

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 629.782

Расчетно-теоретическое определение диэлектрической проницаемости полимерных композиционных материалов методом многомасштабного моделирования. Часть 2. Углепластик

П.В. Просунцов, П.В. Польский

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Theoretical and numerical determination of the polymer composite material permeability by the multiscale simulation approach. Part 2. GFRP

P.V. Prosuntsov, P.V. Polskiy

Bauman Moscow State Technical University

Сформулированы этапы гомогенизации полимерного композиционного материала на основе углеродного волокна и эпоксидного связующего с использованием многомасштабного моделирования. Разработана математическая модель переноса электромагнитного излучения в полимерном композиционном материале, армированном углеродным волокном, которая позволяет анализировать влияние параметров углеродного волокна на напряженность электрического поля по мере прохождения электромагнитной волны через образец. Дана постановка обратной задачи по определению гомогенных электрофизических характеристик материала. Предложена математическая модель прохождения электромагнитного излучения через представительный элемент объема нити и многослойного пакета углепластика. На основе решения обратной задачи определены гомогенные электрофизические характеристики представительного элемента объема нити и многослойного пакета углепластика. Проведена валидация модели углепластика путем сравнения расчетных значений диэлектрической проницаемости с экспериментальными данными. Установлено, что различие характеристик не превышает 6 %.

EDN: CHKRVB, <https://elibrary/chkrvb>

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, гомогенные электрофизические характеристики, диэлектрические характеристики, представительный элемент объема, многомасштабное моделирование, электромагнитное излучение

The paper formulates homogenization stages of a polymer composite material based on the fiberglass and epoxy binder using the multiscale simulation. It develops a mathematical model of the electromagnetic radiation transfer in the polymer composite material strengthened by the fiberglass making it possible to analyze the fiberglass parameters influence on the electric field strength, as the electromagnetic wave passes through the sample. The paper provides the inverse problem statement to determine the material homogeneous electrophysical characteristics. It proposes a computation model of the electromagnetic radiation passing through the thread volume representative element and the multilayer fiberglass package. Solving the inverse problem makes it possible to determine homogeneous electrophysical characteristics of the thread volume representative element and of the multilayer fiberglass package. The fiberglass model is validated by comparing the dielectric permeability computed values with the experimental data, and the difference in characteristics is not exceeding 6 %).

EDN: CHKRVB, <https://elibrary/chkrvb>

Keywords: polymer composite material, fiberglass homogeneous characteristics, dielectric characteristics, representative volume element, multiscale simulation, electromagnetic radiation

Применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе углеродного волокна в автомобилестроении и аэрокосмической промышленности обусловлено их высокими удельными прочностными и жесткостными характеристиками, а также коррозионной стойкостью [1, 2].

Последние два десятилетия мировой спрос на углеродные волокна быстро растет [3]. В автомобильной промышленности на долю углепластиков приходится 17 % массы машины, при этом применение углепластиков позволяет снизить ее массу на 30 % [4, 5].

До 50 % общей массы элементов самолетов составляют детали из углепластика [6, 7], применяемого для изготовления рефлекторов зеркальных космических антенн, сетчатых конструкций ракетной техники и таких нагруженных несущих конструкций летательных аппаратов, как панели крыла, фюзеляж и обшивка сэндвич-панелей [8].

По данным фирмы Boeing, ПКМ из углеродного волокна составляют только около 3 % общей массы самолета Boeing 767 [9], но в будущем доля углепластиков в самолетах фирмы превысит 50 % [10].

На сегодняшний день использование углепластика ограничено большой стоимостью изготовленных из него изделий. Снизить стоимость производства деталей из ПКМ можно путем перехода на новые принципы термообработки заготовок, например, микроволновое отверждение.

Для выбора технологических параметров отверждения необходимы точные модели протекающих в ПКМ теплофизических и электромаг-

нитных процессов. При моделировании ПКМ рассматривают, как правило, в качестве гомогенного материала с анизотропными характеристиками. Однако определение электрофизических характеристик ПКМ и прежде всего диэлектрической проницаемости, тесно связанной с его структурой [11], является достаточно сложной задачей.

Для выявления электрофизических характеристик материала применяют два основных подхода. Первый основан на экспериментальном исследовании и связан со значительными временными и финансовыми затратами, второй — на компьютерном моделировании электромагнитных процессов, протекающих в образце при прохождении микроволнового излучения. Однако он требует построения точных физических и математических моделей процессов, происходящих в материале с учетом его микроструктуры и характеристик отдельных компонент [12].

Цель исследования — разработка методики определения электрофизических характеристик углепластика.

Алгоритм гомогенизации характеристик углепластика включает в себя три этапа:

1) нахождение гомогенных электрофизических характеристик представительного элемента объема (ПЭО) нити, в качестве которого выступает набор филаментов, окруженных связующим;

2) усреднение характеристик слоя ткани, где каждая из пропитанных нитей представляется однородным материалом со свойствами из п. 1;

3) определение гомогенных характеристик материала на макроуровне и их валидация пу-

тем сравнения с характеристиками углепластика, полученными экспериментальным путем.

Гомогенизация характеристик углепластика. Основными электрофизическими характеристиками углепластика, описывающими взаимодействие материала с электромагнитным полем, являются удельная проводимость, диэлектрическая и магнитная проницаемость. Углепластик немагнитен, и его магнитная проницаемость равна таковой для свободного пространства $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м). Поэтому наибольший интерес представляют электропроводность и диэлектрическая проницаемость углепластика.

Диэлектрические характеристики материала можно охарактеризовать комплексной диэлектрической проницаемостью

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'',$$

где ε' и ε'' — действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости среды; i — мнимая единица.

Диэлектрические характеристики материала зависят от частоты излучения, проходящего через исследуемый образец. В отечественных публикациях приведено достаточно мало информации о диэлектрических характеристиках углепластиков и их компонентов для применяемой в промышленности частоты микроволнового излучения 2,45 ГГц. При этом зарубежные исследователи указывают эти характеристики для частот X-диапазона (8...12 ГГц), поэтому для верификации предлагаемой методики определения гомогенных электрофизических характеристик углепластика сравнение характеристик выполнено для частоты 10 ГГц.

Электрофизические характеристики компонент углепластика приведены в табл. 1. В качестве матрицы ПКМ рассмотрено эпоксидное связующее.

Так как вдоль филаментов углеволокна характер распространения микроволнового излучения почти неизменен, в качестве ПЭО для однонаправленных углепластиков применена двумерная модель сечения пучка филаментов

диаметром 7 мкм вместе с окружающим его объемом связующего.

Вектор напряженности электрического поля (НЭП) перпендикулярен волновому вектору и направлен перпендикулярно плоскости ПЭО. Проходя через слой эпоксидного связующего, электромагнитная волна нормально падает на границу волокна и преодолевает ее без отражения. Для описания распространения НЭП применяют следующие уравнения Максвелла:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{j}; \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho; \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad (4)$$

где \mathbf{E} — вектор НЭП, В/м; \mathbf{B} — вектор магнитной индукции, Тл; t — время; \mathbf{H} — вектор напряженности магнитного поля, А/м; \mathbf{D} — вектор электрической индукции, Кл/м²; \mathbf{j} — плотность электрического тока, А/м²; ρ — объемная плотность электрического заряда, Кл/м³.

Для замыкания решения уравнений Максвелла необходимо использовать дополнительные соотношения. В общем случае объемная плотность электрического заряда ρ и плотность электрического тока \mathbf{j} зависят от радиус-вектора \mathbf{r} и времени t . Функции $\rho(\mathbf{r}, t)$ и $\mathbf{j}(\mathbf{r}, t)$ связаны уравнением непрерывности

$$\operatorname{div}(\mathbf{j}) = -\frac{\partial \rho}{\partial t}.$$

Векторы \mathbf{E} , \mathbf{B} , \mathbf{H} , \mathbf{D} также связаны соотношениями, называемыми материальными уравнениями. Для получения материальных уравнений необходимо рассмотреть процессы, происходящие в материале при поглощении электромагнитной волны. При ее прохождении в диэлектрическом материале происходит переориентация атомов и молекул вещества относительно их начального положения. Это обусловлено наличием положительного заряда ядра атома и отрицательного заряда электро-

Таблица 1

Электрофизические характеристики компонент углепластика

Вид материала	Часть комплексной диэлектрической проницаемости среды		Электропроводность, См/м
	действительная	мнимая	
Углеволокно	18,7 [14]	59,3 [14]	38 300 [16]
Полимерное связующее	2,9 [15]	0,1 [15]	0 [15]

нов, которые способны смещаться под действием переменного электрического поля. Заряженные частицы начинают приобретать дипольный момент, который характеризуется вектором поляризации вещества \mathbf{P} [17].

Для относительно медленного процесса изменения внешних полей можно принять, что вектор поляризации вещества линейно связан с вектором НЭП следующим образом:

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi \mathbf{E}, \text{ Кл/м}^2, \quad (5)$$

где ε_0 — электрическая постоянная, Ф/м; χ — диэлектрическая восприимчивость вещества.

Величина χ в уравнении (5) характеризует способность вещества поляризоваться под действием внешних электромагнитных полей. Она зависит от многих факторов: структуры вещества, химического состава, концентрации молекул и т. п. Однако если учесть, что среда имеет однородную структуру и ее состав не изменяется, то диэлектрическая восприимчивость вещества χ принимает постоянное значение.

Векторы поляризации вещества и электрической индукции связаны соотношением

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \varepsilon_0 \chi \mathbf{E} = \varepsilon_0 \mathbf{E} (1 + \chi) = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}, \quad (6)$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Выражение (6) является одним из материальных уравнений для электрических полей. Для получения материального уравнения магнитных полей применяют похожую процедуру. Аналогично дипольному моменту под действием переменного магнитного поля атомы и молекулы диэлектрика приобретают магнитный момент, который характеризуется вектором намагниченности вещества \mathbf{M} .

Векторы намагниченности вещества и напряженности магнитного поля связаны линейным соотношением (при этом изменение электромагнитного поля также принято относительно медленным во времени процессом)

$$\mathbf{M} = \zeta \mathbf{H}, \text{ А/м},$$

где ζ — магнитная восприимчивость вещества.

Вектор магнитной индукции связан с векторами напряженности магнитного поля и намагниченности вещества выражением

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0 (1 + \zeta) \mathbf{H} = \mu_0 \mu \mathbf{H}, \quad (7)$$

где μ — относительная магнитная проницаемость среды.

Выражение (7) представляет собой второе материальное уравнение. Используя уравнения Максвелла (1)–(4) и материальные уравнения (6) и (7), можно вычислить распределение напряженностей электрических и магнитных полей в диэлектрическом материале, например, в эпоксидном связующем. Однако углеволокно отличается от приведенных волокон способностью проводить электрический ток.

Чтобы учесть эту способность, необходимо ввести дополнительное выражение для плотности электрического тока, которое бы выражало зависимость данного параметра от НЭП. Соответствующее выражение, представляющее собой закон Ома в дифференциальной форме, имеет вид

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E},$$

где σ — удельная проводимость вещества, См/м.

Гомогенизация характеристик ПЭО нити. Для расчетно-теоретического определения электрофизических характеристик ПЭО углепластика требуется информация о количестве филаментов в нити или объемной доле волокна в связующем. За основу наполнителя выбрана углеткань Т300, достаточно широко применяемая в промышленности. Данные о ней приведены в работе [15].

С помощью программного комплекса Digimat построена геометрическая модель ПЭО с объемной долей углеродных филаментов в нити, равной 37 %. Для более корректного определения гомогенных электрофизических характеристик расчет проведен для трех различных толщин ПЭО d : 125, 250 и 375 мкм. Модель ПЭО нити размером 125×1700 мкм, филаменты в котором распределены в объеме хаотично, приведена на рис. 1.

Распространение микроволнового излучения в ПЭО нити можно оценивать по изменению амплитуды НЭП. Для корректного анализа изменения НЭП по толщине ПЭО его размер в направлении падающей планарной волны должен быть больше ее длины, поэтому при частоте излучения 10 ГГц достаточно использовать ПЭО высотой 30 мм. Для корректного задания граничных условий ширина ПЭО должна составлять не менее половины длины волны, поэтому ширина ПЭО выбрана равной 17 мм.

В расчетной модели, приведенной на рис. 2 (ПЭО для большей наглядности повернут в го-

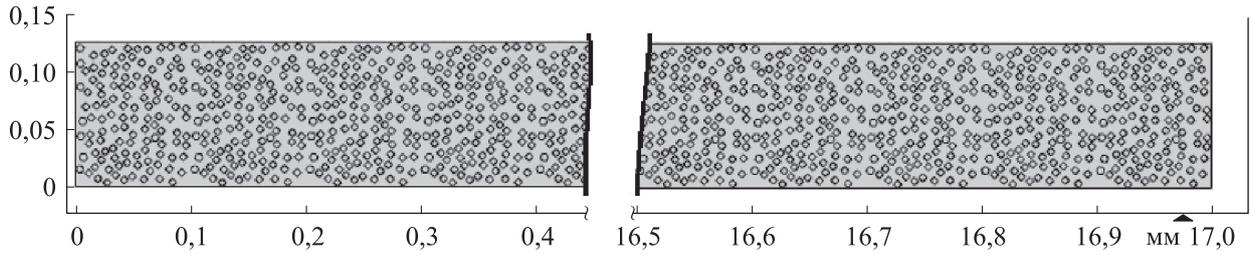


Рис. 1. Модель ПЭО нити углепластика, мм

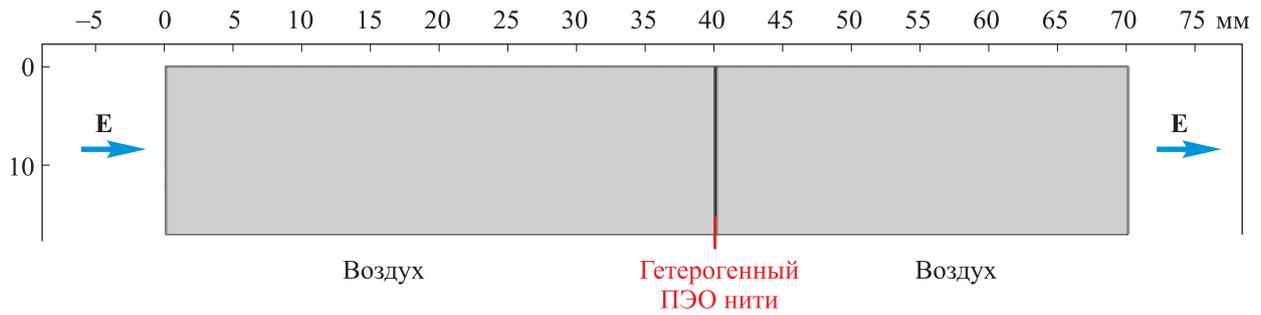


Рис. 2. Расчетная модель ПЭО нити

ризонгальное положение), до и после ПЭО нити добавлен объем воздушного пространства высотой 40 и 30 мм соответственно, что позволяет оценить влияние ПЭО на НЭП. Мощность излучения составляла 1 Вт/м.

Моделирование распределения НЭП падающей планарной волны проведено в программной среде COMSOL Multiphysics с использованием метода конечных элементов. Фрагмент конечно-элементной модели ПЭО ПКМ показан на рис. 3.

Полученное в результате моделирования изменение НЭП при прохождении электромагнитного излучения через гетерогенный ПЭО нити толщиной $d = 125, 250$ и 375 мкм показано

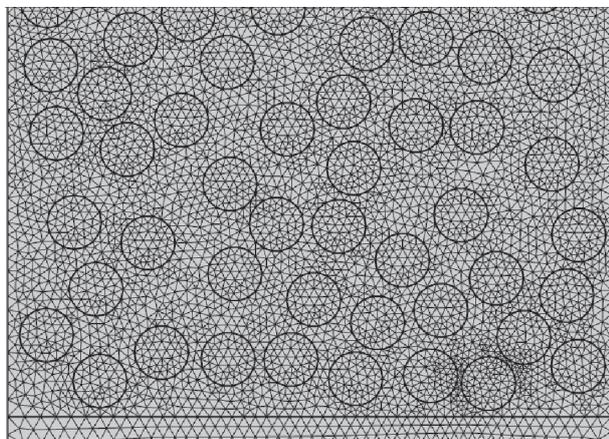


Рис. 3. Фрагмент конечно-элементной модели ПЭО ПКМ

на рис. 4, где X — координата вдоль ПЭО. Видно, что для диэлектрических материалов характерно значительное падение НЭП после прохождения через ПЭО.

Для нахождения гомогенной диэлектрической проницаемости ПЭО нити использован подход, основанный на решении обратной за-

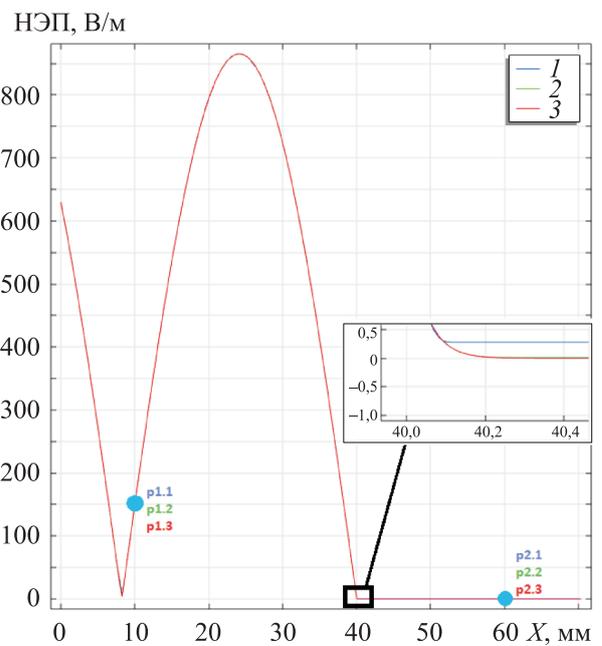


Рис. 4. Изменение НЭП при прохождении электромагнитного излучения через гетерогенный ПЭО нити толщиной $d = 125$ (1), 250 (2) и 375 мкм (3)

Таблица 2

Координаты контрольных точек и значения НЭП в них

Наименование точки	Координата вдоль ПЭО X, мм	НЭП, В/м	Толщина ПЭО d, мкм
p1.1	10	149,140000	125
p2.1	60	0,279000	
p1.2	10	149,160000	250
p2.2	60	0,0146000	
p1.3	10	149,160000	375
p2.3	60	0,000766	

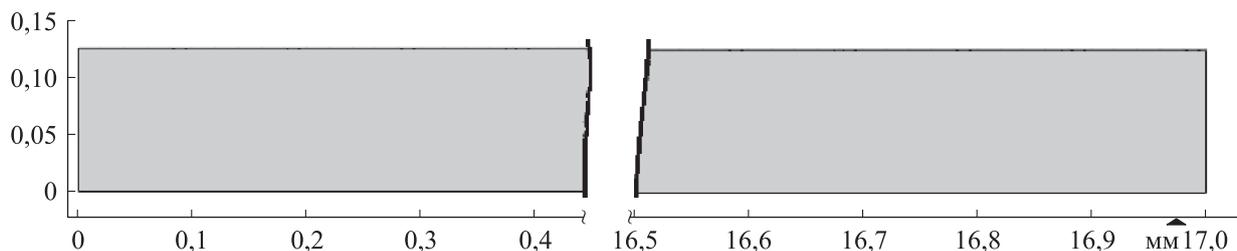


Рис. 5. Расчетная модель гомогенного ПЭО нити

дачи. Согласно этому подходу, на первом этапе определены значения НЭП в двух точках для каждого расчетного случая, расположенных вне ПЭО. Координаты точек, а также значения НЭП в них приведены в табл. 2.

В расчетной модели гомогенного ПЭО нить представляет собой однородный материал (рис. 5).

При решении обратной задачи проведена минимизация суммы квадратов разности значений НЭП в расчетной модели гомогенного ПЭО нити и значений, полученных по гетерогенной модели (см. табл. 2):

$$S(\epsilon', \epsilon'') = \sum_{i=1}^6 (E_{Hi} - E_{Di})^2 = \min,$$

где E_{Di} — значение НЭП в i -й контрольной точке, приведенное в табл. 2, В/м; E_{Hi} — значение НЭП в i -й контрольной точке, полученное с использованием модели гомогенного ПЭО нити, В/м.

Искомыми параметрами при решении обратной задачи являются действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости среды, которые можно определить из уравнения Гельмгольца [16]:

$$\epsilon' - i\epsilon'' = \frac{\nabla^2 \mathbf{H}}{\epsilon_0 \mu \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2}};$$

$$\epsilon'(1 - i \operatorname{tg} \delta) = \frac{\nabla^2 \mathbf{E}}{\epsilon_0 \mu \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}},$$

где $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь.

При решении обратной задачи для минимизации функционала невязки использован метод Нелдера — Мида.

В результате получены гомогенные электрофизические характеристики ПЭО нити углепластика, приведенные в табл. 3. Изменение НЭП при прохождении электромагнитного излучения через гетеро- и гомогенный ПЭО нити показано на рис. 6. Видно, что характер распределения НЭП падающей планарной волны для материала ПЭО нити с гомогенными характеристиками в полной мере соответствуют анало-

Таблица 3

Расчетно-теоретические электрофизические характеристики ПЭО нити гомогенного углепластика

Параметр	Значение
Действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости среды	81,176
Мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости среды	55,912
Электропроводность, См/м	214

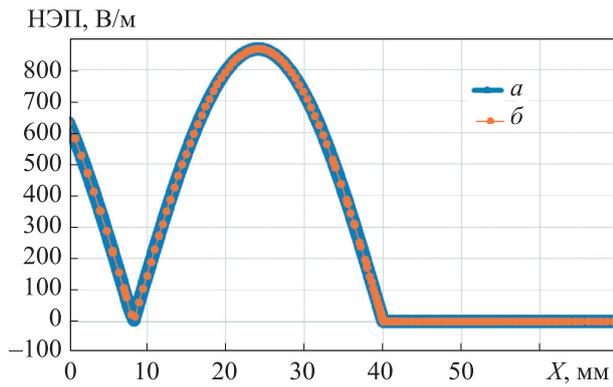


Рис. 6. Изменение НЭП при прохождении электромагнитного излучения через гетеро- (а) и гомогенный (б) ПЭО нити

гичному распределению для гетерогенного материала.

Гомогенизация характеристик многослойного углепластика. При определении гомогенных электрофизических характеристик многослойного углепластика необходимо учитывать наличие полимерного связующего между слоями ткани и его влияние на характер распространения НЭП.

С помощью программного комплекса Digimat построена геометрическая модель ПЭО многослойного углепластика на основе ткани Т300 с продольным размером 44×44 мм при ширине нити утка 22 мм и толщине 0,1 мм с укладкой слоев по схеме $[+45^\circ, -45^\circ]$ (рис. 7).

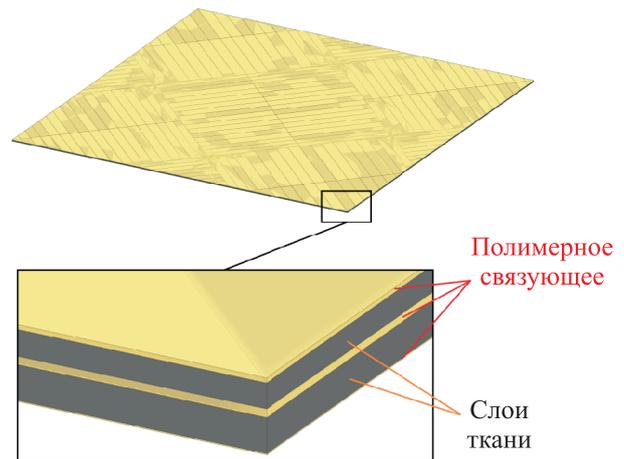


Рис. 7. Геометрическая модель ПЭО многослойного углепластика на основе ткани Т300

Ввиду чрезвычайно малой толщины слоя по сравнению с его длиной использована двумерная постановка задачи, при которой каждый слой ткани и связующего представлял собой прямоугольник со средней для соответствующего слоя толщиной (рис. 8). Для повышения точности определения гомогенных характеристик расчет проведен при разном количестве слоев пропитанной углеродной ткани. Для пяти слоев толщина ПЭО углепластика составила 0,60 мм, для шести — 0,72 мм, для семи — 0,84 мм. Также добавлены объемы воздушного пространства с каждой из сторон пакета.

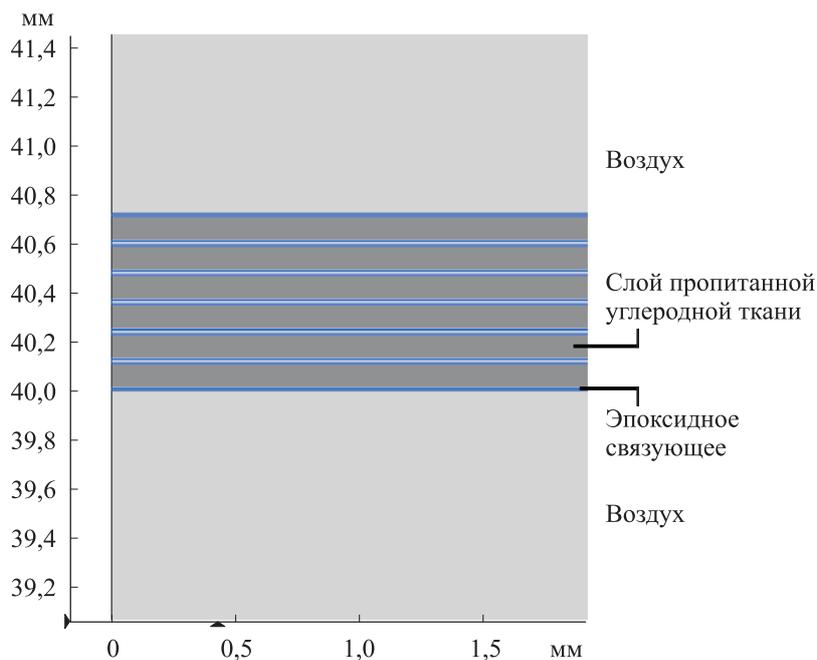


Рис. 8. Расчетная модель ПЭО многослойного углепластика

Таблица 4
Электрофизические характеристики компонентов многослойного углепластика

Вид материала	Часть комплексной диэлектрической проницаемости среды		Электропроводность, См/м
	действительная	мнимая	
Пропитанная ткань	81,176	55,912	214
Полимерное связующее	2,900	0,100	0

Таблица 5
Расчетно-теоретические гомогенные электрофизические характеристики углепластика

Параметр	Значение
Действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости среды	102,89
Мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости среды	32,00
Электропроводность, См/м	16

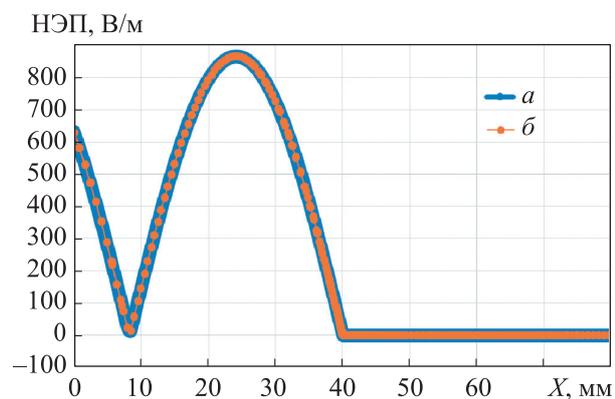


Рис. 9. Изменение НЭП при прохождении электромагнитного излучения через гетеро- (а) и гомогенный (б) ПЭО нити

Электрофизические характеристики компонентов многослойного углепластика приведены в табл. 4. Рассмотрена композиция из эпоксидного связующего и пропитанных слоев ткани, характеристики которых соответствуют данным, указанным в табл. 3.

В результате моделирования распространения электромагнитной волны через исследуемую модель многослойного углепластика определен характер изменения НЭП по толщине ПЭО.

С помощью подхода определения гомогенных электрофизических характеристик пропитанной нити получены характеристики углепла-

Таблица 6
Электрофизические характеристики углепластика, полученные экспериментальным и расчетно-теоретическим путями

Параметр	Значение		Погрешность, %
	экспериментальное	расчетно-теоретическое	
Действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости среды	106,78 ± 0,20	102,89	3,64
Мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости среды	30,66 ± 0,25	32,00	4,37
Электропроводность, См/м	17	16	5,88

стика (табл. 5). Результаты сравнения характера распределения НЭП падающей планарной волны в гетеро- и гомогенном ПЭО нити приведены на рис. 9. Видно, что они полностью совпадают.

Для верификации полученных результатов использованы приведенные в работе [15] данные по действительной, мнимой частям комплексной диэлектрической проницаемости и электропроводности углепластика, полученные экспериментальным путем. Результаты сравнения экспериментальных данных [15] с расчетно-теоретическими приведены в табл. 6. Установлено, что полученные расчетно-теоретическим путем электрофизические характеристики углепластика отличаются от экспериментальных данных не более чем на 6 %, что следует признать удовлетворительным.

Вывод

Предложена расчетно-теоретическая методика определения диэлектрической проницаемости ПКМ на основе углеволокна методом многомасштабного моделирования, построенная на численном моделировании прохождения электромагнитного излучения через ПКМ и решении системы обратных задачи. Выполнена верификация полученных результатов.

Литература

- [1] Li X. *Eddy current techniques for non-destructive testing of carbon fibre reinforced plastic (CFRP)*. PhD thesis. University of Manchester, 2012. 185 p.
- [2] Yin W., Li X., Withers P.J. et al. Non-contact characterization of hybrid aluminium/carbonfibre-reinforced plastic sheets using multi-frequency eddy-current sensors. *Meas. Sci. Technol.*, 2010, vol. 21, no. 10, art. 105708, doi: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/10/105708>
- [3] Meng F., Pickering S.J., McKechnie J. An environmental comparison of carbon fibre composite waste end-of-life options. *SAMPE Europe Conf.*, 2018. URL: <https://www.nasampe.org/store/ViewProduct.aspx?ID=13877922> (дата обращения: 15.06.2024).
- [4] Suzuki T., Takahashi J. LCA of lightweight vehicles by using CFRP for mass-produced vehicles. *Proc. 15th Conf. on Composite Materials*, 2005. URL: <http://j-t.o.oo7.jp/publications/050627TS.pdf> (дата обращения: 15.06.2024).
- [5] Sun X., Liu J., Lu B. et al. Life cycle assessment-based selection of a sustainable lightweight automotive engine hood design. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 2017, vol. 22, no. 9, pp. 1373–1383, doi: <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1254-y>
- [6] Mrazova M. Advanced composite materials of the future in aerospace industry. *Incas Bull.*, 2013, vol. 5, no. 3, pp. 139–150, doi: <http://dx.doi.org/10.13111/2066-8201.2013.5.3.14>
- [7] Quilter A. Composites in aerospace applications. IHS, 2001. 5 p.
- [8] Ibrahim M.E. Nondestructive evaluation of thick-section composites and sandwich structures. A review. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2014, vol. 64, pp. 36–48, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.04.010>
- [9] Loyola B.R., La Saponara V., Loh K.J. In situ strain monitoring of fiber-reinforced polymers using embedded piezoresistive nanocomposites. *J. Mater. Sci.*, 2010, vol. 45, no. 24, pp. 6786–6798, doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4775-y>
- [10] Marsh G. Airbus A350 XWB update. *Reinf. Plast.*, 2010, vol. 54, no. 6, pp. 20–24, doi: [https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(10\)70212-5](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(10)70212-5)
- [11] Kotik A., Usyukin V., Vinogradov I. et al. Simulation of reflecting surface deviations of centimeter-band parabolic space radiotelescope (SRT) with the large-size mirror. *Proc. SPIE*, 2017, vol. 105671, art. 105671A, doi: <https://doi.org/10.1117/12.2308118>
- [12] Belenkov E.S., Prosuntsov P.V., Reznik S.V. Thermophysical processes models in composite workpieces processed by microwave radiation. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 683, art. 012029, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/683/1/012029>
- [13] Kwak M. *Microwave curing of carbon-epoxy composites: process development and material evaluation*. London, Imperial College, 2016. 175 p. doi: <https://doi.org/10.25560/39284>
- [14] Wang Y., Wen Z., Long L. et al. Dielectric response and microwave absorption properties of SiC whisker coated carbon fibers. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2019, 30, pp. 15075–15083, doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-019-01880-2>
- [15] Li Z., Haigh A., Soutis C. et al. X-band microwave characterisation and analysis of carbon fibre-reinforced polymer composites. *Compos. Struct.*, 2019, vol. 208, pp. 224–232, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.09.099>
- [16] Khan J.B., Smith A.C., Tuohy P. et al. Experimental electrical characterisation of carbon fibre composites for use in future aircraft applications. *IET Sci. Meas. Technol.*, 2019, vol. 13, no. 8, pp. 1131–1138, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5601>
- [17] Бабенко А.Н., Громько А.Н. *Электромагнитные поля и волны*. Йошкар-Ола, МарГТУ, 2003. 370 с.

References

- [1] Li X. *Eddy current techniques for non-destructive testing of carbon fibre reinforced plastic (CFRP)*. PhD thesis. University of Manchester, 2012. 185 p.
- [2] Yin W., Li X., Withers P.J. et al. Non-contact characterization of hybrid aluminium/carbonfibre-reinforced plastic sheets using multi-frequency eddy-current sensors.

- Meas. Sci. Technol.*, 2010, vol. 21, no. 10, art. 105708, doi: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/10/105708>
- [3] Meng F., Pickering S.J., McKechnie J. An environmental comparison of carbon fibre composite waste end-of-life options. *SAMPE Europe Conf.*, 2018. URL: <https://www.nasampe.org/store/ViewProduct.aspx?ID=13877922> (accessed: 15.06.2024).
- [4] Suzuki T., Takahashi J. LCA of lightweight vehicles by using CFRP for mass-produced vehicles. *Proc. 15th Conf. on Composite Materials*, 2005. URL: <http://j-t.o.oo7.jp/publications/050627TS.pdf> (accessed: 15.06.2024).
- [5] Sun X., Liu J., Lu B. et al. Life cycle assessment-based selection of a sustainable lightweight automotive engine hood design. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 2017, vol. 22, no. 9, pp. 1373–1383, doi: <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1254-y>
- [6] Mrazova M. Advanced composite materials of the future in aerospace industry. *Incas Bull.*, 2013, vol. 5, no. 3, pp. 139–150, doi: <http://dx.doi.org/10.13111/2066-8201.2013.5.3.14>
- [7] Quilter A. *Composites in aerospace applications*. IHS, 2001. 5 p.
- [8] Ibrahim M.E. Nondestructive evaluation of thick-section composites and sandwich structures. A review. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2014, vol. 64, pp. 36–48, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.04.010>
- [9] Loyola B.R., La Saponara V., Loh K.J. In situ strain monitoring of fiber-reinforced polymers using embedded piezoresistive nanocomposites. *J. Mater. Sci.*, 2010, vol. 45, no. 24, pp. 6786–6798, doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4775-y>
- [10] Marsh G. Airbus A350 XWB update. *Reinf. Plast.*, 2010, vol. 54, no. 6, pp. 20–24, doi: [https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(10\)70212-5](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(10)70212-5)
- [11] Kotik A., Usyukin V., Vinogradov I. et al. Simulation of reflecting surface deviations of centimeter-band parabolic space radiotelescope (SRT) with the large-size mirror. *Proc. SPIE*, 2017, vol. 105671, art. 105671A, doi: <https://doi.org/10.1117/12.2308118>
- [12] Belenkov E.S., Prosuntsov P.V., Reznik S.V. Thermophysical processes models in composite workpieces processed by microwave radiation. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 683, art. 012029, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/683/1/012029>
- [13] Kwak M. *Microwave curing of carbon-epoxy composites: process development and material evaluation*. London, Imperial College, 2016. 175 p. doi: <https://doi.org/10.25560/39284>
- [14] Wang Y., Wen Z., Long L. et al. Dielectric response and microwave absorption properties of SiC whisker coated carbon fibers. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2019, 30, pp. 15075–15083, doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-019-01880-2>
- [15] Li Z., Haigh A., Soutis C. et al. X-band microwave characterisation and analysis of carbon fibre-reinforced polymer composites. *Compos. Struct.*, 2019, vol. 208, pp. 224–232, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.09.099>
- [16] Khan J.B., Smith A.C., Tuohy P. et al. Experimental electrical characterisation of carbon fibre composites for use in future aircraft applications. *IET Sci. Meas. Technol.*, 2019, vol. 13, no. 8, pp. 1131–1138, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5601>
- [17] Babenko A.N., Gromyko A.N. *Elektromagnitnye polya i volny* [Electromagnetics fields and waves]. Yoshkar-Ola, MarGTU Publ., 2003. 370 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 20.06.2024

Информация об авторах

ПРОСУНЦОВ Павел Викторович — доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: pavel.prosuntsov@mail.ru).

ПОЛЬСКИЙ Павел Вадимович — аспирант кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: pvpolskiy@gmail.com).

Information about the authors

PROSUNTSOV Pavel Viktorovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Aerospace Composite Structures. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: pavel.prosuntsov@mail.ru).

POLSKIY Pavel Vadimovich — Postgraduate, Department of Aerospace Composite Structures. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: pvpolskiy@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Просунцов П.В., Польский П.В. Расчетно-теоретическое определение диэлектрической проницаемости полимерных композиционных материалов методом многомасштабного моделирования. Часть 2. Углепластик. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 3, с. 94–104.

Please cite this article in English as:

Prosuntsov P.V., Polskiy P.V. Theoretical and numerical determination of the polymer composite material permeability by the multiscale simulation approach. Part 2. GFRP. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 3, pp. 94–104.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям монографию

«Опыт лидерского движения в Концерне ВКО «Алмаз – Антей»»

**Авторы: Д.С. Джепа, С.Е. Ерошин, Е.А. Исайко,
Г.В. Козлов, Я.В. Новиков, В.В. Федоров**

Представлены результаты анализа реализации в течение восьми лет программы выявления лидеров трудовых коллективов, проводимой в АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей». Оценивается эффективность развитых механизмов и методов на основе анализа полученного экспериментального материала, включающего мнения самих победителей программы. Даны рекомендации по использованию накопленного опыта в других крупных промышленных структурах.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>