателей качества прохождения электромагнитной волны является КСВН:

$$\text{КСВН} = \frac{E_0^+ + E_0^-}{E_0^+ - E_0^-},$$

где  $E_0^+$ ,  $E_0^-$  — амплитуды падающей и отраженной волн.

В идеальном случае  $\text{КСВН} = 1$  (отсутствие отраженной волны), для реальных устройств  $\text{КСВН}$  принадлежит интервалу 1,02–2,00. Волноводы различных сечений и переходные устройства должны обеспечивать качественную передачу энергии с помощью электромагнитных волн. Как правило, волноводы заполнены воздухом, поэтому расчет тракта ведется по известным методикам [9, 10].

Согласование элементов волноводов различных размеров и форм сечения является одной из основных задач микроволновой техники. В случае когда среда, по которой распространяются электромагнитные волны,

остается неизменной, проектирование волноводов ведется по стандартным методикам.

Рассмотрим проектирование согласующего устройства, которое соединяет волновод, заполненный воздухом, и волновод, заполненный образцом ЭКС. В связи с этим материал, из которого изготавливается устройство, должен иметь диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_m$ , близкую к  $\epsilon_{\text{ЭКС}}$ , чтобы снизить уровень паразитных отражений. Дополнительно материал должен выдерживать высокие температуру и давление.

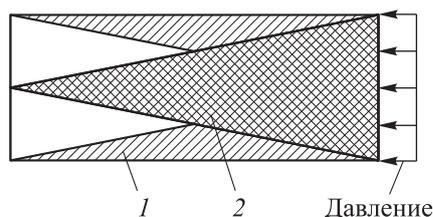
Диапазон значений частоты генерируемого электромагнитного излучения принадлежит интервалу 8,0...9,5 ГГц, что обусловлено геометрическими особенностями волноводного тракта. На этом интервале частоты материал согласующего устройства должен обладать сравнимой с ЭКС диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_m$ , а также минимальными потерями на распространение электромагнитного излучения, которые характеризуются тангенсом угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \beta$ . Следует отметить, что последнее не является основополагающим, так как во время эксперимента регистрируется фаза электромагнитной волны, не зависящая от потерь энергии. С учетом необходимых механических характеристик этим требованиям удовлетворяют следующие материалы: капрон, полиметилметакрилат, стеклотекстолит и полилактид (пластик, применяемый в 3D-принтерах). Диэлектрические свойства перечисленных материалов приведены ниже [11, 12]:

	$\epsilon_m$	$\text{tg } \beta$
Капрон .....	3,18	0,007
Полиметилметакрилат .....	2,69	0,001
Стеклотекстолит .....	4,60	0,015
Полилактид .....	3,47	0,073

В экспериментальной установке для определения скорости горения ЭКС микроволновым методом реализуются давления в диапазоне значений 0,1...40 МПа, поэтому необходимо обеспечить герметичность канала волновода для исключения вылета антенны. Характерная схема канала круглого сечения приведена на рис. 1.

**Рис. 1.** Схема волноводной секции с согласующим устройством:

- 1 — металлический волновод с круглым внутренним сечением;
- 2 — согласующее устройство



При проектировании согласующего устройства необходимо обеспечить прохождение электромагнитных волн в каждом сечении волноводного тракта. Ввиду наличия сужающейся части, после которой заполненный материалом согласующего устройства канал расширяется, образуется круглое сечение с минимальным диаметром. В связи с этим диаметры проходных сечений необходимо выбирать так, чтобы критическая длина волны  $\lambda_{кр}$  в минимальном сечении перехода была больше длины волны  $\lambda_m$ , создаваемой источником излучения в среде диэлектрика, из которого выполняется антенна.

Длина электромагнитной волны в зависимости от частоты и среды, в которой она распространяется, может быть определена по формуле [13]:

$$\lambda_m = \frac{c}{v\sqrt{\epsilon_m\mu_m}},$$

где  $c$  — скорость света в вакууме;  $v$  — частота электромагнитной волны. Полагается, что  $\mu_m = 1$  для рассматриваемых материалов.

При работе на экспериментальной установке есть возможность выбирать частоту генерируемой электромагнитной волны. Каждой частоте будет соответствовать своя длина волны. Выбор частоты зависит от геометрических размеров проходных сечений волноводной секции. Для обеспечения условий распространения волны необходимо, чтобы ее длина была больше некоторой критической длины, которая рассчитывается для сечений разных форм и размеров по формулам [14]. При этом частота генерируемой волны должны быть такой, чтобы в волноводе возникала только первая основная мода колебаний [15]. Это обеспечит наиболее эффективную передачу энергии, а также исключит возникновение следующих мод колебаний, наличие которых может привести к искажению сигнала.

Критическая длина волны в зависимости от диаметра круглого сечения рассчитывается по формуле:

$$\lambda_{кр} = 3,413 \frac{d_B}{2}, \quad (1)$$

где  $d_B$  — диаметр круглого волновода.

Для минимизации числа паразитных отражений соотношения диаметров волновода и круглого сечения согласующего устройства должны на всем протяжении перехода удовлетворять выражению

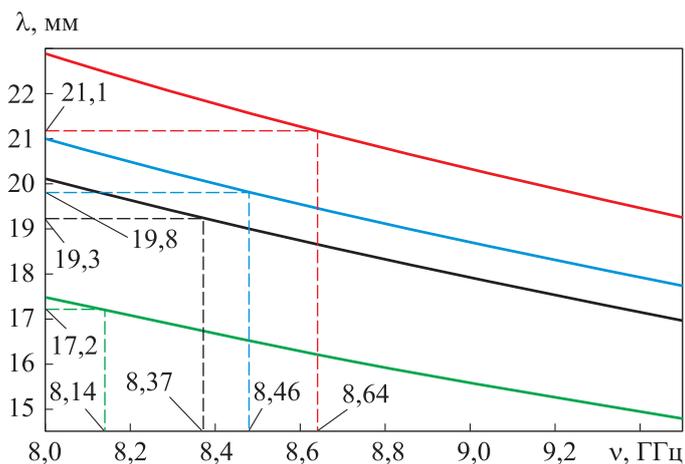
$$d_B^2 + d_C^2 \epsilon_m \mu_m = \text{const}, \quad (2)$$

где  $d_C$  — диаметр сечения согласующего устройства.

Исходя из особенностей конструкции экспериментальной установки начальный диаметр пустого волновода составляет 23,8 мм. Используя (2), определяется диаметр минимального сечения  $d_{\min}$ . Результаты расчета приведены ниже:

	$d_{\min}$ , мм
Капрон .....	11,6
Полиметилметакрилат .....	12,4
Стеклотекстолит .....	10,1
Полилактид .....	11,3

Далее по (1), (2) определяют длину  $\lambda$  и минимальную частоту  $\nu_{\min}$  электромагнитной волны, при которых возможно ее распространение при использовании согласующего устройства из соответствующего материала. Зависимость длины волны от частоты в исследуемых материалах с найденными величинами показана на рис. 2.



**Рис. 2.** Зависимость длины волны от частоты в диэлектрических средах для полиметилметакрилата (—), капрона (—), полилактида (—) и стеклотекстолита (—)

Зная начальный и конечный (минимальный) диаметры сужающегося участка, необходимо выбрать его длину. Длины сужающегося и расширяющегося участков должны быть не менее 2–3 длин волн в волноводе [16]. Исходя из интервала частот генерируемой волны эти значения принимаются равными 60 мм. Максимальный диаметр согласующего устройства составляет 18 мм, что соответствует диаметру исследуемого образца ЭКС.

**Определение коэффициента стоячей волны по напряжению волноводного тракта.** Как уже было отмечено, КСВН является одним из по-

казателей качества волноводов. Как правило, этот параметр определяют экспериментально [17] или численным моделированием [18]. Последний метод в некоторых случаях является предпочтительным, так как нет необходимости изготавливать под каждый используемый материал согласующего устройства металлическую волноводную секцию. Численное моделирование может быть проведено для трехмерной расчетной области с использованием метода конечных элементов [19, 20].

Рассмотрены четыре расчетные области, геометрические параметры которых для всех материалов идентичны, за исключением диаметров минимального сечения металлического волновода, которые определены ранее. Внешняя поверхность антенны профилируется по (2), после чего строится сплайн по координатам.

Расчетная область состоит из сужающегося круглого волновода, заполненного воздухом, и согласующего устройства. В качестве основных параметров двух сред задаются их диэлектрические и магнитные проницаемости.

Для задания граничных условий (ГУ) выбирают входное и выходное сечения волноводного тракта. Для этих ГУ задают тип сечения (круглое) и частоту электромагнитной волны. Поскольку КСВН — безразмерная величина, мощность излучения выбирается равной 1 Вт. Волна возбуждается только во входном сечении. Для внешней поверхности волноводного тракта ставится ГУ идеальной электрической проводимости:  $\vec{n} \times \vec{E} = 0$ , где  $\vec{n}$  — нормаль к поверхности.

Необходимо отметить, что в реальной установке волна генерируется в волноводе прямоугольного сечения, в котором возбуждается только первая мода колебаний при рассматриваемом интервале частот, сохраняющаяся на всей длине волноводного тракта. Поэтому при задании ГУ в круглых сечениях необходимо учитывать только эту моду. Расчетная сетка гибридная, состоит из 22 518 элементов.

Решаемую систему уравнений волны можно записать в виде

$$\begin{aligned}\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times \vec{E}) - \omega^2 \epsilon_c \vec{E} &= 0; \\ \nabla \times (\epsilon_c^{-1} \nabla \times \vec{H}) - \omega^2 \mu \vec{H} &= 0,\end{aligned}$$

где  $\omega = 2\pi\nu$  — круговая частота;  $\epsilon_c = \epsilon_0 \epsilon' (1 - j \operatorname{tg} \beta)$  — комплексная диэлектрическая проницаемость,  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная,  $\epsilon' = \epsilon_m$  — действительная часть диэлектрической проницаемости,  $j$  — мнимая единица.

Пример расчетной области показан на рис. 3 (цветом выделена выбранная геометрия антенны).

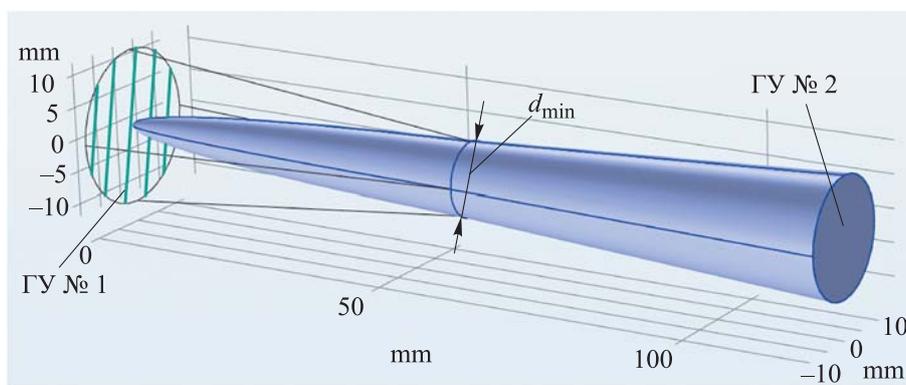


Рис. 3. Пример расчетной области

Нижняя граница интервала частот, в котором исследуется волновод, для каждого материала указана на рис. 2, верхняя граница остается неизменной (9,5 ГГц), шаг по частоте 0,1 ГГц. Зависимости КСВН от частоты волны для рассматриваемых материалов приведены на рис. 4. Правая ось ординат относится к КСВН для согласующего устройства, изготовленного из стеклотекстолита, так как значения получились на порядок больше, чем для остальных материалов.

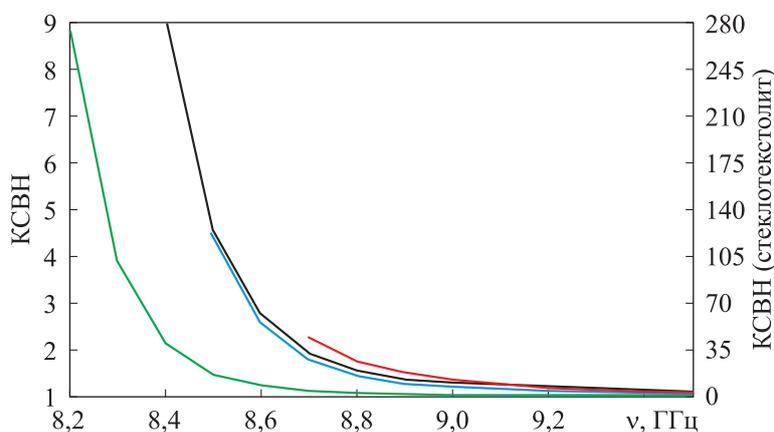


Рис. 4. Зависимости КСВН от частоты волны для полиметилметакрилата (—), капрона (—), полилактида (—) и стеклотекстолита (—)

Согласно зависимостям на рис. 4, значения КСВН при использовании стеклотекстолита получились на два порядка больше, чем для остальных материалов. Это, вероятно, связано с плохим прохождением электромаг-

нитной волны вследствие резкой смены диэлектрической проницаемости среды (от 1 до 4,6), в которой распространяется волна. С увеличением частоты излучения КСВН снижается, так как волна обладает меньшей длиной, что положительно влияет на проходную способность волноводного тракта.

**Результаты.** Численное моделирование волноводного тракта с согласующим устройством позволило получить зависимости КСВН от частоты генерируемой электромагнитной волны.

При использовании стеклотекстолита для изготовления согласующего устройства КСВН волноводного тракта много больше единицы, что приводит к сильному искажению исследуемого сигнала. Этот результат может быть связан с тем, что диэлектрическая проницаемость стеклотекстолита не подходит для профилирования внешней поверхности согласующего устройства, так как проходные сечения не могут пропустить падающую волну. На это может указывать малое значение диаметра минимального сечения по сравнению с волноводами, рассчитанными для других материалов.

При сравнении зависимости КСВН от частоты для капрона, полиметилметакрилата и полилактида можно заключить, что эти материалы также целесообразно применять при наибольших частотах в допустимом интервале. Для этих материалов минимальная допустимая частота, при котором КСВН  $< 2$ , составляет около 8,8 ГГц.

С позиции технологичности предпочтительнее выполнять согласующее устройство из полилактида, так как процесс печати детали на 3D-принтере не требует высокой квалификации. При использовании капрона или полиметилметакрилата профилированная часть антенны может быть получена на токарном станке с ЧПУ.

**Заключение.** В процессе проведения работы определены диэлектрические материалы, которые могут использоваться для изготовления согласующего устройства волноводного тракта микроволновой установки для определения скорости горения ЭКС. Рассчитаны геометрические параметры внешней поверхности согласующих устройств из рассматриваемых материалов, обеспечивающих распространение электромагнитных волн. В результате численного моделирования определены минимальные частоты и диаметры минимального сечения волноводного тракта, а также зависимости КСВН от применяемого материала. Численное моделирование показало следующее.

С увеличением частоты электромагнитной волны КСВН уменьшается и достигает значений порядка 1,1–1,3 при наибольших значениях допустимых частот.

При увеличении частоты волны (уменьшении длины) снижается число паразитных отражений в минимальном сечении тракта и при взаимодействии с согласующим устройством.

Предпочтительнее выбирать наибольшие частоты из допустимого интервала при проведении экспериментальных исследований скорости горения ЭКС, так как конечный сигнал будет иметь минимальные искажения.

В качестве материала согласующего устройства целесообразно использовать полилактид, так как в этом случае КСВН волноводного тракта имеет оптимальный уровень, а антенну можно изготовить на 3D-принтере, что упрощает технологический процесс.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Zarko V., Kiskin A., Cheremisin A. Contemporary methods to measure regression rate of energetic materials: a review. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2022, vol. 91, art. 100980. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100980>
- [2] Зарко В.Е., Вдовин Д.В., Перов В.В. Методические проблемы измерения скорости горения твердых топлив с использованием СВЧ-излучения. *Физика горения и взрыва*, 2000, т. 36, № 1, с. 68–78. EDN: OONSEV
- [3] Ягодников Д.А., Сухов А.В., Сергеев А.В. и др. Экспериментальная методика и модельная установка для исследования горения энергетических конденсированных систем при высоких давлениях. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2023, № 3 (146), с. 50–63. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-3-50-63>
- [4] Ягодников Д.А., Сергеев А.В., Козичев В.В. Экспериментально-теоретическое обоснование повышения точности измерения скорости горения энергетических конденсированных систем СВЧ-методом. *Физика горения и взрыва*, 2014, т. 50, № 2, с. 51–61.
- [5] Ginzton E.L. *Microwave measurements.*, McGraw-Hill, 1957.
- [6] Collier R.J., Skinner A.D. *Microwave measurements.* Institution of Engineering, 2007.
- [7] Лавров Б.П., Шарай Ю.М., Сергеев А.В. и др. Определение скорости горения твердого топлива с применением измерителя полных сопротивлений СВЧ-диапазона. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2009, № 1 (74), с. 28–36. EDN: KHNBPX
- [8] Strand L.D., Schultz A.L., Reedy G.K. Determination of solid-propellant transient regression rates using a microwave Doppler shift technique. Pasadena, Jet Propulsion Laboratory, 1972.
- [9] Ефимов И.Е., Шермина Г.А. *Волноводные линии передач.* М., Связь, 1979.

- [10] Пчельников Ю.Н., Свиридов В.Т. Электроника сверхвысоких частот. М., Радио и связь, 1981.
- [11] Лавров Б.П., Сергеев А.В., Козичев В.В. и др. Применение СВЧ-метода измерения скорости горения энергетических конденсированных систем в условиях сверхвысокого давления. *Наука и образование*, 2011, № 12. EDN: OZGZU
- [12] Huber E., Mirzaee M., Bjorgaard J., et al. Dielectric property measurement of PLA. *IEEE EIT*, 2016, pp. 788–792. DOI: <https://doi.org/10.1109/eit.2016.7535340>
- [13] Sedki M.R., Iman M.S. *Electromagnetic fields and waves: fundamentals of engineering*. McGraw-Hill, 2020.
- [14] Фогельсон Б.А. *Волноводы*. М., Воениздат, 1958.
- [15] Вайнштейн Л.А. *Электромагнитные волны*. М., Радио и связь, 1988.
- [16] Koryu Ishii T. *Handbook of Microwave Technology*. Academic Press, 1995.
- [17] Суляев В.И., Дунаевский Г.Е., Емельянов Е.В. и др. Комплекс методов и средств радиоволновой диагностики фундаментальных характеристик гетерогенных материалов и сред в гигагерцовом и терагерцовом диапазонах. *Известия вузов. Физика*, 2011, т. 54, № 9-2, с. 138–146. EDN: OWJCWF
- [18] Зоркальцева М.Ю., Кошелев В.И., Петкун А.А. Численное моделирование сверхширокополосных комбинированных антенн. *Известия вузов. Физика*, 2017, т. 60, № 8, с. 26–30. EDN: ZDQNB
- [19] Захаров В.В., Артюхов И.И. Совершенствование методик конечно-элементного 3D моделирования электротермических СВЧ-установок лучевого типа неограниченного объема. *Вопросы электротехнологии*, 2023, № 4, с. 5–16.
- [20] Jin J.M. *The finite element method in electromagnetics*. Wiley, 2002.

**Шостов Артем Константинович** — ассистент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Федотова Ксения Викторовна** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Шостов А.К., Федотова К.В. Численное исследование коэффициента стоячей волны по напряжению волновода с согласующим устройством для экспериментальной установки по определению скорости горения энергетических конденсированных систем. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2025, № 3 (120), с. 100–113. EDN: NSLXLJ

## NUMERICAL STUDY OF THE VOLTAGE STANDING WAVE RATIO OF A WAVEGUIDE WITH A MATCHING DEVICE FOR AN EXPERIMENTAL SETUP TO DETERMINE THE BURNING RATE OF ENERGY CONDENSED SYSTEMS

A.K. Shostov  
K.V. Fedotova

shostov@bmstu.ru  
fedotova@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

The burning rate of the energy condensed system is the main intra-ballistic parameter when designing propulsion systems of aircraft. Due to the complexity of analytically determining the combustion rate, various experimental methods are being developed, one of which is microwave diagnostics. When using this method, elements of microwave technology are used to study the burning rate, which include a matching device made of dielectric material. It is designed to match circular cross-section tracts with different diameters filled with air and a sample of the energy condensed system under study. One of the indicators of the quality of the waveguide path is the voltage standing wave ratio, the value of which for real devices is in the range of 1.02–2.00. The following materials are considered in the work: nylon, fiberglass, polymethyl methacrylate and polylactide. For each material, frequency intervals of electromagnetic waves are determined at which the smallest number of excess reflections occurs. The geometric parameters of a metal waveguide filled with air are determined. Numerical simulation of the waveguide path showed that a matching device made of fiberglass gives the highest voltage standing wave ratio value, which negatively affects the measurement of the parameters of the signal under study. This is probably due to the smallest diameter of the minimum cross-section due to the high value of the dielectric constant of fiberglass (4.6). On the contrary, a matching device made of nylon, polymethyl methacrylate and polylactide provides a voltage standing wave ratio value of less than 2 in the frequency range 8.8–9.5 GHz

### Keywords

*Microwave method, voltage standing wave ratio, antenna, dielectric constant, waveguide*

Received 07.06.2024

Accepted 25.11.2024

© Author(s), 2025

## REFERENCES

- [1] Zarko V., Kiskin A., Cheremisin A. Contemporary methods to measure regression rate of energetic materials: a review. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2022, vol. 91, art. 100980. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100980>
- [2] Zarko V.E., Vdovin D.V., Perov V.V. Methodical problems of solid-propellant burning-rate measurements using microwaves. *Combust. Explos. Shock Waves.*, 2000, vol. 36, no. 1, pp. 62–71. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02701515>
- [3] Yagodnikov D.A., Sukhov A.V., Sergeev A.V., et al. Possibilities of studying the process of the metallized energy condensed systems combustion by the microwave radiation method. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2023, no. 3 (146), pp. 50–63 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-3-50-63>
- [4] Yagodnikov D.A., Sergeev A.V., Kozichev V.V. Experimental and theoretical basis for improving the accuracy of measuring the burning rate of energetic condensed systems by a microwave method. *Combust. Explos. Shock Waves.*, 2014, vol. 50, no. 2, pp. 168–177. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0010508214020075>
- [5] Ginzton E.L. *Microwave measurements.*, McGraw-Hill, 1957.
- [6] Collier R.J., Skinner A.D. *Microwave measurements.* Institution of Engineering, 2007.
- [7] Lavrov B.P., Sharay Yu.M., Sergeev A.V., et al. Determination of rate of solid fuel combustion using impedance meter of microwave range. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2009, no.1 (74), pp. 28–36 (in Russ.). EDN: KHNBPX
- [8] Strand L.D., Schultz A.L., Reedy G.K. Determination of solid-propellant transient regression rates using a microwave Doppler shift technique. Pasadena, Jet Propulsion Laboratory, 1972.
- [9] Efimov I.E., Shermina G.A. *Volnovodnye linii peredach [Waveguide transmission lines]*. Moscow, Svyaz Publ., 1979.
- [10] Pchelnikov Yu.N., Sviridov V.T. *Elektronika sverkhvysokikh chastot [Electronics of ultrahigh frequencies]*. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1981.
- [11] Lavrov B.P., Sergeev A.V., Kozichev V.V. et al. Application of microwave method for measuring the combustion rate of energetic condensed systems under ultrahigh pressure conditions. *Nauka i obrazovanie [Science and Education]*, 2011, no. 12 (in Russ.). EDN: OOZGUZ
- [12] Huber E., Mirzaee M., Bjorgaard J., et al. Dielectric property measurement of PLA. *IEEE EIT*, 2016, pp. 788–792. DOI: <https://doi.org/10.1109/eit.2016.7535340>
- [13] Sedki M.R., Iman M.S. *Electromagnetic fields and waves: fundamentals of engineering.* McGraw-Hill, 2020.
- [14] Fogelson B.A. *Volnovody [Waveguides]*. Moscow, Voenizdat Publ., 1958.

- [15] Vaynshteyn L.A. *Elektromagnitnye volny* [Electromagnetic waves]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1988.
- [16] Koryu Ishii T. *Handbook of Microwave Technology*. Academic Press, 1995.
- [17] Suslyayev V.I., Dunaevskiy G.E., Emelyanov E.V., et al. Complex of methods and means of radio wave diagnostics of fundamental characteristics of heterogeneous materials and media in gigahertz and terahertz ranges. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2011, vol. 54, no. 9-2, pp. 138–146 (in Russ.). EDN: OWJCFW
- [18] Zorkaltseva M.Yu., Koshelev V.I., Petkun A.A. Numerical modeling of ultra wide-band combined antennas. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2017, vol. 60, no. 8, pp. 26–30 (in Russ.). EDN: ZDQNBL
- [19] Zakharov V.V., Artyukhov I.I. 3d-improvement of finite element 3d modeling methods for microwave ray type electrothermal installations with unlimited volume. *Russ. Phys. J.*, 2017, vol. 60, no. 8, pp. 1291–1297.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11182-017-1210-8>
- [20] Jin J.M. *The finite element method in electromagnetics*. Wiley, 2002.

**Shostov A.K.** — Assistant, Department of Rocket Engines, BMSTU (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Fedotova K.V.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Rocket Engines, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Shostov A.K., Fedotova K.V. Numerical study of the voltage standing wave ratio of a waveguide with a matching device for an experimental setup to determine the burning rate of energy condensed systems. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2025, no. 3 (120), pp. 100–113 (in Russ.).  
EDN: NSLXLJ