

**ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ  
МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ  
МЕТОДОМ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**Д.А. Ягодников**

**А.В. Сухов**

**А.В. Сергеев**

**В.В. Козичев**

**А.К. Шостов**

daj@bmstu.ru

sukhovav@bmstu.ru

sergeevav@bmstu.ru

ko\_vv@bmstu.ru

shostovak@student.bmstu.ru

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

---

**Аннотация**

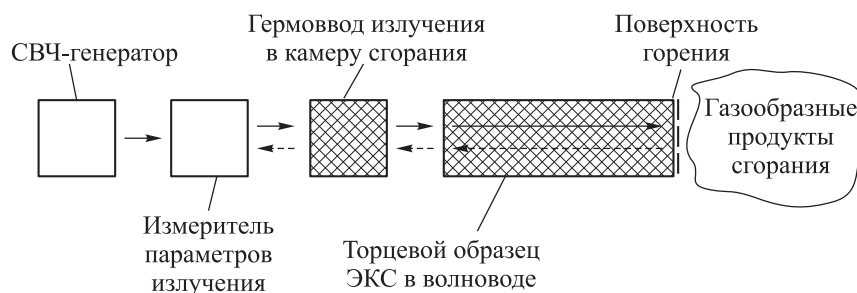
Рассмотрены процессы распространения электромагнитного излучения частотой 9,027 ГГц (соответствует длине волны 33,2 мм в вакууме) в волноводах круглого сечения экспериментальной установки для определения скорости горения смесевых энергетических конденсированных систем в условиях высокого давления. Проведен качественный теоретический анализ взаимодействия электромагнитного излучения с единичными металлическими и контрастными диэлектрическими частицами, находящимися в несущей диэлектрической среде конденсированной системы, и массивами распределенных в пространстве металлических и контрастных диэлектрических частиц. Выполнена оценка влияния электромагнитного излучения, базового материала и частиц наполнителя на параметры результирующей стоячей волны в волноводе СВЧ-установки для измерения скорости горения энергетической конденсированной системы, а также теоретическая оценка качественного влияния содержания наполнителя на погрешность СВЧ-системы измерения. Проанализированы результаты экспериментального исследования СВЧ-методом горения двух модельных энергетических конденсированных систем и образцового модельного диэлектрического материала (трансформаторного масла). Результаты исследования являются практическим обоснованием применимости СВЧ-метода диагностики характеристик

**Ключевые слова**

*Электромагнитная волна, скорость газификации, рассеяние Рэлея, вторичное излучение, комплексный коэффициент отражения, металлические частицы*

**Введение.** Электромагнитные волны способны распространяться в диэлектрических средах (рассеиваясь и/или поглощаясь), а также отражаться от поверхностей с резкой сменой диэлектрических параметров, в том числе и от металлических поверхностей. Это свойство позволяет реализовать СВЧ-метод измерения линейной скорости горения образцов твердых ракетных топлив.

Принцип действия СВЧ-метода диагностики параметров горения энергетической конденсированной системы (ЭКС) заключается в измерении параметров стоячей электромагнитной волны, образованной двумя встречными волнами: прямой, движущейся по волноводу от генератора к поверхности горения сквозь топливо, и обратной, отраженной от поверхности горения и движущейся в противоположном направлении. Экспериментальные исследования горения ЭКС с помощью СВЧ-метода приведены в [1–3]. Теоретическое обоснование принципов метода измерения подробно приведено в [4, 5]. Подобный вопрос также изучен применительно к исследованию скорости газификации твердых топлив в [6–8]. Принципиальная схема СВЧ-метода диагностики параметров горения приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Принципиальная схема СВЧ-метода диагностики параметров горения

Отражение электромагнитной волны от поверхности горения ЭКС (границы раздела конденсированного топлива и газообразных продуктов сгорания) обусловлено значительным изменением диэлектрической проницаемости среды, которое вызвано как изменением ее химического состава, так и значительным (на 2–3 порядка в зависимости от давления) изменением плотности вещества при переходе от ЭКС к газообразным продуктам сгорания.

В теории СВЧ при обеспечении идеальной картины рабочего процесса системы приведенный метод измерения имеет низкие ( $\sim 0,5\%$ ) значения погрешности длины образца, некоторые частные полезные свойства (например, физическое осреднение шероховатой поверхности горения), а также исключительное быстродействие, позволяющее работать на нестационарных режимах горения.

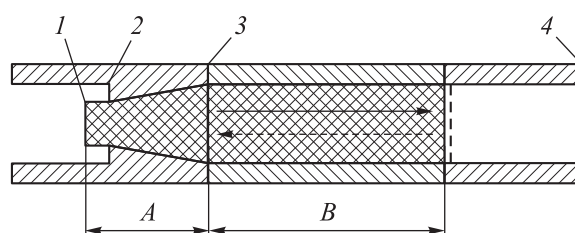
**Особенности процесса.** Практическая реализация данного метода измерения сопряжена с рядом сложностей, часть из которых описана в [9, 10]. Сложности практического применения СВЧ-метода обусловлены отличиями реальной картины физических процессов при горении ЭКС от теоретической модели. В частности, СВЧ-метод диагностики сталкивается с двумя физическими процессами, приводящими к увеличению погрешности измерения: рассеянием электромагнитного излучения в материалах и паразитными отражениями. Определенный вклад в общую погрешность вносит нелокальность границы изменения параметров материала вблизи поверхности горения.

При распространении внутри установки электромагнитная волна часть пути проходит в волноводе, заполненном диэлектрическими элементами системы (гермоввод СВЧ-излучения в камеру сгорания, заряд исследуемой ЭКС). Рассеяние электромагнитного излучения в материале, через который проходит волна, приводит к ослаблению амплитуды как прямой, так и отраженной волн, и в целом к снижению отношения сигнал/шум.

Паразитные отражения — отражения сигнала от физических и геометрических неоднородностей волноводного тракта, кроме отражения от поверхности горения топлива.

Геометрические неоднородности — любые изменения геометрии волноводного тракта (формы тракта, уступов, фасок, а также внезапные расширения и сужения и др.). В случае использования закритического волновода, т. е. когда его характерный поперечный размер меньше длины волны, крайней точкой распространения излучения является выходной торец волновода с зарядом ЭКС. В этом случае можно не учитывать влияние внешних по отношению к волноводу элементов конструкции.

К физическим неоднородностям относятся локализованные изменения диэлектрических свойств среды (например, переход из воздуха внутри полого волновода в материал гермоввода СВЧ-излучения в камеру сгорания), а также мелкие артефакты, распределенные в объеме или на поверхности волновода. Характерные зоны паразитных отражений и рассеяния сигнала приведены на рис. 2.



**Рис. 2.** Характерные зоны паразитных отражений (1–4) и рассеяния сигнала (A, B):

- 1, 2 — входные поверхности гермоввода (из стеклотекстолита, A);  
 3 — граница раздела гермоввода и образца топлива (исследуемой ЭКС, B);  
 4 — выход из волновода (18 мм)

Нелокальность границы раздела фаз может быть вызвана неидеальной геометрией поверхности горения. Геометрические отклонения поверхности обусловлены как нарушением нормальной геометрии поверхности горения на макроскопическом уровне, так и ее шероховатостью. Некоторые данные о влиянии отклонений геометрии поверхности приведены в [11]. Шероховатость поверхности горения может быть вызвана физически и химически гетерогенным составом топлива, а также случайными флуктуациями скорости газификации малых масштабов (десятки–сотни микрометров).

**Частицы конденсированной фазы.** В настоящее время в энергосиловых установках применяются металлизированные ЭКС, содержащие порошкообразные добавки металлов и их соединений. В связи с этим актуальной является задача обоснования возможности применения СВЧ-метода для измерения характеристик горения, в том числе металлизированных ЭКС. Поскольку электромагнитные волны способны отражаться от металлических поверхностей, необходимо оценить степень и характер влияния подобных отражений на точность результата измерения. В рассматриваемой установке используется электромагнитное излучение частотой 9,027 ГГц (длина волны в вакууме 0,0332 м); данные параметры обусловлены комплексом требований, сформированных при разработке СВЧ-установки [1]. Характерные размеры неоднородностей диэлектрических свойств, обусловленные включениями порошкообразных добавок, в том числе металлических, составляют порядка  $10^{-5} \dots 10^{-4}$  м, т. е. на 2–3 порядка меньше длины волны.

В этом случае взаимодействие электромагнитного излучения с диэлектрическими частицами (например, частицами окислителя смесевой ЭКС) соответствует рэлеевскому рассеянию (частный случай рассеяния Ми для частиц, размер которых много меньше длины волны излучения) и проис-

ходит без изменения фазы. При этом переизлучение происходит не строго в обратном направлении (что характерно для нормальных к оси волновода макроскопических отражателей), а в соответствии с диаграммой направленности для частного решения, соответствующего выбранному размеру частиц и величине диэлектрической проницаемости материалов частицы и среды.

Взаимодействие излучения с частицей определяется интерференцией вторичного излучения с падающей волной, поэтому можно сделать вывод о том, что качественное взаимодействие с металлическими частицами будет иметь сходный характер. При этом решение для металлической частицы даст собственную диаграмму направленности. Геометрия последней зависит от геометрической формы частицы и ее ориентации относительно направления падающего излучения. Некоторые данные о взаимодействии падающей электромагнитной волны с частицей приведены в [12–15].

Отметим, что изолированная малая частица (контрастная диэлектрическая или металлическая) в отличие от макроскопического объекта обеспечивает более или менее эффективное рассеяние излучения без образования ярко выраженной обратной волны. Характерно, что интенсификацию рассеяния должны обеспечивать как металлические, так и диэлектрические частицы, параметры (плотность и диэлектрическая проницаемость) которых значительно отличаются от параметров несущей среды. Таким образом, влияние металлических дисперсных добавок на рассеяние излучения аналогично влиянию неметаллических добавок. При этом диэлектрические частицы, даже существенно (по меркам диэлектриков) отличающиеся от несущего материала, значительно меньшее влияют на рассеяние излучения по сравнению с металлическими, что объясняет более сильное влияние металлических добавок.

Массив распределенных в пространстве малоразмерных металлических частиц обеспечивает интенсификацию рассеяния излучения в объеме за счет многократного переотражения излучения в случайных направлениях и увеличения пути излучения через диэлектрик. При этом металлические частицы обеспечивают значительно более интенсивное рассеяние излучения и меньшее пропускание. Степень влияния определяется относительным размером частиц и плотностью их распределения. Малая плотность частиц обеспечит умеренное рассеяние излучения, сопоставимое с таковым для диэлектрических добавок. Большая концентрация может обеспечить почти полное рассеяние и поглощение излучения на дистанции в несколько десятков миллиметров. Процесс взаимодействия электромагнитного излучения с единичной частицей рассмотрен в [16, 17]. Теоретиче-

ские и экспериментальные данные о взаимодействии электромагнитного излучения с массивом частиц приведены в [18–21].

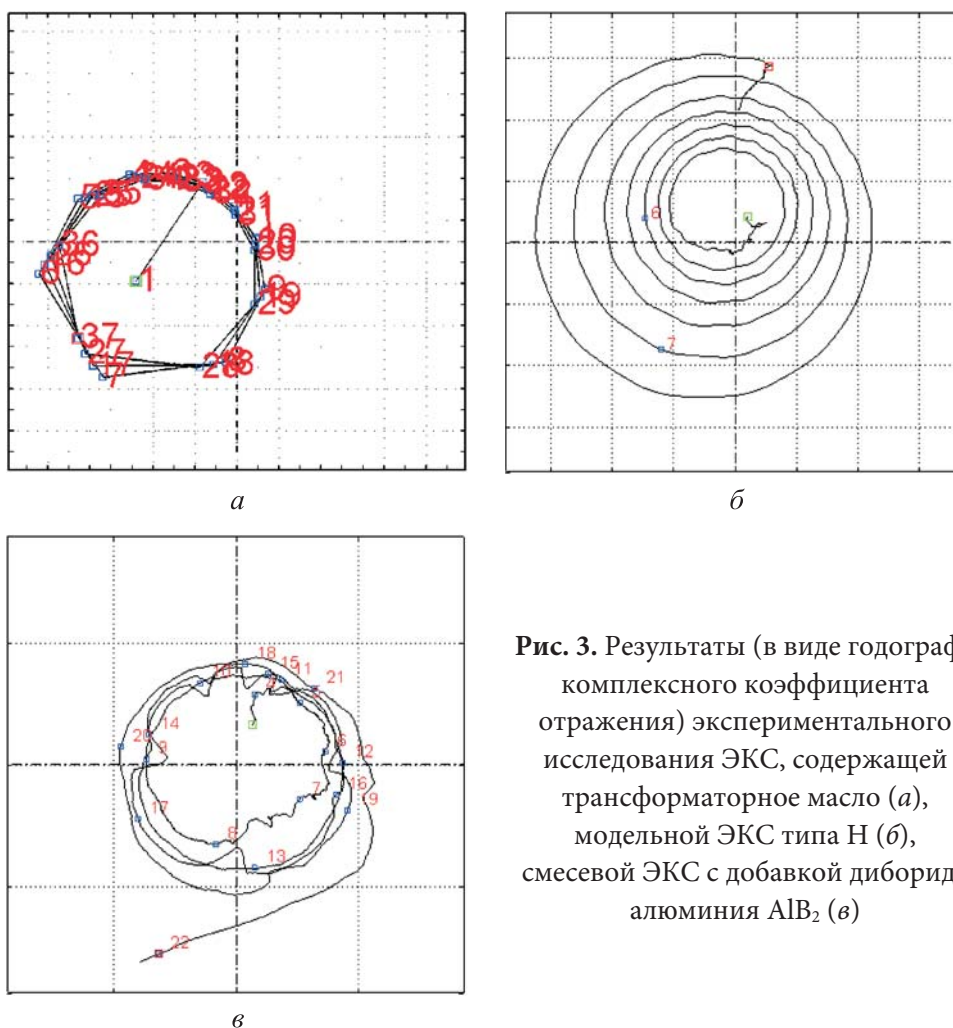
**Результаты исследования.** При отработке метода измерения исследовали несколько материалов, отличающихся однородностью и фазовым составом. В качестве образцового материала выбрано трансформаторное масло, так как оно является однородным диэлектриком с удовлетворительным значением диэлектрических потерь, а его уровень в волноводе можно регулировать с помощью модельной гидравлической системы. Результаты измерения скорости горения (в случае с маслом — уменьшения длины образца за счет стока жидкости из волновода) приведены в виде годографа комплексного коэффициента отражения, фаза которого соответствует фазе результирующей стоячей волны (соответствующей геометрической длине образца), а значение — амплитуде напряженности электрического поля.

Результаты экспериментального исследования в виде годографа комплексного коэффициента отражения, приведенные на рис. 3, расположены по мере увеличения неоднородности исследуемого материала. Исследованию ЭКС, содержащей трансформаторное масло, соответствует рис. 3, а. Трансформаторное масло — образцовая гомогенная среда без включений любого рода и с почти идеальной поверхностью отражения.

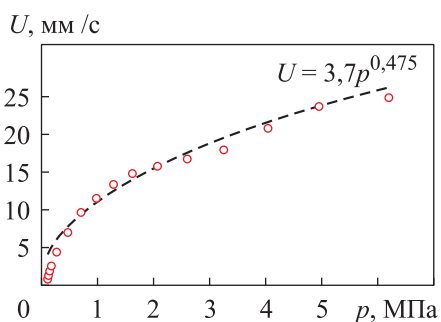
Годограф, приведенный на рис. 3, б, соответствует модельной ЭКС типа Н, не содержащей порошкообразных добавок, но имеющей химически обусловленную неоднородность диэлектрической проницаемости ( $10^{-5} \dots 10^{-3}$  м) и сравнительно небольшим диапазоном изменения диэлектрической проницаемости, т. е. материал имеет достаточно «мягкие» неоднородности, размер которых сопоставим с характерным размером порошкообразных наполнителей смесевых составов.

Результаты исследования смесевой ЭКС с добавкой диборида алюминия  $AlB_2$ , который не классифицируется как металлический сплав, однако содержит металл и проявляет важные в контексте рассматриваемых процессов свойства, явно отличающие его от диэлектрических добавок, приведены на рис. 3, в. Для данного состава получен закон горения в виде зависимости линейной скорости горения  $U$  от давления  $p$  (рис. 4).

Полученная в результате экспериментального исследования характеристик горения зависимость линейной скорости горения от давления смесевой ЭКС с добавкой диборида алюминия  $AlB_2$  (см. рис. 4) показывает принципиальную возможность применения метода для изучения параметров горения топлив с металлсодержащими добавками.



**Рис. 3.** Результаты (в виде годографа комплексного коэффициента отражения) экспериментального исследования ЭКС, содержащей трансформаторное масло (а), модельной ЭКС типа Н (б), смесевой ЭКС с добавкой диборида алюминия  $AlB_2$  (в)



**Рис. 4.** Зависимость линейной скорости горения  $U$  от давления  $p$  смесевой ЭКС с добавкой диборида алюминия  $AlB_2$

**Анализ полученных результатов.** Наличие неоднородностей, обеспечивающих интенсификацию рассеяния излучения, приводит к снижению значений компонентов комплексного коэффициента отражения, что уменьшает отношение сигнал/шум и увеличивает погрешность измерения.

Наличие неоднородностей приводит к возникновению нелинейной связи между физической и фазовой длинами образца, что не позволяет выполнить пересчет, используя коэффициент пропорциональности, и обуславливает необходимость применения более сложных алгоритмов, требующих более сложной калибровки для каждого исследуемого состава.

Степень влияния указанных негативных факторов при прочих равных условиях пропорциональна количественному содержанию контрастных порошкообразных добавок.

**Заключение.** Теоретические расчеты взаимодействия электромагнитного излучения для единичной частицы позволяют оценить качественный и количественный характеры взаимодействия. Расчеты для регулярных массивов частиц представляют существенную сложность. Теоретические или численные расчеты для частиц, случайным образом распределенных в объеме, — крайне серьезная профильная задача.

С позиции получения практически значимых количественных данных целесообразно проводить экспериментальные исследования влияния параметров и содержания металлических добавок на точность работы СВЧ-метода диагностики.

Принципиальное применение указанного метода для анализа процесса горения металлизированных ЭКС возможно, однако при этом максимальная длина образца может быть уменьшена.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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.
- [2] 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*, 2011, Спец. выпуск. «Энергетическое и транспортное машиностроение», с. 63–73.
- [3] 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.
- [4] Аbruков В.С., Аверсон А.Э., Мальцев В.М. Новые возможности исследования процессов горения конденсированных систем методом интерферометрии. *Физика горения и взрыва*, 1983, т. 19, № 5, с. 66–69.



- [5] Перов В.В., Зарко В.Е., Жуков А.С. Новый микроволновый метод измерения нестационарной массовой скорости газификации конденсированных систем. *Физика горения и взрыва*, 2014, т. 50, № 6, с. 130–133.
- [6] Murphy J.J., Krier H. Evaluation of ultrasound technique for solid-propellant burning-rate response measurements. *Propul. Power. J.*, 2002, vol. 18, no. 3, pp. 641–651. DOI: <https://doi.org/10.2514/2.5978>
- [7] Strand L.D., Magiawala K.R., McNamara R.P. Microwave measurement of the solid-propellant pressure-coupled response function. *J. Spacecr. Rockets.*, 1980, vol. 17, no. 6, pp. 483–488. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.57768>
- [8] Eisenreich N., Kugler H.P., Sinn F. An optical system for measuring the burning rate of solid propellant strands. *Propellants, Explos. Pyrotech.*, 1987, vol. 12, no. 3, pp. 78–80. DOI: <https://doi.org/10.1002/prop.19870120304>
- [9] Zarko V., Perov V., Kiskin A., et al. Microwave resonator method for measuring transient mass gasification rate of condensed systems. *Acta Astronaut.*, 2019, vol. 158, pp. 272–276. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.03.028>
- [10] 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, № 2, с. 51–61.
- [11] Козичев В.В., Федоренко В.В. Влияние геометрии поверхности горения энергетических конденсированных систем на погрешность определения скорости горения СВЧ-методом. *Молодежная научно-инженерная выставка «Политехника». Сборник статей участников*. М., МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011, с. 202–208.
- [12] Баженов А.В. Электродинамика и распространение радиоволн. Ставрополь, СТИС, 2011.
- [13] Тимченко С.Л., Задорожный Н.А., Скрипник Ф.В. и др. Особенности изменения фазы поляризованной ЭМ-волны оптического диапазона на границе раздела двух диэлектрических сред. *Радиостроение*, 2018, № 1, с. 29–38.
- [14] Кубанов В.П., ред. Основы теории антенн и распространения радиоволн. Самара, Офорт, 2016.
- [15] Моисеев И.О. Взаимодействие электромагнитного излучения с малой металлической частицей сферической формы. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., МГОУ, 2010.
- [16] Трибельский М.И., Мирошниченко А.Е. Резонансное рассеяние электромагнитных волн малыми металлическими частицами: новый взгляд на старую проблему. *УФН*, 2022, т. 192, № 1, с. 45–68. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.01.038924>
- [17] Гузатов Д.В., Гайда Л.С., Афанасьев А.А. Теоретическое исследование силы светового давления, действующей на сферическую диэлектрическую частицу произвольного размера в интерференционном поле двух плоских монохроматических электромагнитных волн. *Квантовая электроника*, 2008, т. 38, № 12, с. 1155–1162.

[18] Лойко Н.А., Мискевич А.А., Лойко В.А. Рассеяние поляризованного и естественного света монослоем сферических однородных пространственно упорядоченных частиц при освещении по нормали. *ЖТФ*, 2018, т. 125, № 11, с. 623–634.

DOI: <http://dx.doi.org/10.21883/OS.2018.11.46820.197-18>

[19] Баландин О.А., Верхотуров А.Р. Теоретические аспекты взаимодействия твердых частиц с электромагнитными волнами. *Вестник ЧитГУ*, 2011, № 12, с. 71–77.

[20] Баландин О.А., Верхотуров А.Р. Влияние интенсивности электромагнитных волн на движение твердой частицы. *Вестник ЗабГУ*, 2013, № 11, с. 17–21.

[21] Дамарацкий И.А., Трунов П.А. Моделирование на основе волновой оптики процессов поглощения и рассеяния электромагнитных волн СВЧ диапазона в дисперсных системах. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2013, № 9. URL: <http://engineering-science.ru/doc/623173.html>

**Ягодников Дмитрий Алексеевич** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Сухов Алексей Васильевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

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

**Козичев Владимир Владимирович** — преподаватель кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

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

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

Ягодников Д.А., Сухов А.В., Сергеев А.В. и др. Возможности исследования процесса горения металлизированных энергетических конденсированных систем методом сверхвысокочастотного излучения. *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>

**POSSIBILITIES OF STUDYING THE PROCESS  
OF THE METALLIZED ENERGY CONDENSED SYSTEMS  
COMBUSTION BY THE MICROWAVE RADIATION METHOD**

**D.A. Yagodnikov**

daj@bmstu.ru

**A.V. Sukhov**

sukhovav@bmstu.ru

**A.V. Sergeev**

sergeevav@bmstu.ru

**V.V. Kozichev**

ko\_vv@bmstu.ru

**A.K. Shostov**

shostovak@student.bmstu.ru

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

---

**Abstract**

The paper considers processes of the electromagnetic radiation propagation at the frequency of 9.027 GHz (corresponding to the wavelength in vacuum of 33.2 mm) in the round-section waveguides of an experimental unit to determine the burning rate of the mixed energy-condensed systems under the high pressure conditions. Qualitative theoretical analysis of the electromagnetic radiation interaction with single metal and contrast dielectric particles in the carrier dielectric medium of a condensed system and arrays of metal and contrast dielectric particles distributed in space was carried out. The paper evaluates the influence of electromagnetic radiation, base material and filler particles on parameters of the resulting standing wave in the microwave unit waveguide for measuring the burning rate of an energy-condensed system, and assesses theoretically the qualitative effect of the filler content on the error in the microwave measurement system. Results of the experimental study of combustion of two model energy-condensed systems, as well as the exemplary model dielectric material (transformer oil) by the microwave method, were analyzed. Study results are the practical justification for introducing the microwave method in diagnosing combustion characteristics of the energy-condensed systems containing particles of the metallized filler

**Keywords**

*Electromagnetic wave, gasification rate, Rayleigh scattering, secondary radiation, complex reflection coefficient, metal particles*

Received 10.02.2023

Accepted 02.03.2023

© Author(s), 2023

---

**REFERENCES**

- [1] 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 Mechanical Engineering*, 2009, no. 1 (74), pp. 28–36 (in Russ.).

- [2] Yagodnikov D.A., Sukhov A.V., Sergeev A.V., et al. Experimental methodology and model installation for investigating combustion of energetic condensed systems at high pressures. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2011, Spec. iss. "Power and Transport Machine Building", pp. 63–73 (in Russ.).
- [3] 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>
- [4] Abrukov V.S., Averson A.E., Maltsev V.M. New possibilities of investigating the combustion processes of condensed systems by interferometry. *Combust. Explos. Shock Waves*, 1983, vol. 19, no. 5, pp. 594–596. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00750431>
- [5] Perov V.V., Zarko V.E., Zhukov A.S. New microwave method for measuring unsteady mass gasification rate of condensed systems. *Combust. Explos. Shock Waves*, 2014, vol. 50, no. 6, pp. 739–741. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0010508214060173>
- [6] Murphy J.J., Krier H. Evaluation of ultrasound technique for solid-propellant burning-rate response measurements. *Propul. Power. J.*, 2002, vol. 18, no. 3, pp. 641–651. DOI: <https://doi.org/10.2514/2.5978>
- [7] Strand L.D., Magiawala K.R., McNamara R.P. Microwave measurement of the solid-propellant pressure-coupled response function. *J. Spacecr. Rockets.*, 1980, vol. 17, no. 6, pp. 483–488. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.57768>
- [8] Eisenreich N., Kugler H.P., Sinn F. An optical system for measuring the burning rate of solid propellant strands. *Propellants, Explos. Pyrotech.*, 1987, vol. 12, no. 3, pp. 78–80. DOI: <https://doi.org/10.1002/prop.19870120304>
- [9] Zarko V., Perov V., Kiskin A., et al. Microwave resonator method for measuring transient mass gasification rate of condensed systems. *Acta Astronaut.*, 2019, vol. 158, pp. 272–276. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.03.028>
- [10] 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>
- [11] Kozichev V.V., Fedorenko V.V. [Influence of combustion surface geometry of energetic condensed systems on the error of determining the combustion rate by microwave method]. *Molodezhnaya nauchno-inzhenernaya vystavka "Politehnika". Sbornik statey uchastnikov* [Youth Scientific-Engineering Exhibition "Polytechnica". Collection of articles by the participants.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2011, pp. 202–208 (in Russ.).
- [12] Bazhenov A.V. *Elektrodinamika i rasprostraneniye radiovoln* [Electrodynamics and radio wave propagation]. Stavropol, STIS Publ., 2011.
- [13] Timchenko S.L., Zadorozhnyy N.A., Skripnik F.V., et al. Some phase-shift peculiarities of polarized em wave reflected from dielectric interface. *Radiostroenie* [Radio Engineering], 2018, no. 1, pp. 29–38 (in Russ.).
- [14] Kubanov V.P., ed. *Osnovy teorii antenn i rasprostraneniya radiovoln* [Fundamentals of antennas and radio wave propagation theory]. Samara, Ofort Publ., 2016.

- [15] Moiseev I.O. Vzaimodeystvie elektromagnitnogo izlucheniya s maloy metallicheskoj chastitsej sfericheskoj formy. Avtoref. dis. kand. fiz.-mat. nauk [Interaction of electromagnetic radiation with a small metallic particle of spherical shape. Dr. Sc. (Phys.-Math.). Abs. Diss.]. Moscow, MGOU, 2010 (in Russ.).
- [16] Tribelskiy M.I., Miroshnichenko A.E. Resonant scattering of electromagnetic waves by small metal particles: a new insight into the old problem. *Phys.-Usp.*, 2022, vol. 65, no. 1, pp. 40–61. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.01.038924>
- [17] Guzatov D.V., Gayda L.S., Afanasyev A.A. Theoretical study of the light pressure force acting on a spherical dielectric particle of an arbitrary size in the interference field of two plane monochromatic electromagnetic waves. *Quantum Electron.*, 2008, vol. 38, no. 12, pp. 1155–1162. DOI: <https://doi.org/10.1070/QE2008v038n12ABEH013821>
- [18] Loyko N.A., Miskevich A.A., Loyko V.A. Scattering of polarized and natural light by a monolayer of spherical homogeneous spatially ordered particles under normal illumination. *Opt. Spectrosc.*, 2018, vol. 125, no. 5, pp. 655–666. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0030400X18110188>
- [19] Balandin O.A., Verkhoturov A.R. Theoretical aspects solid particles and electromagnetic waves interaction. *Vestnik ChitGU* [Chita State University Journal], 2011, no. 12, pp. 71–77 (in Russ.).
- [20] Balandin O.A., Verkhoturov A.R. The intensity influence of electro-magnetic waves on the solid particle's motion. *Vestnik ZabGU* [Transbaikal State University Journal], 2013, no. 11, pp. 17–21 (in Russ.).
- [21] Damaratskiy I.A., Trunov P.A. Simulation of absorption and dispersion processes of electromagnetic waves within the microwave frequency range in dispersed media based on wave optics. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education: Scientific Publication], 2013, no. 9 (in Russ.). Available at: <http://engineering-science.ru/doc/623173.html>

**Yagodnikov D.A.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Sukhov A.V.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Sergeev A.V.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Kozichev V.V.** — Lecturer, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Shostov A.K.** — Engineer, Scientific and Educational Complex Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

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

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>