



Научная статья

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)
УДК 678.6

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.026



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИССИПАЦИИ СВЧ-ЭНЕРГИИ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ КОМПОЗИТОВ

Антон Сергеевич Сивак ¹, Светлана Геннадьевна Калганова ²,
Юлия Александровна Кадыкова ³, Сергей Викторович Тригорлый ⁴,
Татьяна Павловна Сивак ⁵, Екатерина Юрьевна Васинкина ⁶

АО «НПП «Контакт», ул. Спицына, 1, Саратов, Россия

¹ pktrial@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-3302-4670>

² s.kalganova2016@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2155-3192>

³ 79053818212@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5581-0970>

⁴ trigorly55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6591-7624>

⁵ tata.sivak@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0007-9780-4265>

⁶ vasinkina1987@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4247-9262>

Аннотация. В настоящее время высокоэнергетические радиопоглощающие композиты применяются для задач оборонно-промышленного комплекса и гражданской промышленности, актуальной проблемой является создание таких материалов с заданными функциональными свойствами, а также разработка технологии внешнего электромагнитного воздействия для интенсификации диссипации энергии в объеме композита. В данном исследовании предложена методика математического моделирования нагрева высокоэнергетических радиопоглощающих композитов при воздействии СВЧ-энергии с использованием программной среды COMSOL Multiphysics®, что позволяет решать систему уравнений электродинамики и теплопереноса в трехмерной постановке и моделировать процессы СВЧ-нагрева композитов с учетом изменения свойств материалов матрицы и наполнителя при СВЧ-воздействии.

В результате исследования процесса диссипации на основе проведенного математического моделирования определены оптимальные геометрические размеры радиопоглощающего наполнителя из карбида кремния и его расположение в матрице из фторопласта Ф-4 и эпоксидной смолы ЭД-20. Установлено, что для высокоэнергетических радиопоглощающих композитов с матрицей из эпоксидной смолы с плоским наполнителем из карбида кремния толщиной 1–4 мм, расположенным в волноводной СВЧ-камере перпендикулярно вектору Пойнтинга и параллельно вектору напряженности электрического поля, при СВЧ-мощности 600 Вт и времени воздействия 60 с достигается скорость нагрева 10–17 °С/с с равномерностью температурного поля в наполнителе.

Ключевые слова: высокоэнергетический радиопоглощающий композит, диссипация энергии, СВЧ-излучение, эпоксидная смола, фторопласт, поглощающий наполнитель, численное моделирование.

Для цитирования: Математическое моделирование процесса диссипации СВЧ-энергии при термообработке высокоэнергетических радиопоглощающих композитов / А. С. Сивак [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 212–219. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.026. EDN: <https://elibrary.ru/IFFBWZ>.

Original article

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF MICROWAVE ENERGY DISSIPATION DURING HEAT TREATMENT OF HIGH-ENERGY RADIO-ABSORBING COMPOSITES

Anton S. Sivak ¹, Svetlana G. Kalganova ², Yulia A. Kadykova ³,
Sergey V. Trigorly ⁴, Tatyana P. Sivak ⁵, Ekaterina Yu. Vasinkina ⁶

JSC "SPE "Konтакт", Spitsyna str., 1, Saratov, Russia

¹ pktrial@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-3302-4670>

² s.kalganova2016@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2155-3192>

© Сивак А. С., Калганова С. Г., Кадыкова Ю. А., Тригорлый С. В., Сивак Т. П., Васинкина Е. Ю., 2025

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИССИПАЦИИ СВЧ-ЭНЕРГИИ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ КОМПОЗИТОВ

³ 79053818212@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5581-0970>

⁴ trigorly55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6591-7624>

⁵ tata.sivak@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0007-9780-4265>

⁶ vasinkina1987@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4247-9262>

Abstract. Nowadays high-energy radio-absorbing composites are used for the tasks of defense-industrial complex and civil industry, and the actual problem is the creation of such materials with specified functional properties, as well as the development of the technology of external electromagnetic influence to intensify the dissipation of energy in the composite volume. In this study the methodology of mathematical modeling of heating of high-energy radio-absorbing composites under microwave energy exposure using COMSOL Multiphysics® software environment is proposed, which allows solving the system of equations of electrodynamics and heat transfer in three-dimensional formulation and modeling the processes of microwave heating of composites taking into account the change of properties of matrix and filler materials under microwave exposure. As a result of investigation of the dissipation process on the basis of mathematical modeling, the optimum geometrical dimensions of silicon carbide radio-absorbing filler and its location in the matrix made of fluoroplastic F-4 and epoxy resin ED-20 have been determined. It is established that for high-energy radio-absorbing composites with a matrix of epoxy resin with a flat silicon carbide filler 1-4 mm thick, located in a waveguide microwave chamber perpendicular to the Poynting vector and parallel to the vector of electric field strength, at a microwave power of 600 W and exposure time of 60 s the heating rate of 10-17 °C /s with uniformity of the temperature field in the filler is achieved.

Keywords: high-energy radio-absorbing composite, energy dissipation, microwave radiation, epoxy resin, fluoroplastic, absorbing filler, numerical modeling.

For citation: Sivak, A. S., Kalganova, S. G., Kadykova, Y. A., Trigorly, S. V., Sivak, T. P. & Vasinkina, E. Y. (2025). Mathematical modeling of the process of microwave energy dissipation during heat treatment of high-energy radio-absorbing composites. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 212-219. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.026. EDN: <https://elibrary.ru/IFFBWZ>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время полимерные композиционные материалы находят широкое применение в изделиях и конструкциях для различных отраслей промышленности. Развитие новых технологий в военной и гражданской промышленности требует создания новых композиционных материалов, обладающих улучшенными функциональными свойствами. Одним из видов таких композитов являются высокоэнергетические радиопоглощающие композиты (ВРК), которые состоят из полимерной матрицы и поглощающего электромагнитную энергию наполнителя. При воздействии на ВРК внешнего электромагнитного излучения в объеме композита выделяется большое количество тепловой энергии, и его температура повышается с большой скоростью. В связи с этим ВРК находят применение в качестве иницирующего или первичного вещества для зажигания топлива, для возбуждения взрывчатого превращения других веществ в устройствах двойного назначения в оборонно-промышленном комплексе, в горнодобывающей промышленности и других отраслях [1–5].

Актуальной проблемой является создание высокоэнергетических радиопоглощающих композитов с заданными функциональными свойствами и разработка технологии внешнего электромагнитного воздействия для интенсификации диссипации энергии в объеме композита. При создании ВРК важной задачей является исследование и прогнозирование их свойств с использованием информационных технологий [6, 7]. Среди электрофизических методов воздействия на композиционные материалы применение энергии сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных колебаний получает все большее распространение [8–11]. Это связано с тем, что в случае СВЧ-воздействия на высокоэнергетические материалы происходит объемный нагрев композита при избирательной диссипации СВЧ-энергии, которая обусловлена

различием электрофизических свойств материалов матрицы и наполнителя. При этом СВЧ-нагрев обеспечивает заданную высокую скорость и требуемую равномерность нагрева композита.

За последние годы были проведены исследования в области нетепловой модификации полимерных материалов в СВЧ-электромагнитном поле [8], разработаны СВЧ-установки для нагрева протяженных диэлектрических объектов полем поверхностного волновода [9], проведено численное моделирование и оптимизация процессов сверхвысокочастотной обработки диэлектриков [10], рассмотрены вопросы повышения равномерности нагрева диэлектриков в СВЧ-установках резонаторного типа с распределенными системами возбуждения [11].

Следует отметить, что в литературе имеется ограниченное число работ, посвященных физическим и термодинамическим моделям взаимодействия дипольных частиц в композитах с полимерным связующим. Отсутствуют данные о результатах исследования нагрева высокоэнергетических радиопоглощающих композитов различной структуры в электромагнитном поле сверхвысоких частот.

Целью данной работы является проведение математического моделирования процесса диссипации СВЧ-энергии при термообработке высокоэнергетических радиопоглощающих композитов для получения ВРК с заданными функциональными свойствами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являются модельные образцы ВРК с матрицами из ЭД-20 и Ф-4 и радиопоглощающими наполнителями из карбида кремния, а предмет исследования – электродинамические и тепловые процессы при взаимодействии СВЧ электромагнитного поля с ВРК.

Для материала матрицы использовались полимерные материалы: эпоксидная смола марки ЭД-20 [12–14] и политетрафторэтилен (фторопласт-4) [15, 16]. Выбор этих материалов обусловлен тем, что их

электрофизические и теплофизические свойства существенно отличаются (табл. 1). Это позволяет в процессе математического моделирования СВЧ-нагрева исследовать влияние связующего материала на диссипацию энергии, распределение температурного поля в композите и скорость его нагрева.

Выбор карбида кремния SiC [17, 18] в качестве наполнителя объясняется тем, что данный наполнитель обладает высокими значениями тангенса угла диэлектрических потерь $\tan\delta$ и относительной диэлектрической проницаемости ϵ' (табл. 1), что приводит к эффективной диссипации энергии при воздействии электромагнитных колебаний в диапазоне СВЧ. Кроме того, карбид кремния выдерживает высокие температуры без химического разрушения.

Основными задачами исследования являются: разработка методики математического моделирования взаимосвязанных процессов электродинамики и теплопроводности при СВЧ-нагреве ВРК; определение оптимальных геометрических

размеров радиопоглощающих наполнителей и их расположение в матрице композита; определение режима СВЧ-воздействия для достижения требуемой равномерности и скорости нагрева ВРК.

Первым этапом моделирования СВЧ-нагрева композиционных материалов в СВЧ-рабочих камерах является математическое описание процессов, происходящих в рассматриваемых образцах, которое включает систему взаимосвязанных уравнений электродинамики и теплопереноса с соответствующими граничными и начальными условиями [10]. Совместное решение указанных уравнений выполнялось с помощью метода конечных элементов, который был реализован в программе COMSOL Multiphysics® [19, 20]. Данный подход позволяет решать уравнения электродинамики и теплопереноса в трехмерной постановке и моделировать процессы СВЧ-нагрева ВРК с учетом свойств материалов матрицы и наполнителя и их изменения в процессе СВЧ-воздействия.

Таблица 1 – Физические свойства материалов матрицы и радиопоглощающего наполнителя

Table 1 – Physical Properties of Matrix Materials and Radio-Absorbing Filler

Наименование материала	Электрофизические свойства			Теплофизические свойства		
				Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость c , Дж/(кг·К)	Плотность ρ , кг/м ³
	$\tan\delta$	ϵ'	ϵ''			
Эпоксидная смола ЭД-20	0,01–0,03	3–5	0,03–0,15	0,19–0,22	723	1190–1280
Фторопласт Ф-4	0,0002–0,0003	1,9–2,2	0,00038–0,00066	0,25	1040	2150–2224
Карбид кремния SiC	0,5–1,1	7,5–12	3,75–13,2	31	670	3200

РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе математического моделирования исследовалось СВЧ-воздействие на образцы ВРК, расположенные в СВЧ-камере на базе прямоугольного волновода с поперечным сечением 45×90 мм. СВЧ-камера подключалась к СВЧ-генератору, работающему на частоте 2450 МГц. Для определения оптимальных геометрических размеров радиопоглощающих наполнителей и их расположения в матрице композита моделирование выполнялось при следующем расположении ВРК и плоского наполнителя:

- образец ВРК помещался в СВЧ-камеру волноводного типа в середине широкой стенки так, чтобы средняя плоскость ВРК находилась в зоне максимума напряженности электрического поля;
- плоский наполнитель располагался в объеме матрицы относительно векторов Пойнтинга $\mathbf{S}$ и напряженности $\mathbf{E}$ электрического поля в соответствии со схемами, приведенными на рис. 1.

Определение оптимального расположения поглощающего наполнителя в матрице

Критерием оптимальности расположения плоского слоя в матрице является достижение заданной максимальной температуры и скорости нагрева. Для решения данной задачи с помощью математического моделирования исследовано влияние расположения плоского наполнителя в объеме матрицы относительно векторов Пойнтинга $\mathbf{S}$ и напряженности электрического поля $\mathbf{E}$. Приняты следующие исходные данные для плоского поглотителя из карбида кремния: толщина поглотителя $h = 3$ мм; максимальный

коэффициент диэлектрических потерь $\epsilon'' = 13,2$ (максимум поглощения СВЧ-энергии).

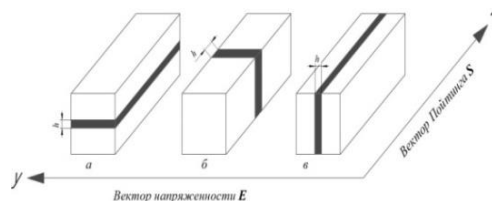


Рисунок 1 – Вид размещения плоского наполнителя в объеме матрицы: а – параллельно $\mathbf{S}$ и $\mathbf{E}$; б – перпендикулярно $\mathbf{S}$ и параллельно $\mathbf{E}$; в – параллельно $\mathbf{S}$ и перпендикулярно $\mathbf{E}$

Figure 1 – Arrangement of the flat filler within the matrix volume: a – parallel to $\mathbf{S}$ and $\mathbf{E}$; b – perpendicular to $\mathbf{S}$ and parallel to $\mathbf{E}$; c – parallel to $\mathbf{S}$ and perpendicular to $\mathbf{E}$

Рассматривалась полимерная матрица из материала фторопласт Ф-4 при минимальных значениях коэффициента диэлектрических потерь $\epsilon'' = 0,00038$. В результате расчетного моделирования установлена требуемая СВЧ-мощность $P = 300$ Вт и время воздействия $t = 60$ с, соответствующие предельным максимальным температурам фторопластовой матрицы. Результаты численного моделирования представлены в табл. 2 в виде температуры и скорости нагрева плоского наполнителя при различном расположении в объеме матрицы композита. На рис. 2–4 показаны также температурные поля в ВРК с различными вариантами расположения плоских наполнителей в соответствии с рис. 1.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИССИПАЦИИ СВЧ-ЭНЕРГИИ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ КОМПОЗИТОВ

Таблица 2 – Результаты моделирования температуры и скорости нагрева плоского наполнителя при различном расположении в объеме матрицы композита

Table 2 – Simulation results of temperature and heating rate of the flat filler with different arrangements within the composite matrix

Вид размещения плоского наполнителя в объеме матрицы	$T_{\max}$, °C	$T_{\min}$, °C	ΔT , °C	Скорость нагрева ν , °C/c
В соответствии с рис. 1, а	581	102	479	9,4
В соответствии с рис. 1, б	336	309	27	5,2
В соответствии с рис. 1, в	36	33	3	0,2

Как видно из приведенных в табл. 1 данных и температурных полей в ВРК на рис. 2–4, расположение плоского поглощающего наполнителя в матрице ВРК относительно векторов Пойнтинга $\mathbf{S}$ и напряженности электрического поля $\mathbf{E}$ существенно влияет на максимальную температуру, ее распределение в композите и скорость нагрева. Это объясняется тем, что в зависимости от расположения плоского наполнителя разные его части находятся в зоне максимума напряженности электрического поля, величина которой влияет на интенсивность нагрева. При расположении плоского наполнителя в соответствии со схемой на рис. 1, а образец композита нагревается до более высокой температуры и с большей скоростью по сравнению с другими вариантами расположения в матрице. Максимальная температура наполнителя достигает 581 °C при скорости нагрева 9,4 °C/c, но при этом разница температур в объеме поглотителя и матрицы получилась наибольшая $\Delta T = 102$ °C (рис. 2).

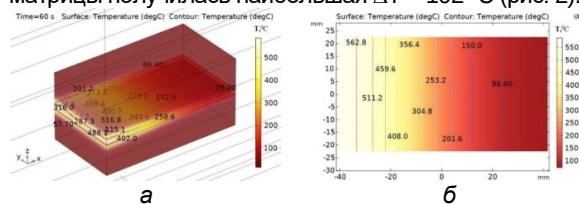


Рисунок 2 – Температурное поле в композите с плоским наполнителем (схема на рис. 1, а): а – в объеме композита; б – в сечении ух

Figure 2 – Temperature field in the composite with a flat filler (scheme in Fig. 1a): a - within the volume of the composite; b - in the yx cross-section.

При расположении плоского наполнителя по схеме, показанной на рис. 1, б, образец композита нагревается до максимальной температуры наполнителя 336 °C при скорости нагрева 5,2 °C/c, разница температур в объеме поглотителя и матрицы составляет $\Delta T = 27$ °C (рис. 3).

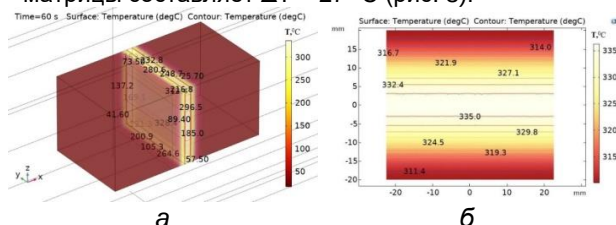


Рисунок 3 – Температурное поле в композите с плоским наполнителем (схема на рис. 1, б) а – в объеме композита; б – в сечении ух

Figure 3 – Temperature field in the composite with a flat filler (scheme in Fig. 1b): a - within the volume of the composite; b - in the yx cross-section

Для случая расположения плоского наполнителя по схеме, показанной на рис. 1, в, наблюдается минимальный нагрев образца композита при максимальной температуре наполнителя 36 °C, скорости нагрева 0,2 °C/c и разнице температур в объеме поглотителя и матрицы $\Delta T = 3$ °C (рис. 4). Низкая эффективность нагрева обусловлена тем, что большая часть плоского поглощающего наполнителя находится вне зоны максимальной напряженности электрического поля волноводной СВЧ-камеры.

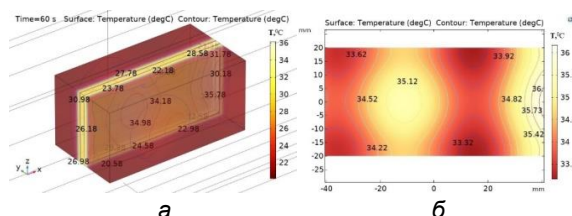


Рисунок 4 – Температурное поле в композите с плоским наполнителем (схема на рис. 1, б): а – в объеме композита; б – в сечении ух

Figure 4 – Temperature field in the composite with a flat filler (scheme in Fig. 1b): a - within the volume of the composite; b - in the yx cross-section.

По результатам моделирования установлен оптимальный вариант расположения плоского поглощающего наполнителя в матрице в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1, б.

Влияние физических свойств матрицы, толщины плоского наполнителя и СВЧ-мощности на эффективность нагрева композита. При проведении исследования влияния физических свойств матрицы и СВЧ-мощности на диссипацию СВЧ-энергии и нагрев композита использовались следующие исходные данные:

- коэффициент диэлектрических потерь ϵ'' и плотность ρ материалов матрицы фторопласта Ф-4 и эпоксидной смолы (табл. 1) изменялись от минимальных до максимальных значений;
- СВЧ-мощность воздействия на образцы композитов изменялась в диапазоне от 300 Вт до 1200 Вт, время воздействия – 60 с;
- принят оптимальный вариант расположения плоского поглощающего наполнителя в матрице в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1, б.

Результаты проведенного моделирования сведены в табл. 3 и табл. 4, в которых приведены данные о максимальных температурах нагрева поглотителя, температурах на границе раздела фаз наполнитель–матрица (Н/М) при различной СВЧ-мощности воздействия и при изменении коэффициента диэлектрических потерь ϵ'' и плотности ρ от минимальных до максимальных значений для материалов матриц из фторопласта и эпоксидной смолы. На рис. 5, 6, 7, 8 пока-

заны графики изменения температуры от времени в центральной точке композита с матрицами из фторопласта и эпоксидной смолы при различных СВЧ-мощностях. Для оценки влияния СВЧ-мощности и физических свойств материалов матрицы на распределение температуры в продольном сечении образца вдоль оси x построены соответствующие графические зависимости на рис. 9, 10, 11, 12, 13.

На основе проведенного анализа полученных результатов для образцов композитов с матрицей из фторопласта установлено следующее. При СВЧ-мощности 300 Вт за время нагрева 60 с температура поглотителя изменяется от 329 °С до 332 °С при минимальных и максимальных значениях коэффициента диэлектрических потерь и плотности соответственно (табл. 3). При мощности СВЧ-воздействия от 600 Вт и выше максимальная температура на границе раздела наполнитель–матрица равна 644 °С и выше, что превышает температуру деструкции фторопластовой матрицы. В диапазоне изменения СВЧ-мощности от 300 Вт до 1200 Вт максимальная температура поглотителя выше на 3–13 °С для ВРК с фторопластовой матрицей при максимальных значениях коэффициента диэлектрических потерь ϵ'' и плотности ρ (табл. 3).

Определена глубина нагрева фторопластовой матрицы в зависимости от СВЧ-мощности и физических свойств матрицы (рис. 9, 11). При минимальных значениях коэффициента потерь ϵ'' и плотности ρ фторопластовой матрицы в случае СВЧ-воздействия мощностью 600 Вт и 1200 Вт температура матрицы превышает 500 °С на расстоянии соответственно 0,8 мм и 2,3 мм от границы раздела фаз наполнитель–матрица. При максимальных значениях коэффициента потерь и плотности фторопластовой матрицы СВЧ-мощностей 600 Вт и 1200 Вт температура матрицы превышает 500 °С на расстоянии соответственно 0,5 мм и 2 мм от границы раздела фаз наполнитель–матрица. Таким образом, для образцов ВРК с фторопластовой матрицей изменение коэффициента диэлектрических потерь и плотности материала в рассматриваемом диапазоне от минимальных до максимальных значений существенно не влияет на распределение температуры в композите.

Для образцов композитов с матрицей из эпоксидной смолы установлено, что при СВЧ-мощности 300 Вт за время 60 с температура изменяется от 384 °С до 197 °С (табл. 3) при

минимальных и максимальных значениях коэффициента диэлектрических потерь и плотности соответственно. При мощности СВЧ-воздействия от 600 Вт и выше максимальная температура на границе раздела наполнитель–матрица составляет от 381 °С до 756 °С, что превышает температуру деструкции матрицы из эпоксидной смолы. Определена глубина нагрева матрицы из эпоксидной смолы (рис. 10, 12). При минимальных значениях коэффициента потерь и плотности материала матрицы из эпоксидной смолы в случае СВЧ-воздействия мощностью 600 Вт и 1200 Вт температура матрицы превышает 500 °С на расстоянии соответственно 1,5 мм и 3,5 мм от границы раздела фаз наполнитель–матрица. При максимальных значениях коэффициента потерь и плотности матрицы при СВЧ-мощностях 900 Вт и 1200 Вт температура матрицы превышает 500 °С на расстоянии соответственно 0,5 мм и 1,4 мм от границы раздела фаз наполнитель–матрица.

Следовательно, для образцов ВРК с матрицей из эпоксидной смолы изменение коэффициента диэлектрических потерь и плотности материала в рассматриваемом диапазоне от минимальных до максимальных значений сильно влияет на распределение температуры в композите. Это объясняется тем, что при максимальном коэффициенте потерь в эпоксидной смоле $\epsilon''=0,15$ происходит существенное перераспределение поглощения СВЧ-энергии в композите, часть СВЧ-энергии поглощается в матрице, в наполнителе выделяется меньше тепловой энергии, поэтому его температура уменьшается (рис. 13). В этой связи для концентрации СВЧ-энергии в поглотителе рекомендуется применять матрицы с минимальными диэлектрическими потерями.

Проведено моделирование нагрева ВРК с целью определения оптимальной толщины плоского поглощающего наполнителя из карбида кремния при максимальном коэффициенте потерь $\epsilon''=13,2$. Наполнитель располагался в соответствии со схемой рис. 1, б в матрице из эпоксидной смолы с коэффициентом потерь $\epsilon''=0,15$. Толщина наполнителя варьировалась в пределах от 1 до 10 мм. СВЧ-мощность составляла 600 Вт, время воздействия – 60 с. В табл. 5 приведены результаты моделирования. Установлено, что при толщине плоского наполнителя от 1 до 4 мм наблюдаются высокие показатели диссипации СВЧ-энергии, при которых температура нагрева наполнителя превышает 600 °С при высокой скорости нагрева – 10–17 °С/с (табл. 5).

Таблица 3 – Влияние физических свойств фторопластовой матрицы и СВЧ-мощности на максимальную температуру и скорость нагрева композита

Table 3 – Influence of the physical properties of the fluoroplastic matrix and microwave power on the maximum temperature and heating rate of the composite

СВЧ-мощность P , Вт	При минимальных значениях коэффициента потерь ϵ'' и плотности ρ			При максимальных значениях коэффициента потерь ϵ'' и плотности ρ		
	$T_{\max}$ в объеме поглотителя, °С	$T_{\max}$ на границе Н/М, °С	Скорость нагрева v , °С/с	$T_{\max}$ в объеме поглотителя, °С	$T_{\max}$ на границе Н/М, °С	Скорость нагрева v , °С/с
300	329	28	5,2	332	331	5,2
600	645	644	10,4	651	650	10,5
900	985	963	15,8	974	972	15,9
1200	1282	1280	21,0	1295	1292	21,3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИССИПАЦИИ СВЧ-ЭНЕРГИИ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ КОМПОЗИТОВ

Таблица 4 – Влияние физических свойств эпоксидной матрицы и СВЧ-мощности на максимальную температуру и скорость нагрева композита

Table 4 – Influence of the physical properties of the epoxy matrix and microwave power on the maximum temperature and heating rate of the composite

СВЧ-мощность P , Вт	При минимальных значениях коэффициента потерь ϵ'' и плотности ρ			при максимальных значениях коэффициента потерь ϵ'' и плотности ρ		
	$T_{\max}$ в объеме поглотителя, °C	$T_{\max}$ на границе Н/М, °C	Скорость нагрева v , °C/c	$T_{\max}$ в объеме поглотителя °C	$T_{\max}$ на границе Н/М, °C	Скорость нагрева v , °C/c
300	384	382	6,1	197	197	3,0
600	756	755	12,3	381	381	6,0
900	1131	1129	18,5	745	745	12,1
1200	1503	1502	24,7	749	749	12,1

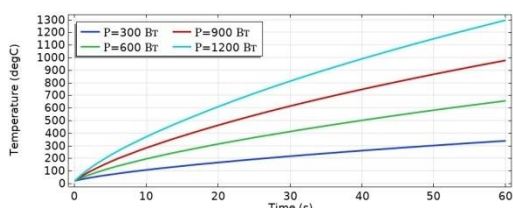


Рисунок 5 – Зависимость температуры от времени в центральной точке композита с матрицей из фторопласта при минимальных значениях ϵ'' и ρ
Figure 5 – Dependence of temperature on time at the central point of the composite with a fluoroplastic matrix at minimum values of ϵ'' and ρ

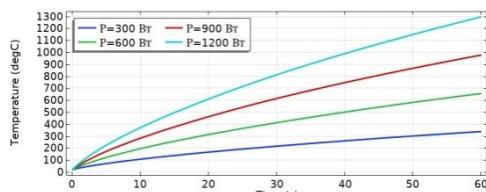


Рисунок 6 – Зависимость температуры от времени в центральной точке композита с матрицей из фторопласта при максимальных значениях ϵ'' и ρ
Figure 6 – Dependence of temperature on time at the central point of the composite with a fluoroplastic matrix at maximum values of ϵ'' and ρ

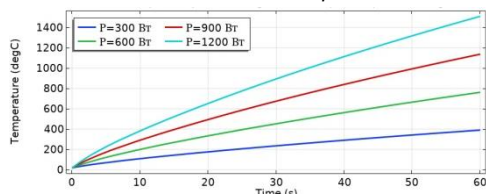


Рисунок 7 – Зависимость температуры от времени в центральной точке композита с матрицей из эпоксидной смолы при минимальных значениях ϵ'' и ρ
Figure 7 – Dependence of temperature on time at the central point of the composite with an epoxy resin matrix at minimum values of ϵ'' and ρ

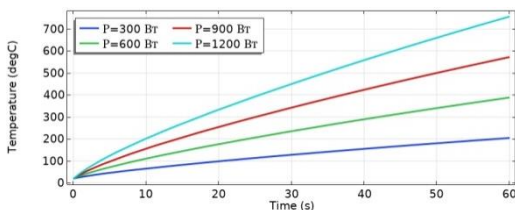


Рисунок 8 – Зависимость температуры от времени в центральной точке композита с матрицей из эпоксидной смолы при максимальных значениях ϵ'' и ρ
Figure 8 – Dependence of temperature on time at the central point of the composite with an epoxy resin matrix at maximum values of ϵ'' and ρ

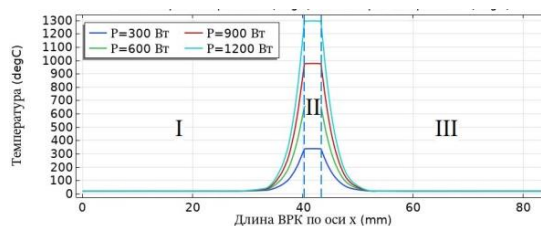


Рисунок 9 – Влияние СВЧ-мощности на распределение температуры в сечении образца вдоль оси x (для матрицы из фторопласта при минимальных значениях ϵ'' и ρ), где области I, III – матрицы; II – наполнитель

Figure 9 – Influence of microwave power on the temperature distribution in the cross-section of the sample along the x -axis (for a fluoroplastic matrix at minimum values of ϵ'' and ρ), where regions I and III represent the matrix and region II represents the filler

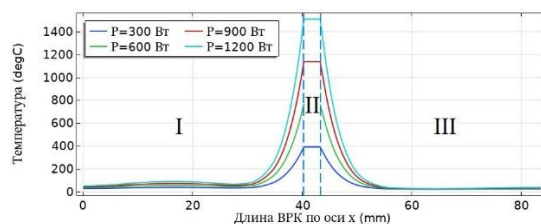


Рисунок 10 – Влияние СВЧ-мощности на распределение температуры в сечении образца вдоль оси x (для матрицы из эпоксидной смолы при минимальных значениях ϵ'' и ρ), где области I, III – матрицы; II – наполнитель

Figure 10 – Influence of microwave power on the temperature distribution in the cross-section of the sample along the x -axis (for an epoxy resin matrix at minimum values of ϵ'' and ρ), where regions I and III represent the matrix and region II represents the filler

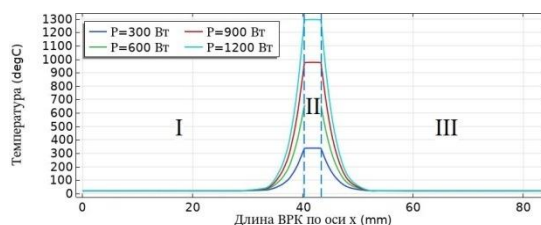


Рисунок 11 – Влияние СВЧ-мощности на распределение температуры в сечении образца вдоль оси x (для матрицы из фторопласта при максимальных значениях ϵ'' и ρ), где области I, III – матрицы; II – наполнитель

Figure 11 – Influence of microwave power on the temperature distribution in the cross-section of the sample along the x -axis (for a fluoroplastic matrix at maximum values of ϵ'' and ρ), where regions I and III represent the matrix and region II represents the filler

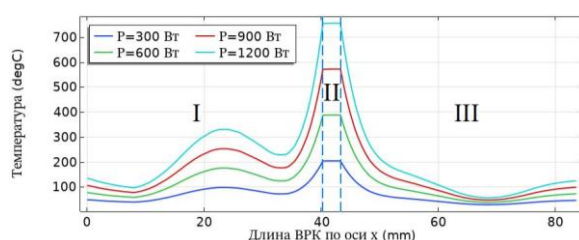


Рисунок 12 – Влияние СВЧ-мощности на распределение температуры в сечении образца вдоль оси x (для матрицы из эпоксидной смолы при максимальных значениях ε'' и ρ), где области I, III – матрицы; II – наполнитель

Figure 12 – Influence of microwave power on the temperature distribution in the cross-section of the sample along the x-axis (for an epoxy resin matrix at maximum values of ε'' and ρ), where regions I and III represent the matrix and region II represents the filler

ВЫВОДЫ

Разработана методика математического моделирования нагрева высокоэнергетических радиопоглощающих композитов при воздействии СВЧ-энергии. Данный подход с использованием программной среды COMSOL Multiphysics позволяет решать систему уравнений электродинамики и теплопереноса в трехмерной постановке и моделировать процессы СВЧ-нагрева композитов с учетом изменения свойств материалов матрицы и наполнителя при СВЧ-воздействии.

В результате исследования процесса диссипации на основе проведенного математического моделирования определены оптимальные геометрические размеры радиопоглощающих наполнителей из карбида кремния и их расположение в матрице из фторопласта Ф-4 и эпоксидной смолы ЭД-20.

Таблица 5 – Влияние толщины плоского наполнителя на максимальную температуру и скорость нагрева
Table 5 – Influence of the flat filler thickness on the maximum temperature and heating rate

Толщина слоя наполнителя, мм	Объем наполнителя от общего объема образца, %	$T_{\max}$ в слое наполнителя, °C	Скорость нагрева наполнителя ν , °C/c
1	1,2	1055	17
2	2,4	951	16
3	3,6	754	12
4	4,8	599	10
6	7,1	406	9
8	9,5	319	5
10	11,9	288	4

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00796, <https://rscf.ru/project/24-29-00796/>».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Vedernikov, Yu.N., Fedotov, S.A., Smirnov, A.V., Avatinyan, G.A. & Parshikov, Yu.G. (2021). Synthesis of high-energy materials modified with nano-sized carbon and study of their sensitivity to laser radiation. Russian Chemical Journal. (3), 25-32. (In Russ.). doi: 10.6060/rcj.2021653.3.
2. Nikitin, S.A., Vinokurova, R.I. (2018). High-energy materials in technology and national economy. Scientific progress - creativity of young people. (1), 160-163. (In Russ.).
3. Gundawar, M.K. High-energy materials application. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. 2020. C. 401-419. doi:10.1016/b978-0-12-818829-3.00018-6.
4. Czajka, B., Salaciński, T., Wachowski, L. & Maran-

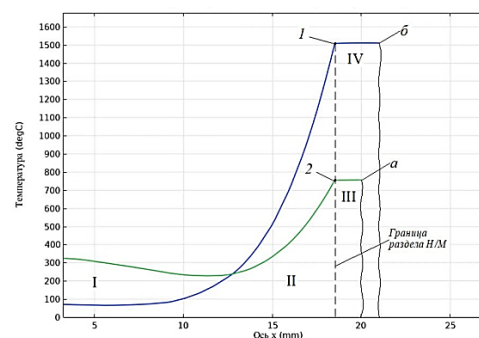


Рисунок 13 – Сравнение распределения температуры в объеме композитас матрицей ЭД-20 при максимальных значениях коэффициента потерь ε'' и плотности ρ (график а) и минимальны значениях (график б), где области поглощения СВЧ-энергии: I, II – в матрице для (а) и (б) соответственно; III, IV – в наполнителе для (а) и (б) соответственно; 1, 2 – максимальные температуры на границах раздела фаз Н/М для (а) и (б) соответственно

Figure 13 – Comparison of temperature distribution in the volume of the composite with an ED-20 matrix at maximum values of loss factor ε'' and density ρ (graph a) and at minimum values (graph b), where regions of microwave energy absorption are as follows: I, II – in the matrix for (a) and (b) respectively; III, IV – in the filler for (a) and (b) respectively; 1, 2 – maximum temperatures at the phase boundary N/M for (a) and (b) respectively

Установлено, что для ВРК с матрицей из эпоксидной смолы с плоским наполнителем из карбида кремния толщиной 1–4 мм, расположенным в волноводной СВЧ-камере перпендикулярно вектору Пойнтинга и параллельно вектору напряженности электрического поля, при СВЧ-мощности 600 Вт и времени воздействия 60 с достигается требуемая скорость нагрева 10–17 °C/c и заданная равномерность температурного поля в наполнителе не выше 30 °C.

da, A. (2020). High energy materials (HEMs) – innovations with regard to the environment Materiały Wysokoenergetyczne. High Energy Materials. 75-89. doi: 10.22211/mat-wys/0145E.

5. Ma, Y., Wang, Q., Schweidler, S., Botros, M., Fu, T., Breitung, B. & Horst, H. (2021). High-entropy energy materials: challenges and new opportunities. Energy & Environmental Science, 14(5), 2883-2905. doi:10.1039/d1ee00505g.
6. Komarova, M.V., Vakutin, A.G. & Vorozhtsov, A.B. (2016). Study of the properties of high-energy materials with iron oxalate and formate. Polzunovsky Bulletin. (4-1), 17-21. (In Russ.).
7. Perederin, Yu.V. (2013). Prediction of properties of high-energy composites using information technologies. Extended abstract of candidate's thesis. Biysk. (In Russ.).
8. Kalganova, S.G. (2009). Electrotechnology of non-thermal modification of polymer materials in a microwave electromagnetic field. Extended abstract of Doctor's thesis. Saratov. (In Russ.).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИССИПАЦИИ СВЧ-ЭНЕРГИИ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ КОМПОЗИТОВ

9. Ritter, D.V. (2010). Microwave heating of extended dielectric objects by the field of a surface waveguide. Extended abstract of candidate's thesis. Omsk. (In Russ.).
10. Trigorly, S.V. (2000). Numerical modeling and optimization of processes of ultra-high-frequency heat treatment of dielectrics. Applied mechanics and technical physics. ((1) 239). 112-119. (In Russ.).
11. Rybkov, V.S. (2008). Increasing the uniformity of heating of dielectrics in microwave resonator-type installations with distributed excitation systems. Extended abstract of candidate's thesis. Saratov. (In Russ.).
12. Bardin, A.N., Gorbunova, I.Yu., Polunin, S.V., Kovalevich, V.V. & Morozova, P.A. (2021). Study of the thermophysical, rheological and physicomachanical properties of an epoxy binder modified with polycarbonate. Advances in chemistry and chemical technology. (7), 7-9. (In Russ.).
13. Irzhak, V.I. (2021). Epoxy polymers and nanocomposites. Chernogolovka: "Editorial and Publishing Department of the IPCP RAS". (In Russ.).
14. Shved, E.N., Sinelnikova, M.A. & Bepalko, Yu.N. (2011). Epoxy compositions of "cold" anhydride curing based on ED-20. Plastics. (10), 8-10. (In Russ.).
15. Baskin, Z.L., Shabalin, D.A., Vyrasheikin, E.S. & Dedov, S.A. (2008). Range, properties and application of fluoropolymers of the Kirovo-Chepetsk Chemical Plant. Russian Chemical Journal. (3), 13-23. (In Russ.).
16. Syty, Yu.V., Chursova, L.V., Khatipov, S.A. & Sagononova, V.A. (2012). Properties and application of radiation-modified fluoroplastic F-4RM. Aviation materials and technologies. (4), 48-55. (In Russ.).
17. Shelestova, V.A., Evseeva, L.E., Leshchenko, V.G., Nikolaeva, K.V., Danilova-Tretyak, S.M., Bashlakova, A.L. & Ivanov, L.F. (2021). Influence of ultrafine silicon carbide on the structure and properties of fluoroplastic composites. Polymer materials and technologies. (2), 80-88. (In Russ.).
18. Starokadomsky, D.L. (2019). Possibility of creating fire-resistant, heat-strengthened and thermoplasticized at 250°C epoxy-composite plastics with microdispersions of SiC, TiN and cement. Plastics. (5), 40-43. (In Russ.).
19. Bekeshev, A., Vasinkina, E., Kalganova, S., Trigorly, S., Kadykova, Y., Mostovoy, A., Shcherbakov, A., Zhan-turina, N. & Lopukhova, M. (2023). Modeling of the Modification Process of an Epoxy Basalt-Filled Oligomer in Traveling Wave Microwave Chambers. Journal of Composites Science, 7(9), 392. DOI: 10.3390/jcs7090392.

20. Trigorly, S., Yakovlev, A., Kalganova, S., Sivak, A., & Kadykova, Y. (2022). Mathematical Simulation of Electrodinamic and Thermal Processes in Electrical Process Plants. Lecture Notes in Mechanical Engineeringthis, 131-141. DOI: 10.1007/978-981-16-9376-2_13.

Информация об авторах

А. С. Сивак – к.т.н., старший научный сотрудник АО «НПП «Контакт».

С. Г. Калганова – д.т.н., начальник научно-исследовательской лаборатории АО «НПП «Контакт».

Ю. А. Кадькова – д.т.н., главный научный сотрудник АО «НПП «Контакт».

С. В. Тригорлый – к.т.н., ведущий научный сотрудник АО «НПП «Контакт».

Т. П. Сивак – младший научный сотрудник АО «НПП «Контакт».

Е. Ю. Васинкина – к.т.н., ведущий научный сотрудник АО «НПП «Контакт».

Information about the authors

A.S. Sivak - Ph.D., leading scientific employee of JSC «SPE «Kontakt».

S.G. Kalganova - Doctor of Technical Sciences, Head of the research laboratory of JSC «SPE «Kontakt».

Yu.A. Kadykova - Doctor of Technical Sciences, chief scientific employee of JSC «SPE «Kontakt».

S.V. Trigorly - Ph.D., leading scientific employee of JSC «SPE «Kontakt».

T.P. Sivak - is a junior researcher at JSC «SPE «Kontakt».

E.Yu. Vasinkina - Ph.D., leading scientific employee of JSC «SPE «Kontakt».

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.