

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ДОКЛАДЫ
АКАДЕМИИ НАУК
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

2019

июль–сентябрь

№ 3 (44)



Выходит четыре раза в год

ISSN 1727-2769

Учредители

*Академия наук высшей школы России
Новосибирское отделение Академии наук высшей школы*

Главный редактор

А.Г. Вострецов, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ

Заместитель главного редактора

В.Н. Васюков, д-р техн. наук, проф.

Редакционный совет

М. Грайцар, PhD, проф. (Словакия)
Д.В. Винников, д-р техн. наук, проф. (Эстония)
А. Загоскин, PhD (Великобритания)
Е.В. Ильичев, д-р физ.-мат. наук, проф. (Германия)
М.Н. Клымаш, д-р техн. наук, проф. (Украина)
К.Ю. Арутюнов, д-р физ.-мат. наук, проф.
А.В. Бурдаков, д-р физ.-мат. наук, проф.
И.С. Грузман, д-р техн. наук, проф.
А.О. Давидов, д-р техн. наук
В.П. Драгунов, д-р техн. наук, доц.
С.Л. Елистратов, д-р техн. наук
А.И. Легалов, д-р техн. наук, проф.
Г.В. Майер, д-р физ.-мат. наук, проф., засл. деятель науки РФ
В.Ю. Нейман, д-р техн. наук, проф.
В.Я. Рудяк, д-р физ.-мат. наук, проф.
А.А. Спектор, д-р техн. наук, проф.
С.П. Халютин, д-р техн. наук, проф.
С.А. Харитонов, д-р техн. наук, проф.
В.Д. Юркевич, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь

Д.О. Соколова, канд. техн. наук

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций в 2002 г. (свидетельство ПИ № 77-11517 от 04.01.2002 г.)

Адрес редакции: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ, корп. 4, ком. 415,
телефон: (383) 346-15-37, факс: (383) 346-02-09. Email: danvshrf@corp.nstu.ru

© Новосибирское отделение АН ВШ, 2019 г.

SCIENTIFIC JOURNAL

**PROCEEDINGS
OF THE RUSSIAN HIGHER SCHOOL
ACADEMY OF SCIENCES**

2019

July–September

№ 3 (44)



Journal is published quarterly

ISSN 1727-2769

Journal was established by

*Russian Higher Education Academy of Science
Novosibirsk Branch of Higher Education Academy of Science*

Chief Editor

A.G. Vostretsov, D.Sc. (Eng.), Prof., Honoured Science Worker of Russian Federation

Deputy Chief Editor

V.N. Vasyukov, D.Sc. (Eng.), Prof.

Editorial Council

M. Grajcar, PhD, Prof. (Slovakia)
D.V. Vinnikov, D.Sc. (Eng.), Prof. (Estonia)
A.M. Zagoskin, PhD (United Kingdom)
E.V. Ilyichev, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof. (Germany)
M.M. Klymash, D.Sc. (Eng.), Prof. (Ukraine)
K.Yu. Arutyunov, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
A.V. Burdakov, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
I.S. Gruzman, D.Sc. (Eng.), Prof.
A.O. Davidov, D.Sc. (Eng.)
V.P. Dragunov, D.Sc. (Eng.), Assoc. Prof.
S.L. Elistratov, D.Sc. (Eng.)
A.I. Legalov, D.Sc. (Eng.), Prof.
G.V. Mayer, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof., Honoured Science Worker of Russian Federation
V.Yu. Neyman, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.Ya. Rudyak, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
A.A. Spector, D.Sc. (Eng.), Prof.
S.P. Khaljutin, D.Sc. (Eng.), Prof.
S.A. Haritonov, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.D. Yurkevich, D.Sc. (Eng.), Prof.

Executive Secretary

D.O. Sokolova, C.Sc.(Eng.)

Editor Address: Office 415, 20 bld. 4, K. Marx Prospect, Novosibirsk, 630073, Russian Federation.
Tel: +7 (383) 346-15-37. Fax: +7 (383) 346-02-09. Email: danvshrf@corp.nstu.ru

© Novosibirsk Branch of Higher Education Academy of Science, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Сопна М.С.

Численное решение задач маскировки и эквивалентности
рассеивателей с учетом смены поляризации
зондирующего сигнала7

Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г.

Смачивание поверхностей алюминий-магниевого сплава
после обработки лазерным излучением18

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Горбачев А.П., Паршин Ю.Н.

Проектирование 4-лучевой печатной фазированной антенной
решетки с матрицей Батлера34

Лавренов Е.О., Темлякова З.С., Темляков А.А.

Принципы синтеза устройства, поддерживающего
эксплуатационный режим двигателя
при несимметрии обмотки ротора48

**Паулиш А.Г., Голяшов В.А., Гусаченко А.В.,
Морозов А.О., Дорожкин К.В., Суляев В.И.,
Костюченко В.Я., Пыргаева С.М.**

Спектральные характеристики чувствительности
пирозлектрического детектора на основе
тетрааминодифенила в видимом, ИК- и ТГц-диапазонах57

Ткачев В.К., Еремин А.В., Тарабрина Т.Б., Кудинов И.В.

Гидродинамика и теплообмен в жидкости при зависимости
вязкости от температуры70

CONTENTS

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Soppa M.S.

Numerical solution of masking and scatterer equivalence problems
taking into account the change of polarization of the probe signal7

Feoktistov D.V., Orlova E.G.

Wetting of aluminum-magnesium alloy surfaces
after laser processing18

TECHNICAL SCIENCES

Gorbachev A.P., Parshin Y.N.

Design of a 4-beam printed phased antenna array
with a Batler matrix34

Lavrenov E.O., Temlyakova Z.S., Temlyakov A.A.

Synthesis of the device supporting the operation mode
of an induction motor under asymmetry of a rotor winding48

CONTENTS

***Paulish A.G., Golyashov V.A., A.V. Gusachenko A.V.,
Morozov A.O., Dorozhkin K.V., Suslyayev V.I.,
Kostyuchenko V.Ya., Pyrgaeva S.M.***
Spectral characteristics of the pyroelectric detector sensitivity
based on tetraaminodiphenyl in visible, IR and THz-ranges57

Tkachev V.K., Eremin A.V., Tarabrina T.B., Kudinov I.V.
Hydrodynamics and heat exchange in fluids with viscosity
dependence on temperature70

УДК 621.396.96: 519.6

**ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ МАСКИРОВКИ
И ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ РАССЕИВАТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ
СМЕНЫ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЗОНДИРУЮЩЕГО СИГНАЛА****М.С. Соппа***Новосибирский государственный архитектурно-
строительный университет (Сибстрин)*

В статье исследуются свойства рассеивателей с импедансной поверхностью при смене направления линейной поляризации падающей электромагнитной волны. Установлено, что между решениями обратных задач синтеза импедансных покрытий при различных поляризациях существует функциональная связь, позволяющая перейти к интегрооператорному уравнению для определения покрытия, двойственного к исходному. Оно отличается тем, что если одновременно поменять покрытие и поляризацию падающей волны, то диаграмма рассеяния (ДР) не изменится. Это позволяет синтезировать кроссполяризационное маскировочное покрытие, при котором ДР не меняется при смене поляризации на поперечную. Предложен подход к построению рассеивателей, обладающих свойством кроссполяризационной эквивалентности. Преимуществом предложенных алгоритмов синтеза распределений поверхностного импеданса является то, что они не требуют применения процедур регуляризации. Исследована постановка оптимизационной задачи, которая обеспечивает получение покрытий в классах функций, имеющих минимальную норму.

Ключевые слова: интегральное уравнение, электромагнитное рассеяние, импедансное покрытие, маскировка, эквивалентные рассеиватели, линейная поляризация, метод граничных элементов.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-7-17

Введение

Важным разделом современной математической физики является теория дифракции электромагнитных волн, применяемая к задачам вычислительной диагностики и локационным задачам. Все большее значение здесь приобретают исследования обратных задач, связанных в том числе с понятием эквивалентных [1], невидимых [2] рассеивателей, с разработкой средств маскировки материальных объектов [3, 4], включающих синтез специальных поверхностных покрытий [5, 6]. В данной работе представлены подходы, позволяющие решать задачи определения поверхностного импеданса для маскировки рассеивателя с учетом смены поляризации падающей волны. Диаграмма рассеяния, соответствующая такому покрытию, не меняется при смене поляризации зондирующего сигнала на поперечную. Предложены алгоритмы синтеза двойственных покрытий цилиндрических объектов, обеспечивающих эквивалентные характеристики рассеяния при различных поляризациях падающей волны. Сформулирована и решена задача в оптимизационной постановке, которая позволяет получить пару двойственных покрытий, имеющих минимальную норму.

1. Постановка задачи

Рассматривается дифракция плоской электромагнитной волны на цилиндрической импедансной поверхности S . Волна имеет линейную поляризацию, когда

либо вектор \vec{E} (E -поляризация), либо вектор \vec{H} (H -поляризация) параллелен оси OZ – образующей поверхности S . Данная терминология используется, в частности, в монографии [7]. В области D , внешней для S , ненулевой компонентой поля является в случае E -поляризации $u = E_z(x, y)$, а при H -поляризации соответственно $u = H_z(x, y)$.

Для функции u выполняется уравнение Гельмгольца:

$$u_{xx} + u_{yy} + k^2 u = 0, \quad (x, y) \in D, \quad (1)$$

с граничным условием [8]

$$u - \frac{W}{ikW_0} u_{0n} = 0, \quad (x, y) \in S, \quad (2)$$

при E -поляризации и

$$u_n - ik \frac{W}{W_0} u_0 = 0, \quad (x, y) \in S, \quad (3)$$

при H -поляризации. Здесь $k = \omega / c = 2\pi / \lambda$, λ – длина волны; ω – круговая частота излучения; c – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме; W – импеданс поверхности, описывающий процессы, возникающие в поверхностном слое проводника при взаимодействии с ним электромагнитного поля; $W_0 = 120 \pi = \sqrt{\mu / \varepsilon}$ – волновое сопротивление свободного пространства; $(\cdot)_n$ – дифференцирование по внешней нормали к контуру; u_0 – решение в случае идеально проводящей поверхности S ($W = 0$).

Кроме того, для рассеянного поля на бесконечности требуется выполнение асимптотического условия излучения

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} \left(\frac{\partial u^s}{\partial R} - iku^s \right) = 0, \quad (4)$$

$u^s = u - u_1$, где u_1 – известное поле падающей волны.

Согласно постановке обратной задачи, требуется найти комплекснозначную функцию W , задающую распределение поверхностного импеданса и обеспечивающую приближение с достаточной точностью диаграммы рассеяния τ к заданным в m точках дальней зоны значениям рассеянного поля τ_g :

$$J = \sum_{i=1}^m \left| \tau(x_i, y_i) - \tau_g(x_i, y_i) \right|^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

здесь $\tau = \gamma u^s$, $\gamma = \sqrt{R} e^{-ikR}$, $R^2 = x_i^2 + y_i^2 \rightarrow \infty$.

2. Переход к интегральным уравнениям

Используя фундаментальное решение $g(M, P) = (i\pi / 2) H_0^{(1)}(kr_{MP})$, где $H_0^{(1)}$ – функция Ханкеля нулевого порядка первого рода, перейдем от исходной дифференциальной краевой обратной задачи к интегральным уравнениям [9]:

$$\gamma \int_S (g\nu - g_n w) dS = 2\pi \tau_g(M), \quad M \in S_R, \quad (6)$$

$$\pi w - \int_S (g\nu - g_n w) dS = 2\pi t(P), \quad P \in S, \quad (7)$$

где S_R – окружность достаточно большого радиуса. При разных поляризациях мы приходим к одной и той же системе интегральных уравнений (6, 7), но для разных комплексов функций (ν, w) :

$$\begin{cases} \nu = u_{nE}, & w = u_{0nE} W_E / (ikW_0) \\ t = u_{1E} \end{cases} \quad \text{при } E\text{-поляризации,} \quad (8.1)$$

$$\begin{cases} \nu = u_{0H} ikW_H / W_0, & w = u_H \\ t = u_{1H} \end{cases} \quad \text{при } H\text{-поляризации.} \quad (8.2)$$

Сюда входят, кроме неизвестного импеданса, также решения прямых задач u_{nE} и u_H . Уравнение (7) перепишем в виде

$$Pw - Q\nu = 2\pi t, \quad (9)$$

где через P и Q обозначены операторы

$$P\sigma = \pi\sigma + \int_S g_n \sigma dS, \quad Q\sigma = \int_S g \sigma dS.$$

Из (9) получим представление для w :

$$w = P^{-1}(Q\nu + 2\pi t), \quad (10)$$

которое при подстановке в (6) приводит к получению интегрооператорного уравнения для функции ν :

$$\gamma \int_S (g - g_n P^{-1} Q) \nu dS = 2\pi t_g + 2\pi \gamma \int_S g_n P^{-1} t dS. \quad (11)$$

Таким образом, исходная обратная задача (1–5) сведена к решению уравнения (11). В работах [9, 10] предложены и апробированы эффективные алгоритмы его регуляризации и численного решения методом граничных элементов.

Перейдем к построению специальных классов обратных задач синтеза рассеивателей, решение которых не потребует привлечения аппарата регуляризации (описанного, например, в [11]). Из соотношений двойственности (8.1) для функции w следует равенство

$$w = u_{0nE} W_E / (ikW_0).$$

Кроме того, для w имеется представление (10), благодаря чему, с использованием (8.2) для ν , получаем

$$u_{0nE} W_E / (ikW_0) = P^{-1} Q u_{0H} ikW_H / W_0 + 2\pi P^{-1} t. \quad (12)$$

Через u_{0nE} и u_{0H} обозначены решения прямых задач в случае идеально проводящей поверхности соответственно при E -поляризованной и H -поляризованной падающей волне. Имеют место соотношения

$$2\pi P^{-1} t = u_{0H}, \quad 2\pi Q^{-1} t = -u_{0nE}. \quad (13)$$

В результате уравнение (12) может быть записано в виде:

$$W_E = (iku_{0H}W_0 - k^2P^{-1}Qu_{0H}W_H) / u_{0nE}. \quad (14)$$

Таким образом, установлено наличие функциональной связи между W_E и W_H – решениями задач синтеза поверхностного импеданса при E - и H -поляризациях.

3. Кроссполяризационные маскировочные покрытия

Ставится задача синтеза покрытия, при котором зондирующие сигналы разных поляризаций создают одинаковые отраженные поля. Потребуем, чтобы входящие в (14) функции были связаны равенством $W_E = W_H = W^m = W(s)$, где s – дуговая координата контура. Тогда из уравнения (14) следует, что функция $W(s)$ должна удовлетворять соотношению

$$(u_{0En} + k^2P^{-1}Qu_{0H})W = ik_{0H}W_0. \quad (15)$$

Метод граничных элементов позволяет свести его к системе линейных алгебраических уравнений

$$A\mathbf{W} = \mathbf{f}, \quad (16)$$

матрица $A = E(\mathbf{u}_{0En}) + k^2\mathbf{P}^{-1}\mathbf{Q}E(\mathbf{u}_{0H})$ имеет порядок $N \times N$ (N – число панелей, аппроксимирующих поверхность S). Через \mathbf{W} , \mathbf{u}_{0En} , \mathbf{u}_{0H} , \mathbf{P} , \mathbf{Q} обозначены дискретные аналоги соответствующих функций и операторов, $\mathbf{f} = ikW_0\mathbf{u}_{0H}$, а $E(\mathbf{u}_{0En})$, $E(\mathbf{u}_{0H})$ являются диагональными матрицами, имеющими в качестве диагоналей соответствующие векторы. Решение уравнения (16) комплекснозначным методом исключения Гаусса с выбором ведущего элемента позволяет определить маскировочный поверхностный импеданс.

4. Синтез эквивалентных рассеивателей (с учетом смены поляризации)

Пусть имеется рассеиватель, обладающий некоторой диаграммой рассеяния при исходной поляризации падающей волны и начальном распределении импеданса W_1 . Задача состоит в нахождении двойственного покрытия W_2 , при котором данный рассеиватель создает такую же диаграмму рассеяния при облучении электромагнитной волной с поперечной поляризацией.

В случае, когда исходной является H -поляризация, функции W_1 и W_2 связаны между собой уравнением (14)

$$W_2 = (iku_{0H}W_0 - k^2P^{-1}Qu_{0H}W_1) / u_{0nE}. \quad (17)$$

Найденное отсюда двойственное распределение импеданса $W_E^d = W_2$ обеспечивает при облучении E -поляризованной волной диаграмму рассеяния, совпадающую с диаграммой рассеяния, которую создает этот же рассеиватель с поверхностным импедансом $W_H^d = W_1$ при облучении H -поляризованной волной.

Частным случаем при этом является возможность реализовать маскировку под кроссполяризационную диаграмму рассеяния идеально проводящего рассеивателя ($W_H = 0$). Тогда из (17) следует:

$$W_E^* = W_2 = ik u_{0H} W_0 / u_{0nE}. \quad (18)$$

В ситуации, когда исходной является E - поляризация, аналогом уравнения (18) является функциональная зависимость

$$W_1 = (u_{0nE} W_0 / (ik) - Q^{-1} P u_{0nE} W_2 / k^2) / u_{0H}. \quad (19)$$

При выводе (19) используются соотношения (13).

Нетрудно получить, что $W_E^* \cdot W_H^* = W_0^2$, где W_H^* определяется из (19) при $W_2 = 0$.

Если обозначить правую часть (19) через $F(W_2)$, то можно построить двухпараметрический класс кроссполяризационно эквивалентных покрытий, введя функциональную связь вида $W_1 = F(aW_2 + b)$.

5. Задача оптимизации синтезированного импеданса

Физическая реализация построенных решений может сталкиваться со значительными техническими трудностями. Одним из путей их преодоления является нахождение решений в классах функций, имеющих минимальную норму. Предлагаемый нами подход позволяет сформулировать постановку соответствующей оптимизационной задачи.

При построении синтезируемого покрытия будем считать искомым вещественный вектор

$$Z = (\text{Re } W_{11}, \dots, \text{Re } W_{1N}, \text{Im } W_{11}, \dots, \text{Im } W_{1N}, \text{Re } W_{21}, \dots, \text{Re } W_{2N}, \text{Im } W_{21}, \dots, \text{Im } W_{2N}),$$

имеющий $4N$ компонент $Z = (Z_1, \dots, Z_{4N})$. Таким образом, в уравнении (19) как W_2 , так и W_1 считаются варьируемыми. Поставим задачу минимизации нормы вектора Z при дополнительном условии в виде соотношения (19). Для ее решения составим функцию Лагранжа

$$L(Z_1, \dots, Z_{4N}, \lambda_1, \dots, \lambda_{2N}) = \sum_{i=1}^{4N} Z_i^2 + \sum_{j=1}^N \lambda_j \text{Re}(\mathbf{W}_1 - \mathbf{F}(\mathbf{W}_2))_j + \sum_{j=1}^N \lambda_{j+N} \text{Im}(\mathbf{W}_1 - \mathbf{F}(\mathbf{W}_2))_j. \quad (20)$$

Через $\mathbf{F}(\mathbf{W}_2)$ обозначен комплекснозначный дискретный аналог оператора, соответствующего правой части (19). Запишем условие минимума функции L .

$$\frac{\partial L}{\partial Z_i} = 0, \quad i = 1, \dots, 4N, \quad \frac{\partial L}{\partial \lambda_j} = 0, \quad j = 1, \dots, 2N. \quad (21)$$

Система (21) состоит из $6N$ линейных алгебраических уравнений.

Вычислительную процедуру решения системы можно упростить, существенно понизив ее порядок. Для этого используется специальный вид уравнения (19). Представим вектор Z в виде $Z = (Y_1, Y_2)$, где

$$Y_1 = (\operatorname{Re} W_{11}, \dots, \operatorname{Re} W_{1N}, \operatorname{Im} W_{11}, \dots, \operatorname{Im} W_{1N}),$$

$$Y_2 = (\operatorname{Re} W_{21}, \dots, \operatorname{Re} W_{2N}, \operatorname{Im} W_{21}, \dots, \operatorname{Im} W_{2N}).$$

Тогда (19) в результате дискретизации может быть записано в матричной форме:

$$Y_1 = BY_2 + h.$$

Здесь $B = \begin{pmatrix} \operatorname{Re} \mathbf{B}_1 & -\operatorname{Im} \mathbf{B}_1 \\ \operatorname{Im} \mathbf{B}_1 & \operatorname{Re} \mathbf{B}_1 \end{pmatrix}$, \mathbf{B}_1 – матрица порядка N , являющаяся дискретным

аналогом комплекснозначного оператора $-Q^{-1}Pu_{0nE}/(ku_{0H})$, $h = (\operatorname{Re} \mathbf{h}_1, \operatorname{Im} \mathbf{h}_1)$, где \mathbf{h}_1 – дискретный аналог функции $u_{0nE}W_0/(iku_{0H})$.

С учетом этого функция Лагранжа (20) принимает следующий вид:

$$L = \sum_{i=1}^{2N} Y_{1i}^2 + \sum_{i=1}^{2N} Y_{2i}^2 + \sum_{i=1}^{2N} \lambda_i (Y_{1i} - (BY_2)_i - h_i).$$

Система (21) позволяет исключить множители Лагранжа $\lambda_i = 2(BY_2)_i - 2h_i$, $i = 1, \dots, 2N$, и перейти к уравнению

$$(E + B^t B)Y_2 = -B^t h. \quad (22)$$

Вещественная симметричная матрица в левой части (22) имеет порядок $2N$. Набор компонент Y_1 затем может быть найден благодаря соотношениям:

$$\frac{\partial}{\partial \lambda_i} L = Y_{1i} - (BY_2)_i - h_i = 0, \quad i = 1, \dots, 2N. \quad (23)$$

6. Результаты вычислительного эксперимента

1. Синтез кроссполяризационного маскировочного покрытия. В качестве примера рассматривается дифракция электромагнитной волны на цилиндрическом рассеивателе кругового поперечного сечения с диаметром $d = \lambda / \pi$. Искомое распределение поверхностного импеданса находится с помощью интегрооператорного уравнения (15). Реализация его численного решения выполняется по методу граничных элементов и сводится к системе линейных алгебраических уравнений (16) с подстановкой дискретных аналогов операторов P и Q решений прямых задач для идеально проводящей поверхности данной формы при E - и H -поляризациях падающей волны.

Графики полученных в расчетах реальной (линия 1) и мнимой (линия 2) частей нормированного импеданса $\bar{W}^m = W_H^m / W_0$ приведены на рис. 1, а.

Соответствующая найденному распределению импеданса диаграмма рассеяния представлена на рис. 1, б. Расчеты по алгоритму решения прямой задачи показывают, что она практически не меняется при смене поляризации зондирующего сигнала.

2. Синтез покрытий, обеспечивающих кроссполяризационную эквивалентность рассеивателей. Цилиндрический рассеиватель кругового поперечного сечения с комплекснозначным распределением поверхностного импеданса, удовлетворяющим соотношению

$$W_E^d = -kW_0(0, 1 + 0, li), \quad (24)$$

при облучении E -поляризованной электромагнитной волной, имеет диаграмму рассеяния, показанную на рис. 2, a сплошной линией 1.

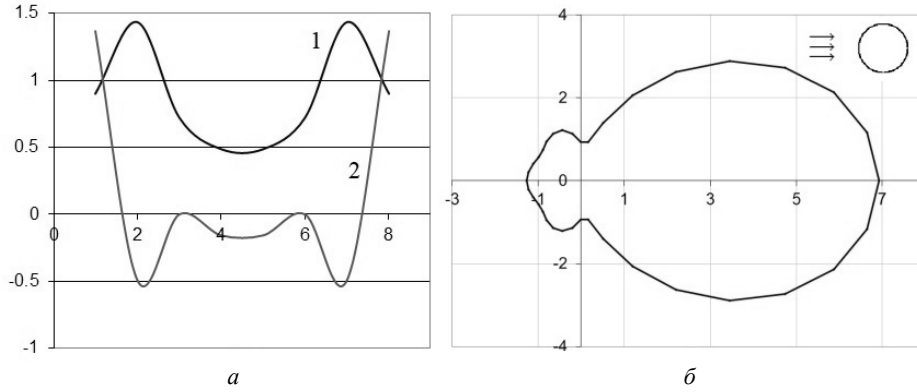


Рис. 1 – Распределение $\text{Re}\bar{W}^m$ – линия 1, $\text{Im}\bar{W}^m$ – линия 2 (а); диаграмма рассеяния (б)

Fig. 1 – Distribution $\text{Re}\bar{W}^m$ is line 1, $\text{Im}\bar{W}^m$ is line 2 (a); b – Scattering diagram

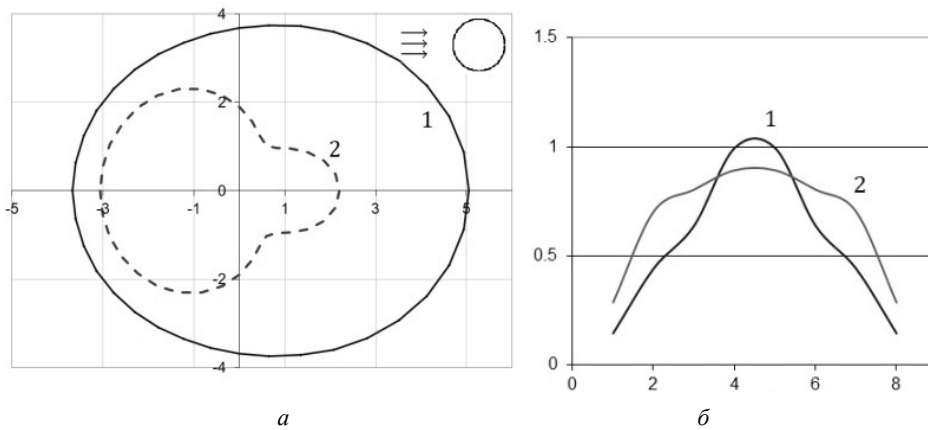


Рис. 2 – Диаграммы рассеяния (а); распределение $\text{Re}\bar{W}^d$ – линия 1, $\text{Im}\bar{W}^d$ – линия 2 (б)

Fig. 2 – Scattering diagrams (a); Distribution $\text{Re}\bar{W}^d$ is line 1, $\text{Im}\bar{W}^d$ is line 2 (b)

Ставится задача синтезировать двойственное импедансное покрытие для рассеивателя данной формы, такое, чтобы при локации H - поляризованной волной он имел индикатрису, представленную на рис. 2, a линией 1.

Искомое распределение импеданса $W_H^d = W_1$ находится по формуле (19), с подстановкой $W_2 = W_E^d$, соответствующей зависимости (24). Найденные в расчетах распределения вещественной (линия 1) и мнимой (линия 2) частей нормированного импеданса покрытия представлены на рис. 2, б. Диаграмма рассеяния, полученная с применением синтезированного покрытия с точностью до 1 % совпадает с показанной на рис. 2, а линией 1. На этом же рисунке штриховой линии 2

соответствует исходная диаграмма рассеяния идеально проводящего объекта указанной формы при H -поляризации.

3. Построение двойственных покрытий минимальной нормы. Для иллюстрации применения метода управления свойствами синтезируемого покрытия рассмотрим дифракцию на рассмотренном выше цилиндрическом рассеивателе с круговым поперечным сечением.

В результате численного решения полученной системы линейных алгебраических уравнений (22) находим покрытие W_E^{opt} рассеивателя при E -поляризации, соответствующее вектору Y_2 – линии 1, 2 на рис. 3, а. Парное маскировочное покрытие W_H^{opt} , в случае облучения H -поляризованной электромагнитной волной, соответствует вектору Y_1 и вычисляется с использованием соотношений (23). Оно представлено на рис. 3, б линиями 1, 2.

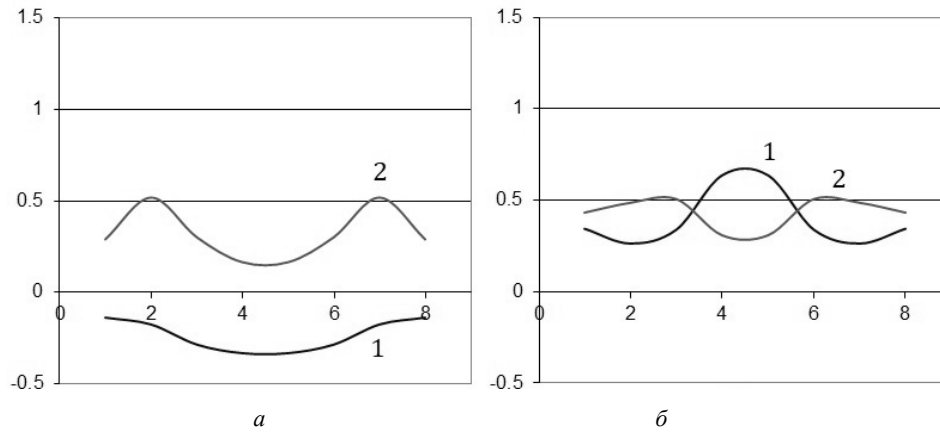


Рис. 3 – Распределения реальной (1) и мнимой (2) части поверхностного импеданса

Fig. 3 – Distributions of real (1) and imaginary (2) parts of surface impedance

На рис. 4 показана диаграмма рассеяния, которая является общей как для рассеивателя с покрытием W_E^{opt} при E -поляризации, так и при облучении H -поляризованной волной этого рассеивателя с покрытием W_H^{opt} .

Для обобщенной оценки нормы пары двойственных покрытий применим следующее выражение:

$$\|W\|_{(0)} = \frac{1}{W_0} \max \left(\max_{1 \leq i \leq N} \sqrt{\operatorname{Re} W_{Hi}^2 + \operatorname{Im} W_{Hi}^2}, \max_{1 \leq i \leq N} \sqrt{\operatorname{Re} W_{Ei}^2 + \operatorname{Im} W_{Ei}^2} \right).$$

Анализ графиков на рис. 1–3 показывает, что обобщенная норма для кроссполаризационного маскировочного покрытия $\|W^m\|_{(0)} \approx 1,51$, для пары двойственных покрытий из предыдущего примера $\|W^d\|_{(0)} \approx 1,34$, в то время как покрытия, полученные при решении задачи оптимизации, имеют существенно меньшую обобщенную норму $\|W^{\text{opt}}\|_{(0)} \approx 0,71$.

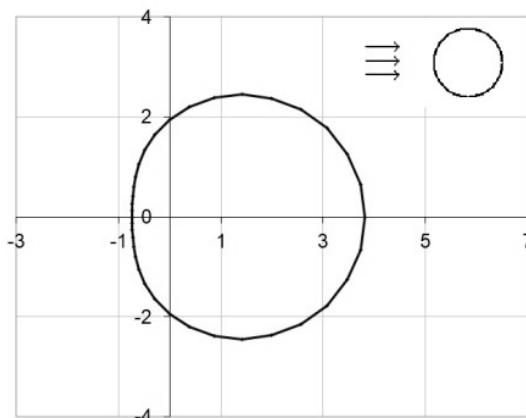


Рис. 4 – Диаграмма рассеяния для покрытия минимальной нормы

Fig. 4 – A scattering diagram to coat a minimum norm

Конструктивно-технологические аспекты реализации синтезированных покрытий выходят за рамки данной статьи, но необходимо отметить следующие соображения. Предложенный метод дает конструктивный алгоритм построения приближенных решений, которые соответствуют призматическим рассеивателям с количеством граней, равным параметру дискретизации N и с кусочно-постоянным распределением импеданса на гранях. В совокупности с возможностью минимизации норм это создает предпосылки для физичности и возможности технической реализации полученных решений.

Заключение

В работе построены вычислительные алгоритмы для решения задач кроссполаризационной маскировки импедансных рассеивателей с учетом смены линейной поляризации падающей волны на поперечную. Определены функциональные связи между поверхностными распределениями импеданса при различных поляризациях, включающие операторы решения прямых задач и их обращения для случая идеальной проводимости. Реализован алгоритм синтеза маскировочного покрытия, обеспечивающего ДР, совпадающую с ДР данного объекта при облучении поперечно поляризованной волной. Предложено численное решение о построении кроссполаризационно эквивалентных рассеивателей. По заданному импедансному покрытию определяется двойственное к нему, такое, что если одновременно поменять покрытия и поляризацию падающей волны, то ДР не изменится. Рассмотрена задача минимизации норм полученных решений, что увеличивает возможность физической реализуемости таких импедансных покрытий. Проведенные вычислительные эксперименты показали эффективность предложенных подходов. Они могут быть применены для цилиндрических рассеивателей с достаточно произвольной формой поперечного сечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Еремин Ю.А., Свешников А.Г.** О существовании эквивалентных рассеивателей в обратных задачах теории дифракции // Доклады АН СССР. – 1987. – Т. 297, № 5. – С. 1095–1099.
2. **Еремин Ю.А.** К проблеме существования невидимого рассеивателя в теории дифракции // Дифференциальные уравнения. – 1988. – Т. 24, № 4. – С. 684–687.

3. Pendry J.B., Shurig D., Smith D.R. Controlling electromagnetic fields // *Science*. – 2006. – Vol. 312. – P. 1780–1782.
4. Дубинов А.Е., Мытарева Л.А. Маскировка материальных тел методом волнового обтекания // *Успехи физических наук*. – 2010. – Т. 180, № 5. – С. 475–501.
5. Алексеев Г.В. Управление граничным импедансом в двумерной задаче маскировки материальных тел методом волнового обтекания // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. – 2013. – Т. 53, № 12. – С. 2044–2061.
6. Alekseev G.V. Cloaking via impedance boundary condition for the 2-D Helmholtz equation // *Applicable Analysis*. – 2014. – Vol. 93, iss. 2. – DOI: 10.1080/00036811.2013.768340.
7. Галишников Т.Н., Ильинский А.С. Численные методы в задачах дифракции. – М.: МГУ, 1987. – 208 с.
8. Беневольский С.С., Соппа М.С. Обратная задача электромагнитного рассеяния при заданной фазовой характеристике // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. – 2014. – № 1 (22). – С. 7–15.
9. Соппа М.С. Использование соотношений двойственности для E - и H -поляризаций в обратных задачах рассеяния на импедансных поверхностях // *Сибирский журнал индустриальной математики*. – 2004. – Т. 7, № 2. – С. 111–116.
10. Soppa M.S. Mathematical modeling of microwave diagnostics of impedance surfaces with an unknown phase of the reflected signal // *Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2008. – Vol. 49, N 4 (290). – P. 146–151.
11. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1986. – 288 с.

**NUMERICAL SOLUTION OF MASKING AND SKATTERER
EQUIVALENCE PROBLEMS TAKING INTO ACCOUNT
THE CHANGE OF POLARIZATION OF THE PROBE SIGNAL**

Soppa M.S.

*Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (SibStrin),
Novosibirsk, Russian Federation*

The article investigates the properties of scatterers with an impedance surface when the direction of linear polarization of the incident electromagnetic wave changes. It has been established that between the solutions of inverse problems of the synthesis of impedance coatings with different polarizations, there is a functional relationship that allows us to get to the integrooperator equation to determine the coating dual to the original one. It differs in the fact that if you simultaneously change the coating and the polarization of the incident wave, the scattering diagram (SD) will not change. This allows you to synthesize a cross-polarization masking coating, in which the SD does not change when polarization changes to a transverse polarization. An approach to the construction of scatterers with the property of cross-polarization equivalence is proposed. The advantage of the proposed algorithms for the synthesis of surface impedance distributions is that they do not require the use of regularization procedures. The formulation of an optimization problem that provides coatings in classes of functions with a minimum norm is studied.

Keywords: integral equation, electromagnetic scattering, linear polarization, impedance coating, masking, equivalent scatterers, boundary element method.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-7-17

REFERENCES

1. Eremin Yu.A., Sveshnikov A.G. O sushchestvovanii ekvivalentnykh rasseivatelei v obratnykh zadachakh teorii difraktsii [On the existence of equivalent scatterers in inverse problems of diffraction theory]. *Doklady Akademii nauk SSSR – Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR*, 1987, vol. 297, no. 5, pp. 1095–1099.
2. Eremin Yu.A. K probleme sushchestvovaniya nevidimogo rasseivatelya v teorii difraktsii [On the problem of the existence of an invisible scatterer in diffraction theory]. *Differentsial'nye uravneniya – Differential Equations*, 1988, vol. 24, no. 4, pp. 684–687.
3. Pendry J.B., Shurig D., Smith D.R. Controlling electromagnetic fields. *Science*, 2006, vol. 312, pp. 1780–1782.

4. Dubinov A.E., Mytareva L.A. Maskirovka material'nykh tel metodom volnovoogo obtekaniya [Invisible cloaking of material bodies using the wave flow method]. *Uspekhi fizicheskikh nauk – Physics-Uspekhi*, 2010, vol. 180, no. 5. pp. 475–501. (In Russian).
5. Alekseev G.V. Upravlenie granichnym impedansom v dvumernoi zadache maskirovki material'nykh tel metodom volnovoogo obtekaniya [Control of boundary impedance in two-dimensional material-body cloaking by the wave flow method]. *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki – Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2013, vol. 53, no. 12, pp. 2044–2061. (In Russian).
6. Alekseev G.V. Cloaking via impedance boundary condition for the 2-D Helmholtz equation. *Applicable Analysis*, 2014, vol. 93, iss. 2. DOI: 10.1080/00036811.2013.768340.
7. Galishnikova T.N., Il'inskii A.S. *Chislennye metody v zadachakh difraktsii* [Numerical methods in diffraction problems]. Moscow, MSU Publ., 1987. 208 p.
8. Benevol'skij S.S., Soppa M.S. Obratnaya zadacha elektromagnitnogo rasseyaniya pri zadanoi fazovoi kharakteristike [Inverse electromagnetic scattering problem with the given phase function]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2014, no. 1 (22), pp. 7–15.
9. Soppa M.S. Ispol'zovanie sootnoshenii dvoistvennosti dlya E- i H-polyarizatsii v obratnykh zadachakh rasseyaniya na impedansnykh poverkhnostyakh [The use of duality relations for E- and H-polarisations in inverse problems of scattering on impedance surfaces]. *Sibirskii zhurnal industrial'noi matematiki – Journal of Applied and Industrial Mathematics*, 2004, vol. 7, no. 2, pp. 111–116. (In Russian).
10. Soppa M.S. Mathematical modeling of microwave diagnostics of impedance surfaces with an unknown phase of the reflected signal. *Applied Mechanics and Technical Physics*, 2008, vol. 49, no. 4 (290), pp. 146–151.
11. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods for solving of ill-posed problems]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 288 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



Соппа Михаил Сергеевич – родился в 1953 году, д-р физ.-мат. наук, профессор, чл.-корр. САН ВШ, профессор кафедры физики Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин). Область научных интересов: разработка и применение численных методов и компьютерного моделирования в прямых и обратных задачах электро- и аэродинамики. Опубликовано 104 научные работы. (Адрес: 630008, Россия, Новосибирск, ул. Ленинградская, 113. E-mail: soppa@ngs.ru).

Soppa Mikhail Sergeevich (b. 1953) – Doctor of Sciences (Phys.&Math.), professor, Corresponding Member of the Siberian Branch of the Russian Higher Education Academy of Sciences, professor at the Physics Department of the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sib-Strin). His research interests are currently focused on numerical methods and computer simulation development and application in direct and inverse electro- and aerodynamics problems. He is the author of 104 scientific papers. (Address: 113, Leningradsкая St., Novosibirsk, 630008, Russia. E-mail: soppa@ngs.ru).

*Статья поступила 03 июля 2019
Received July 03, 2019*

To Reference:

Soppa M.S. Chislennoe reshenie zadach maskirovki iekvivalentnosti rasseivatelei s uchetom smeny polyarizatsii zondiruyushchego signala [Numerical solution of masking and skatterer equivalence problems taking into account the change of polarization of the probe signal]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2019, no. 3 (44), pp. 7–17. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-7-17.

УДК 532.64; 532.696.1

**СМАЧИВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВОГО
СПЛАВА ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ****Д.В. Феоктистов¹, Е.Г. Орлова²**¹*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН*²*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

На поверхностях алюминиево-магниевого сплава наносекундным лазерным излучением в условиях фиксированной плотности энергии, варьируя скорость линейного перемещения луча и количество линий его прохода, получены упорядоченные текстуры, состоящие из элементов в форме кратеров. Определены трехмерные параметры шероховатости, их зависимости от параметров лазерной обработки алюминиево-магниевого сплава. Свойства смачиваемости поверхностей оценивались по величине статического контактного угла, измеренного с использованием оборудования теневой оптической методики. Установлено, что непосредственно после текстурирования поверхности алюминиево-магниевого сплава свойства смачиваемости улучшаются, со временем они ухудшаются (зарегистрирован рост контактного угла). Сформулирована гипотеза о том, что неравномерное содержание кислорода по поверхности после ее лазерного текстурирования связано не только с термохимическим механизмом преобразований в металле приповерхностного слоя, но и с длительностью периода релаксации теплового поля, а также с механизмом формообразования элемента текстуры (кратера). Обнаружено, что на поверхностях с меньшим содержанием кислорода в приповерхностном слое контактный угол стабилизируется быстрее.

Ключевые слова: смачивание, статический контактный угол, текстура, лазерное излучение, алюминиево-магниевый сплав, содержание кислорода.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-18-33

Введение

Лазерное текстурирование металлов – перспективный способ создания поверхностей с уникальными функциональными свойствами, например, гидрофобными/гидрофильными [1], повышенной стойкостью к коррозии [2], биообрастанию [3], органическим загрязнениям [4], абразивному и кавитационному износу [5–7], высокой отражательной способностью [8]. Область применения таких поверхностей широка, охватывает биотехнологию, медицинское оборудование, микроэлектронику, энергетику, авиационную отрасль промышленности [9, 10].

Однако в настоящее время теоретические основы обработки поверхностей металлов лазерным излучением не разработаны на уровне, достаточном для прогностической оценки изменения их функциональных свойств. Эту проблему можно решить при унификации текстур, образуемых на поверхностях металлов, обработанных лазерным излучением, а также при установлении основных закономерностей изменения свойств металлов или сплавов в приповерхностных слоях (их текстуры и элементного состава).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, грант № 18-38-00315 мол_а.

Известно [1–3, 5, 8–12], что после лазерного текстурирования свойства смачиваемости металлов изменяются во времени от гидрофильных до супергидрофобных. Такая инверсия смачивания металлов проявляется не только после обработки лазерным излучением, но и зарегистрирована после нанесения гальванического покрытия на медь с последующим отжигом [13], ультрафиолетового облучения вольфрама (W) [14], титана (Ti) и цинка (Zn) [15], пламенного напыления титана [16]. Сформулировано [12, 17–20] несколько гипотез, объясняющих такое изменение свойств. В условиях текстурирования стали лазерным излучением предполагается [12], что энергия коротковолнового импульса активирует реакцию разложения двуокиси углерода с образованием углерода и активного магнетита [12]. Последний адсорбируется на поверхности. С ростом времени реакция разложения CO_2 продолжается, доля неполярного углерода в приповерхностном слое увеличивается, что в свою очередь инициирует изменение смачивающих свойств. В [17] дается комментарий по поводу того, что объяснение инверсии смачивания переходом из CuO в Cu_2O в [18] противоречит основным положениям теории смачивания, поскольку все оксиды обладают большой поверхностной энергией и являются гидрофильными. В действительности инверсия смачивания связана с внешними загрязнениями текстурированных поверхностей углеводородными соединениями [17]. В [19] поверхность алюминия непосредственно после лазерной обработки пикосекундной длительности проявляла супергидрофильные свойства, что было объяснено авторами [19] ростом толщины оксидной пленки в приповерхностном слое. После текстурирования алюминиевые образцы хранились в разных условиях: в атмосфере газов CO_2 , O_2 , N_2 , в воздушной среде и в воздухе, обогащенном органическими веществами (4-Метилпентановая кислота, 98 %). Установлено, что образцы, помещенные в CO_2 , O_2 , N_2 , по прошествии 30 дней проявляли гидрофильные свойства, а в условиях воздушной среды и среды, обогащенной органическими соединениями, – гидрофобные (контактный угол увеличился до 150°). При этом скорость перехода от гидрофильности к супергидрофобности была значительно выше в среде с газообразными органическими соединениями. Сформулирована гипотеза [19] о механизме инверсии свойств смачиваемости в результате адсорбции органических веществ из атмосферы на поверхность оксидов. В [20] сформулирована гипотеза об изменении смачивающих свойств алюминиевого сплава 7040Т6 после лазерной обработки на основе анализа результатов элементного состава методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Авторы [20] считают, что инверсия смачивания связана с образованием новых функциональных групп неполярного углерода.

На основании анализа [12, 17–20] можно сделать вывод, что все известные гипотезы о преобразовании функциональных свойств поверхностей металлов связаны с изменением элементного состава тонкого приповерхностного слоя. Влияние текстуры (после лазерной обработки поверхности) на функциональные свойства поверхностей металлов не установлено.

Целью работы является установление закономерностей изменения свойств смачиваемости поверхности алюминиево-магниевого сплава, его текстуры и элементного состава после текстурирования наносекундным лазерным излучением в условиях фиксированной плотности энергии, варьирования скорости линейного перемещения луча и количества линий прохода.

1. Методика эксперимента

Текстура на поверхностях алюминиево-магниевого сплава (АМГ6 (мас. %): Al 91.2, Mg 6.8, Mn 0.8, Fe 0.4, Si 0.4, Zn 0.2, Ti 0.1, Cu 0.1) создана с использованием иттербиевого наносекундного импульсного волоконного лазера IPG-Pho-

topics с длиной волны 1064 нм. Аллюминиево-магниевый сплав выбран в связи с его широким применением в различных отраслях техники: строительство, медицина, судостроение, авиация, космическая техника. Во время обработки образцы (подложки), представляющие собой диски диаметром 50 мм и толщиной 5 мм, находились на расстоянии 0,25 м от объектива лазера размером 110×110 мм. Последний с помощью двухосевого гальваносканера перемещался в двух направлениях, параллельных относительно обрабатываемой поверхности. Одиночный лазерный импульс, воздействующий на предварительно полированную поверхность, соответствовал гауссовому профилю $M^2 < 2$, фокусировался в пятно диаметром 60 мкм. При фиксированной плотности энергии в импульсе $14,2 \text{ Дж/см}^2$ (выходная мощность – 8 Вт, частота – 20 кГц, длительность импульса – 100 нс) в условиях изменения скорости линейного перемещения луча от 1 до 4 м/с и количества линий его прохода от 5 до 20 на 1 мм сформировано пять текстур, характеризующихся периодом L (расстоянием между центрами соседних элементов (кратеров) текстуры в продольном (L_1) и поперечном направлениях (L_2)). Текстура сформирована с условием, что $L = L_1 = L_2$. Период созданных текстур: $47,0 \pm 0,4$ мкм; $67,3 \pm 0,5$ мкм; $74,7 \pm 0,2$ мкм; $140,0 \pm 0,5$ мкм и $198,0 \pm 3,0$ мкм.

Трехмерное изображение микрорельефа образцов получено с помощью профилометрического комплекса «Micro Measure 3D station». Сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) JEOL JSM 6000, оснащенный энергодисперсионной системой микроанализа, использовался для определения элементного состава приповерхностного слоя образцов непосредственно перед текстурированием и после него через каждые семь дней до стабилизации свойств смачиваемости (прекращения роста статического контактного угла θ).

Исследования свойств смачиваемости текстурированных лазерным излучением металлических поверхностей проводились с использованием теневой методики на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 1.

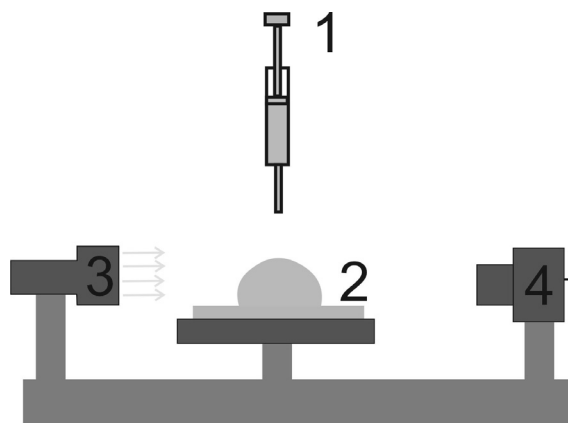


Рис. 1 – Схема экспериментальной установки:

1 – электронный дозатор; 2 – подложка; 3 – телецентрическая труба; 4 – фотокамера

Fig. 1 – A Scheme of the experimental setup:

1 is an electronic dispenser; 2 is a substrate; 3 is a telecentric pipe; 4 is a photo camera

Капля дистиллированной воды объемом 10 мкл дозировалась электронным дозатором 1 на подложку 2. Свет от источника проходил через телецентрическую

трубу 3, преобразовывался в плоскопараллельный и освещал каплю. Теневые фотоизображения, полученные с использованием фотокамеры 4, обрабатывались методом гониометрии («Юнга-Лапласа» [21]). Подробное описание экспериментальной установки приведено в [22].

2. Результаты и обсуждение

Изображения микроструктуры поверхностей алюминиево-магниевого сплава, текстурированных лазерным излучением, и полированной (использовалась для сравнения изменения свойств смачиваемости) представлены на рис. 2.

Из рис. 2, *e* видно, что на полированной поверхности помимо алюминия (серого цвета) хаотично расположены включения (градация цвета от белого до черного), входящие в сплав АМГ6 (магния, магналия, железа, кремния, цинка, титана и меди), также на поверхности расположены углубления и выступы нанометрового размера.

По результатам анализа микротекстур, сформированных лазерной обработкой (рис. 2, *a-d*), можно сделать вывод, что они упорядочены, представляют собой совокупность кратеров округлой формы с агломератами застывших струек и капель металла, осажденного в процессе формирования соседних кратеров. Диаметр кратеров равен $d = 45,5 \pm 1,3$ мкм, их кромки образованы металлом, выдавленным из эпицентра воздействия светового луча ударной волной [23]. С увеличением периода текстуры возрастает площадь необработанной лазерным излучением поверхности.

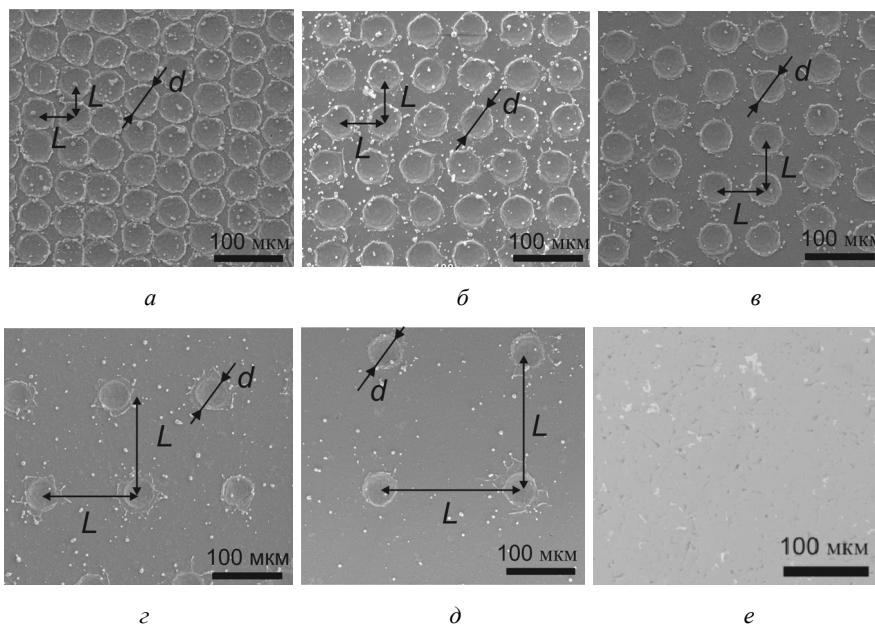


Рис. 2 – Изображения микроструктуры поверхностей:

a – $L = 47,0 \pm 0,4$ мкм; *b* – $L = 67,3 \pm 0,5$ мкм; *c* – $L = 74,7 \pm 0,2$ мкм; *d* – $L = 140,0 \pm 0,5$ мкм; *e* – $L = 198,0 \pm 3,0$ мкм; *f* – полированная

Fig. 2 – Images of surface microstructures:

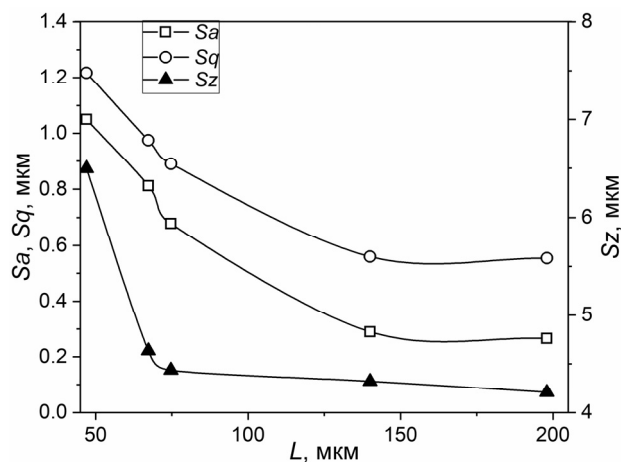
a is $L = 47,0 \pm 0,4$ μm; *b* is $L = 67,3 \pm 0,5$ μm; *c* is $L = 74,7 \pm 0,2$ μm; *d* is $L = 140,0 \pm 0,5$ μm; *e* is $L = 198,0 \pm 3,0$ μm; *f* is polished

Геометрические размеры сформированных текстур оценены количественно (рис. 3), используя трехмерные параметры шероховатости (согласно ISO 25178-2:2012, ISO 25178-2:2012), амплитудные: Sa – среднее арифметическое отклонение поверхности, мкм; Sq – среднее квадратичное отклонение поверхности, мкм; Sz – максимальная высота неровностей поверхности, мкм; Ssk – асимметрия; Sku – эксцесс; гибридные: Sdq – среднее квадратичное отклонение наклонов неровностей поверхности, Sdr – развернутое соотношение пограничной площади поверхности ограниченного масштаба, %.

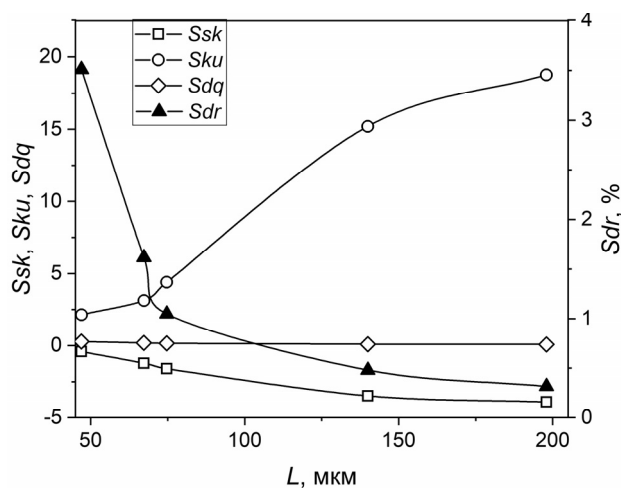
Установлены связи между расположением элементов текстуры в форме кратеров относительно друг друга, средним арифметическим отклонением поверхности Sa и средним квадратичным отклонением поверхности Sq (рис. 3, а). В условиях обработки поверхности алюминий-магниевого сплава АМГ6 лазерным текстурированием при фиксированной плотности энергии в импульсе $14,2 \text{ Дж/см}^2$ и световом пятне 60 мкм создана упорядоченная текстура без наложения кратеров с максимально близким их расположением относительно друг друга. Шероховатость текстуры такой поверхности по оценкам Sa и Sq увеличилась более чем в 15 раз (рис. 3, а) в сравнении с полированной поверхностью ($Sa = 0,061$ мкм и $Sq = 0,077$ мкм). Эти параметры дают представление об общих амплитудных свойствах поверхности, но не позволяют различать пики и впадины, которые влияют на смачиваемость поверхности [22]. Зависимости Sa и Sq от периода текстуры (рис. 3, а) имеют однотипный характер. Известно [24], что параметр Sq не обладает преимуществами перед Sa , поэтому рекомендуется использовать только Sa [24].

Параметр асимметрии Ssk характеризует симметрию высот неровностей относительно средней плоскости. Установлено, что полированной поверхности соответствует $Ssk = 0,33$. Последнее свидетельствует о том, что распределение высот неровностей нанометрового масштаба близко к симметричной форме (абсолютной симметрии соответствует $Ssk = 0$). Положительные значения этого параметра показывают, что на поверхности расположены высокие относительно неглубоких впадин неровности. Отрицательные значения параметра Ssk поверхностей, текстурированных лазерным излучением (рис. 3, б), иллюстрируют асимметрию расположения кратеров относительно друг друга (с увеличением L повышается асимметрия кратеров на поверхности, Ssk уменьшается). Отрицательные значения параметра Ssk также свидетельствуют о том, что на поверхности преобладают глубокие впадины относительно невысоких выступов.

Эксцесс выражает степень «плосковершинности». Полированная поверхность характеризуется $Sku = 3,03$. Последнее показывает, что неровности имеют симметричное распределение (абсолютно симметричное распределение соответствует $Sku = 3,00$). Значение эксцесса поверхности при $L = 47,0$ мкм, равное 2,14, показывает, что вершины кромок ниже гауссовского распределения. Поверхности с периодом 140,0 мкм и 198,0 мкм, более чем 3 раза превышающим размер одиночного элемента текстуры, характеризуются $Sku = 15,2$ и 18,8 соответственно. В таких условиях параметр эксцесса не может быть использован для анализа степени «плосковершинности» распределения. Однако Sku характеризует пространственное расположение высот, которые образованы кромками кратеров. Чем выше значение Sku , тем значительнее асимметрия в расположении высот по поверхности.



а



б

Рис. 3 – Зависимости параметров шероховатости от периода текстуры обработанных поверхностей:

а – S_a , S_q , S_z ; б – S_{sk} , S_{ku} , S_{dq} , S_{dr}

Fig. 3 – Dependences of roughness parameters on the texture period of processed surfaces:

a is S_a , S_q , S_z ; b is S_{sk} , S_{ku} , S_{dq} , S_{dr}

Параметр S_z , характеризующий экстремальную высоту поверхностей, текстурированных лазерным излучением, на порядок выше этой величины полированной поверхности ($S_z = 0,559$ мкм). С увеличением L значение S_z уменьшается экспоненциально (рис. 3, а).

Гибридный параметр S_{dq} является мерой отклонения поверхности от идеально гладкой, для полированной он равен 0,0134. У поверхностей, текстурированных лазерным излучением, среднее квадратичное отклонение наклонов неровностей поверхности достигает 0,27 (поверхность с $L = 47,0$ мкм). Параметр S_{dr} характеризует приращение площади относительно идеально гладкой поверхности

в процентах, для полированной – $Sdr = 0,009\%$. Оба параметра увеличиваются с уменьшением периода текстуры, что связано с увеличением количества элементов на единицу площади и отклонения поверхности от гладкой. Однако даже в случае периода текстуры $L = 47,0$ мкм приращение площади незначительно и не превышает 4 %. Последнее связано с небольшой глубиной кратеров (3,5 мкм).

В проведенных экспериментах установлено, что статический контактный угол (СКУ) на полированной поверхности сплава АМГ6 составил $\theta = 88,1 \pm 2,6^\circ$. Абсолютная погрешность определения θ не превышала $2,6^\circ$ (включает погрешность метода Юнга–Лапласа и случайную ошибку). Непосредственно после текстурирования зарегистрировано полное смачивание поверхности с периодом текстуры 47,0 мкм (капля трансформировалась в тонкую пленку). На поверхностях с $L = 67,3$ мкм, 74,7 мкм, 140,0 мкм и 198,0 мкм СКУ непосредственно после текстурирования уменьшился до $59,3, 63,4, 64,4$ и $65,0^\circ$ соответственно. С течением времени свойства смачиваемости ухудшались (контактный угол увеличивался (рис. 4)). Через 7–60 дней (в зависимости от периода) рост контактного угла прекращался, свойства смачиваемости не изменялись.

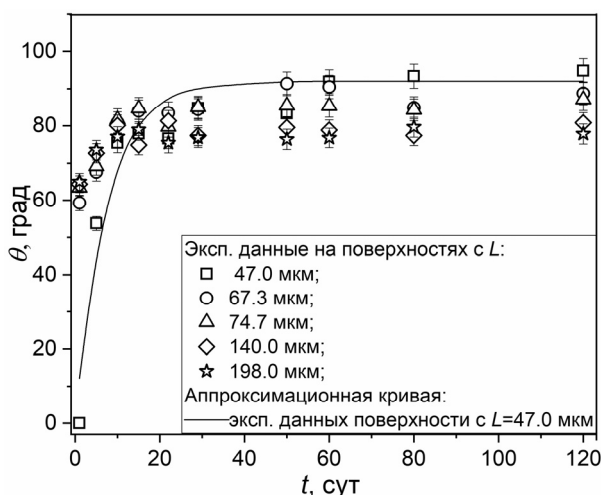


Рис. 4 – Зависимости изменения статического контактного угла во времени после лазерного текстурирования поверхностей алюминий-магниевого сплава АМГ6

Fig. 4 – Time dependences of a static contact angle change on exposure time measured on processed aluminum-magnesium surfaces

Изменение контактных углов во времени описывается экспоненциальной зависимостью вида [15]

$$\theta = \theta_{уст} (1 - e^{-t/a}), \quad (1)$$

где $\theta_{уст}$ – установившееся значение контактного угла на текстурированной поверхности; a – константа, характеризующая время, за которое значение контактного угла превысит 50 % от установившегося значения.

Значения установившихся углов $\theta_{уст}$, времени их стабилизации t и констант a сведены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Параметры экспоненциальной зависимости (1)
Parameters of exponential dependence (1)

Поверхность с периодом L , мкм	47,0	67,3	74,7	140,0	198,0
$\theta_{уст}$, град	92,1	84,7	84,2	77,8	76,7
t , сут.	60	19	15	9	7
a , сут.	7,10	0,82	0,45	0,58	0,53

На рис. 5 представлены зависимости статических контактных углов, измеренных после лазерного текстурирования, от периода текстуры поверхностей.

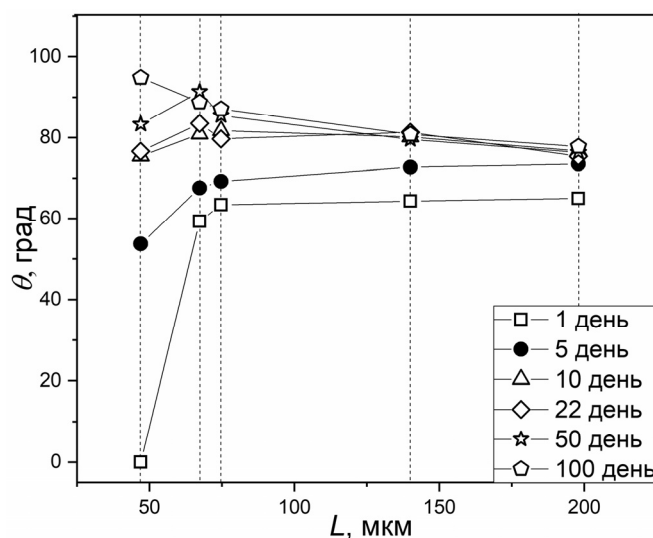


Рис. 5 – Зависимости статического контактного угла от периода текстуры поверхностей, обработанных лазерным излучением

Fig. 5 – Dependences of a static contact angle on the texture period of surfaces processed by laser radiation

По результатам анализа рис. 5 установлено, что изменение свойств смачиваемости (рост контактного угла) наиболее интенсивно происходит в первые пять дней после текстурирования. Изменяя расстояние между центрами соседних элементов (кратеров) текстуры, можно улучшить свойства смачиваемости до состояния полного растекания жидкости в пленку. С ростом периода текстуры свойства смачиваемости ухудшаются (статический контактный угол увеличивается). Аналогичные результаты получены [25] в условиях текстурирования фемтосекундным титан-сапфировым лазером поверхностей нержавеющей стали. Установлено, что с уменьшением расстояния между углублениями свойства смачиваемости улучшаются [25].

Известно [26], что увеличение шероховатости приводит к уменьшению контактного угла на гидрофильных и его росту на гидрофобных поверхностях. Последнее согласуется с уравнением Венцеля [26] ($\cos \theta_r = r \cos \theta$, где θ_r – статический угол на шероховатой поверхности; r – параметр шероховатости, характеризующий отношение фактической площади к ее проекции; θ – статический угол

на гладкой поверхности). После лазерного текстурирования параметр r увеличивается с уменьшением периода текстуры. Следовательно, экспериментально полученные зависимости статического контактного угла от периода текстуры поверхностей (рис. 5) согласуются с выводами, сделанными на основе уравнения Венцеля. Стоит отметить, что на поверхностях с менее плотным расположением элементов ($L = 140$ мкм и 198 мкм) рост контактного угла во времени происходит быстрее (рис. 5).

Известно [5], что на контактный угол влияют текстура (шероховатость) и химический состав поверхности. При лазерной обработке сплава АМГ6 инициировалась реакция окисления, изменилось процентное содержание элементного состава приповерхностного слоя сплава.

Установлено, что элементный состав приповерхностного слоя изменяется непосредственно после лазерного текстурирования. С течением времени после текстурирования элементный состав остается постоянным. Серия анализов элементного состава выполнена при идентичных условиях в течение 60 дней. Содержание кислорода в тонком слое полированной поверхности не превышало 0,7 % (мас.), на текстурированных поверхностях оно неравномерно по поверхности и зависит от периода текстуры L (рис. 6). В центре кратера доля кислорода меньше, чем на его кромках. Аналогичный результат был зарегистрирован [27] в условиях образования текстуры лазерным излучением на поверхностях образцов из титана Ti6Al4V и алюминия AA2024-T3. В [28] предложена гипотеза, что доля кислорода в углублении ниже по причине образования плазмы, которая защищает дно углубления от воздействия окружающей среды.

Также установлено, что с увеличением L доля кислорода уменьшается (рис. 6). Можно предположить, что последнее связано с термохимическим механизмом преобразований в металле приповерхностного слоя образца после лазерного облучения движущимся световым пятном. С момента образования на поверхности светового пятна инициируется процесс нагрева с последующим плавлением и испарением металла. Капли образованной жидкой фазы удаляются из зоны воздействия излучения за счет действия сил, обусловленных избыточным давлением паров металла [29]. Начинается абляция [29], приводящая к формообразованию кратера. Испарившийся металл конденсируется с последующей кристаллизацией по периферии светового пятна, образуя кромку кратера, а также в виде капель, вытянутых в радиальном направлении от эпицентра облучения. Стоит отметить, что на формообразование элемента текстуры в форме кратера может влиять и ударная волна, инициированная световым излучением [23]. Механизмами возникновения таких волн могут быть как расширение металла вследствие его быстрого нагрева до сверхвысоких температур, так и последствия испарения материала с поверхности образца. В результате металл в области воздействия светового пятна получает импульс отдачи, направленный от поверхности в глубь материала [30]. Расплав металла за счет такого импульса выдавливается от центра светового пятна к периферии. Можно сформулировать гипотезу о том, что последнее является причиной образования кромки кратера. При воздействии лазерного излучения на поверхность металла инициируется процесс окисления. Количество адсорбированного кислорода в приповерхностном слое сплава зависит от температуры и времени нагрева металла [31]. С увеличением температуры содержание адсорбированного кислорода растет.

Температура поверхности металла помимо параметров излучения зависит от условий движения светового пятна по поверхности. Если время линейного перемещения луча будет больше эффективного времени воздействия луча на поверхность, то тепло, аккумулированное металлом при создании соседнего кратера, не

успевают рассеяться из зоны облучения последующего кратера. Последнее является причиной большего содержания кислорода в приповерхностном слое образца (рис. 6) с меньшим периодом текстуры.

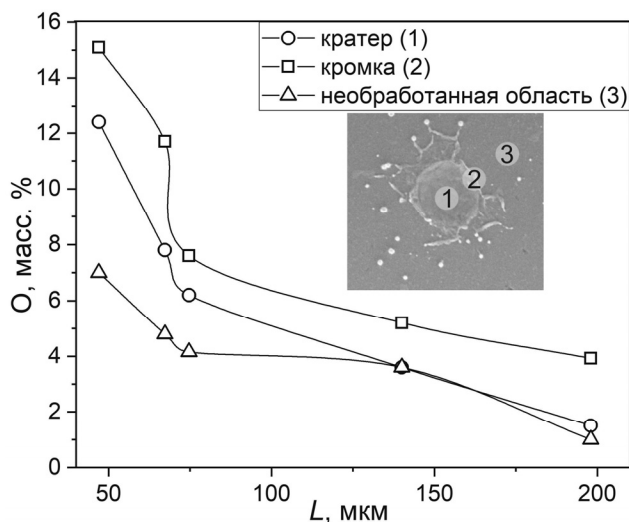


Рис. 6 – Зависимости содержания кислорода от периода текстуры поверхностей, обработанных лазерным излучением

Fig. 6 – Dependences of oxygen content on the texture period of surfaces processed by laser radiation

Можно предположить, что большее содержание кислорода в кромке кратера (рис. 6) по сравнению с центром зависит от механизма формообразования кратера. Металл в центре лазерного луча нагревается до более высоких температур, чем по периметру. Кромка кратера образована расплавом металла, перемещенным из центра кратера под действием давления, обусловленного ударной волной.

На поверхностях присутствуют области, не обработанные лазерным излучением (см. рис. 2). По результатам анализа элементного состава в металле на таких участках установлено более высокое по сравнению с полированной поверхностью (0,7 %) содержание кислорода (рис. 6), достигающее 7 %. Последнее можно объяснить тем, что металл в этих областях нагревается до высоких температур в результате теплопроводности. Также содержание кислорода в необработанной области сплава зависит от периода L , что связано с длительностью периода релаксации теплового поля (время, за которое остывает металл от предшествующего импульса) при формировании текстуры. В экспериментах частота была постоянной (20 кГц). Количество импульсов в единичной области за определенное время контролировалось скоростью перемещения луча лазера и количеством линий прохода. Увеличение количества лазерных импульсов в единичной области за определенное время (вследствие уменьшения скорости перемещения луча и увеличения количества линий прохода) приводило к увеличению температуры металла.

При сопоставлении результатов анализа изменения СКУ (см. рис. 4) и содержания кислорода (рис. 6) после текстурирования можно сделать следующий вывод. На поверхностях с меньшим содержанием кислорода в приповерхностном слое (с периодом 140,0 мкм и 198,0 мкм) контактный угол стабилизируется быстрее.

Заключение

Лазерное текстурирование является технически простым и малозатратным методом получения упорядоченных текстур в форме кратеров. Изменяя период текстуры, сформированной лазерным излучением на алюминиево-магниево-магниево-магниево сплаве, можно изменить не только шероховатость поверхности в широких диапазонах варьирования параметров (Sa , Sq , Sz , Ssk , Sku , Sdq , Sdr), характеризующих ее, но и свойства смачиваемости (до супергидрофильности).

После лазерного текстурирования поверхностей алюминиево-магниевого сплава АМГ6 свойства смачиваемости изменяются во времени. Скорость их изменения наиболее интенсивна в первые пять дней после текстурирования и зависит от плотности энергии в импульсе и периода текстуры. Изменяя расстояние между центрами соседних элементов (кратеров) текстуры, можно улучшить свойства смачиваемости до состояния полного смачивания (супергидрофильности) поверхности. С ростом периода текстуры свойства смачиваемости ухудшаются (статический контактный угол увеличивается). С менее плотным расположением элементов (кратеров) текстуры рост контактного угла во времени происходит быстрее.

Элементный состав приповерхностного слоя сплава изменяется непосредственно после лазерного текстурирования, его изменений во времени после лазерной обработки не происходит. Содержание кислорода неравномерно в приповерхностном слое текстурированного сплава и зависит от периода текстуры. С увеличением последнего доля кислорода уменьшается. В центре кратера доля кислорода меньше, чем на его кромках. В местах, где поверхность не была подвержена прямому воздействию лазерного излучения, но находящейся вблизи эпицентров облучения, содержание кислорода в приповерхностном слое выросло по сравнению с полированной (необработанной лазерным излучением) поверхностью. Сформулирована гипотеза о том, что неравномерное содержание кислорода по поверхности после ее лазерного текстурирования связано не только с термохимическим механизмом преобразований в металле приповерхностного слоя, но и с длительностью периода релаксации теплового поля, а также с механизмом формообразования элемента текстуры (кратера). Последний связан с ударной волной, инициированной световым излучением, которая является следствием как расширения металла при его нагреве до сверхвысоких температур, так и испарения материала с поверхности.

Обнаружена зависимость статического контактного угла от содержания кислорода в приповерхностном слое сплава. На поверхностях с меньшим содержанием кислорода в тонком слое стабилизация свойств смачиваемости происходит быстрее.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fabrication of nano-structured super-hydrophobic film on aluminum by controllable immersing method / R. Wu, S. Liang, A. Pan, Z. Yuan, Y. Tang, X. Tan, D. Guan, Y. Yu // *Applied Surface Science*. – 2012. – Vol. 258. – P. 5933–5937. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2011.10.029.
2. Laser textured superhydrophobic surfaces and their applications for homogeneous spot deposition / V.D. Ta, A. Dunn, T. Wasley, J. Li, R.W. Kay, J. Stringer, P. J. Smith, E. Esenturk, C. Connaughton, J.D. Shephard // *Applied Surface Science*. – 2016. – Vol. 365. – P. 153–159. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.01.019.
3. Anti-biofouling superhydrophobic surface fabricated by picosecond laser texturing of stainless steel / K. Sun, H. Yanga, W. Xue, A. He, D. Zhu, W. Liu, K. Adeyemi, Y. Cao // *Applied Surface Science*. – 2018. – Vol. 436. – P. 263–267. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.12.012.

4. Investigation on bacterial adhesion and colonisation resistance over laser-machined micro patterned surfaces / A. Chebolu, B. Laha, M. Ghosh, Nagahanumaiah // *Micro and Nano Letters*. – 2013. – Vol. 8. – P. 280–283. – DOI: 10.1049/mnl.2013.0109.
5. **Min T.** Design and fabrication of super-hydrophobic surfaces by laser micro/nano-processing: Ph.D. Thesis. – Singapore: National University of Singapore, 2012. – 142 p.
6. Nanosecond laser micro- and nanotexturing for the design of a superhydrophobic coating robust against long-term contact with water, cavitation, and abrasion / A.M. Emelyanenko, F.M. Shagieva, A.G. Domantovsky, L.B. Boinovich // *Applied Surface Science*. – 2015. – Vol. 332. – P. 513–517. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.01.202.
7. Not simply repel water: the diversified nature of corrosion protection by superhydrophobic coatings / L.B. Boinovich, A.M. Emelyanenko, A.D. Modestov, A.G. Domantovsky, K.A. Emelyanenko // *Mendeleev Communications*. – 2017. – Vol. 27. – P. 254–256. – DOI: 10.1016/j.mencom.2017.05.012.
8. **Vorobyev A.Y., Guo C.** Multifunctional surfaces produced by femtosecond laser pulses // *Journal of Applied Physics*. – 2015. – Vol. 117. – P. 033103-1–033103-5. – DOI: 10.1063/1.4905616.
9. **Gamaly E.G.** Femtosecond laser-matter interaction: theory, experiments and applications. – Singapore: Pan Stanford Publishing, 2011. – 350 p.
10. Synergistic effect of superhydrophobicity and oxidized layers on corrosion resistance of aluminum alloy surface textured by nanosecond laser treatment / L.B. Boinovich, A.M. Emelyanenko, A.D. Modestov, A.G. Domantovsky, K.A. Emelyanenko // *ACS Applied Materials and Interfaces*. – 2015. – Vol. 7. – P. 19500–19508. – DOI: 10.1021/acsami.5b06217.
11. Superhydrophobic surfaces fabricated by femtosecond laser with tunable water adhesion: from lotus leaf to rose petal / J. Long, P. Fan, D. Gong, D. Jiang, H. Zhang, L. Li, M. Zhong // *ACS Applied Materials and Interfaces*. – 2015. – Vol. 7. – P. 9858–9865. – DOI: 10.1021/acsami.5b01870.
12. Surface texturing of aluminium alloy AA2024-T3 by picosecond laser: effect on wettability and corrosion properties / J.I. Ahuir-Torres, M.A. Arenas, W. Perrie, G. Dearden, J. de Damborenea // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 321. – P. 279–291. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.04.056.
13. Combined surface hardening and laser patterning approach for functionalising stainless steel surfaces / A. Garcia-Giron, J.-M. Romano, Y. Liang, B. Dashtbozorg, H. Dong, P. Pencheva, S.S. Dimov // *Applied Surface Science*. – 2018. – Vol. 439. – P. 516–524. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.01.012.
14. Triangular laser-induced submicron textures for functionalising stainless steel surfaces / J.-M. Romano, A. Garcia-Giron, P. Penchev, S. Dimov // *Applied Surface Science*. – 2018. – Vol. 440. – P. 162–169. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.01.086.
15. **Kietzig A.-M., Hatzikiriakos S.G., Englezos P.** Patterned superhydrophobic metallic surfaces // *Langmuir*. – 2009. – Vol. 25. – P. 4821–4827. – DOI: 10.1021/la8037582.
16. Controlling wettability and photochromism in a dual-responsive tungsten oxide film / S. Wang, X. Feng, J. Yao, L. Jiang // *Angewandte Chemie International Edition*. – 2006. – Vol. 45. – P. 1264–1267. – DOI: 10.1002/anie.200502061.
17. Comment on «Nanosecond laser textured superhydrophobic metallic surfaces and their chemical sensing applications» by Duong V. Ta, Andrew Dunn, Thomas J. Wasley, Robert W. Kay, Jonathan Stringer, Patrick J. Smith, Colm Connaughton, Jonathan D. Shephard (*Appl. Surf. Sci.* 357 (2015) 248–254) / L.B. Boinovich, A.M. Emelyanenko, K.A. Emelyanenko, A.G. Domantovsky, A.A. Shiryayev // *Applied Surface Science*. – 2016. – Vol. 379. – P. 111–113. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.04.056.
18. **Wang G., Zhang T.-Y.** Oxygen adsorption induced superhydrophilic-to-superhydrophobic transition on hierarchical nanostructured CuO surface // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2012. – Vol. 377. – P. 438–441. – DOI: 10.1016/j.jcis.2012.03.035.
19. Superhydrophilicity to superhydrophobicity transition of picosecond laser microstructured aluminum in ambient air / J. Long, M. Zhong, H. Zhang, P. Fan // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2015. – Vol. 441. – P. 1–9. – DOI: 10.1016/j.jcis.2014.11.015.
20. Time dependency of the hydrophilicity and hydrophobicity of metallic alloys subjected to femtosecond laser irradiations / P. Bizi-bandoki, S. Valette, E. Audourard, S. Benayoun //

- Applied Surface Science. – 2013. – Vol. 273. – P. 399–407. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.02.054.
21. **Hoorfar M., Neumann A.W.** Recent progress in axisymmetric drop shape analysis (ADSA) // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2006. – Vol. 121. – P. 25–49. – DOI: 10.1016/j.cis.2006.06.001.
 22. Spreading of a distilled water droplet over polished and laser-treated aluminum surfaces / E.G. Orlova, D.V. Feoktistov, G.V. Kuznetsov, K.O. Ponomarev // *European Journal of Mechanics B/Fluids*. – 2018. – Vol. 68. – P. 118–127. – DOI: 10.1016/j.euromechflu.2017.12.002.
 23. Генерация ударных волн при взаимодействии мощного лазерного излучения с поликристаллическими мишенями / И.Н. Бурдонский, А.Ю. Гольцов, А.Г. Леонов, К.Н. Макаров, И.С. Тимофеев, В.Н. Юфа // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез*. – 2013. – Т. 36. – С. 8–18.
 24. **Thomas T.R.** *Rough surfaces*. – 2nd ed. – London: Imperial College Press, 1999. – 279 p.
 25. **Sarbada S., Shin Y.C.** Superhydrophobic contoured surfaces created on metal and polymer using a femtosecond laser // *Applied Surface Science*. – 2017. – Vol. 405. – P. 465–475. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.02.019.
 26. **Wenzel R.N.** Resistance of solid surfaces to wetting by water // *Industrial and Engineering Chemistry*. – 1936. – Vol. 28. – P. 988–994. – DOI: 10.1021/ie50320a024.
 27. Influence of laser parameters in surface texturing of Ti6Al4V and AA2024-T3 alloys / J.I. Ahuir-Torres, M.A. Arenas, W. Perrie, J. de Damborenea // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2018. – Vol. 103. – P. 100–109. – DOI: 10.1016/j.optlaseng.2017.12.004.
 28. Chemical composition of dome-shaped structures grown on titanium by multi-pulse Nd:YAG laser irradiation / E. Gyorgy, A. Perez del Pino, P. Serra, J.L. Morenza // *Applied Surface Science*. – 2004. – Vol. 222. – P. 415–422. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2003.09.010.
 29. **Либенсон М.Н.** Поверхностные электромагнитные волны в оптике // *Соросовский образовательный журнал*. – 1996. – № 11. – С. 103–110.
 30. **Голубев В.С., Лебедев Ф.В.** *Физические основы технологических лазеров*. – М.: Высшая школа, 1987. – 191 с. – (Лазерная техника и технология; кн. 1).
 31. Oxidation of nano-sized aluminum powders / A.B. Vorozhtsov, M. Lerner, N. Rodkevich, H. Nie, A. Abraham, M. Schoenitzc, E.L. Dreizin // *Thermochimica Acta*. – 2016. – Vol. 636. – P. 48–56. – DOI: 10.1016/j.tca.2016.05.003.

WETTING OF ALUMINUM-MAGNESIUM ALLOY SURFACES AFTER LASER PROCESSING

Feoktistov D.V.¹, Orlova E.G.²

¹*Institute of Thermophysics Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation*

²*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation*

The order dimple-like textures were created on the aluminum-magnesium alloy surfaces by nanosecond laser radiation under conditions of constant fluence by varying the beam linear speed and the number of lines per 1 mm. Three-dimensional roughness parameters and their dependences on parameters of laser processing of the aluminum-magnesium alloy were defined. Wetting of surfaces was estimated by a static contact angle measured by using the equipment of the shadow optic method. Wetting of aluminum-magnesium alloy surfaces enhances immediately after laser texturing, but it gets worse with time (static contact angle increases). The uneven oxygen content over the textured surface is hypothesized to be connected not only with the thermochemical mechanism of transformations in the near surface layer metal but also with the mechanism of the texture element formation (dimple formation). We found out that a static contact angle stabilizes faster on surfaces with lower oxygen content in the surface layer.

Keywords: wetting, static contact angle, texture, laser radiation, aluminum-magnesium alloy, oxygen content.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-18-33

REFERENCES

1. Wu R., Liang S., Pan A., Yuan Z., Tang Y., Tan X., Guan D., Yu Y. Fabrication of nanostructured super-hydrophobic film on aluminum by controllable immersing method. *Applied Surface Science*, 2012, vol. 258, pp. 5933–5937. DOI: 10.1016/j.apsusc.2011.10.029.
2. Ta V.D., Dunn A., Wasley T., Li J., Kay R.W., Stringer J., Smith P.J., Esenturk E., Connaughton C., Shephard J.D. Laser textured superhydrophobic surfaces and their applications for homogeneous spot deposition. *Applied Surface Science*, 2016, vol. 365, pp. 153–159. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.01.019.
3. Sun K., Yanga H., Xue W., He A., Zhu D., Liu W., Adeyemi K., Cao Y. Anti-biofouling superhydrophobic surface fabricated by picosecond laser texturing of stainless steel. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 436, pp. 263–267. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.12.012.
4. Chebolu A., Laha B., Ghosh M., Nagahanumaiah. Investigation on bacterial adhesion and colonisation resistance over laser-machined micro patterned surfaces. *Micro and Nano Letters*, 2013, vol. 8, pp. 280–283. DOI: 10.1049/mnl.2013.0109.
5. Min T. *Design and fabrication of super-hydrophobic surfaces by laser micro/nano-processing*. Ph.D. Thesis. Singapore, National University of Singapore, 2012. 142 p.
6. Emelyanenko A.M., Shagieva F.M., Domantovsky A.G., Boinovich L.B. Nanosecond laser micro- and nanotexturing for the design of a superhydrophobic coating robust against long-term contact with water, cavitation, and abrasion. *Applied Surface Science*, 2015, vol. 332, pp. 513–517. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.01.202.
7. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M., Modestov A.D., Domantovsky A.G., Emelyanenko K.A. Not simply repel water: the diversified nature of corrosion protection by superhydrophobic coatings. *Mendeleev Communications*, 2017, vol. 27, pp. 254–256. DOI: 10.1016/j.mencom.2017.05.012.
8. Vorobyev A.Y., Guo C. Multifunctional surfaces produced by femtosecond laser pulses. *Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 117, pp. 033103-1–033103-5. DOI: 10.1063/1.4905616.
9. Gamaly E.G. *Femtosecond laser-matter interaction: theory, experiments and applications*. Singapore, Pan Stanford Publishing, 2011. 350 p.
10. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M., Modestov A.D., Domantovsky A.G., Emelyanenko K.A. Synergistic effect of superhydrophobicity and oxidized layers on corrosion resistance of aluminum alloy surface textured by nanosecond laser treatment. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2015, vol. 7, pp. 19500–19508. DOI: 10.1021/acsami.5b06217.
11. Long J., Fan P., Gong D., Jiang D., Zhang H., Li L., Zhong M. Superhydrophobic surfaces fabricated by femtosecond laser with tunable water adhesion: from lotus leaf to rose petal. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2015, vol. 7, pp. 9858–9865. DOI: 10.1021/acsami.5b01870.
12. Ahuir-Torres J.I., Arenas M.A., Perrie W., Dearden G., Damborenea J. de. Surface texturing of aluminium alloy AA2024-T3 by picosecond laser: Effect on wettability and corrosion properties. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 321, pp. 279–291. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.04.056.
13. Garcia-Giron A., Romano J.-M., Liang Y., Dashtbozorg B., Dong H., Pencheva P., Dimov S.S. Combined surface hardening and laser patterning approach for functionalising stainless steel surfaces. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 439, pp. 516–524. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.01.012.
14. Romano J.-M., Garcia-Giron A., Penchev P., Dimov S. Triangular laser-induced submicron textures for functionalising stainless steel surfaces. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 440, pp. 162–169. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.01.086.
15. Kietzig A.-M., Hatzikiriakos S.G., Englezos P. Patterned superhydrophobic metallic surfaces. *Langmuir*, 2009, vol. 25, pp. 4821–4827. DOI: 10.1021/la8037582.
16. Wang S., Feng X., Yao J., Jiang L. Controlling wettability and photochromism in a dual-responsive tungsten oxide film. *Angewandte Chemie International Edition*, 2006, vol. 45, pp. 1264–1267. DOI: 10.1002/anie.200502061.
17. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M., Emelyanenko K.A., Domantovsky A.G., Shiryayev A.A. Comment on «Nanosecond laser textured superhydrophobic metallic surfaces and their chemical

- sensing applications» by Duong V. Ta, Andrew Dunn, Thomas J. Wasley, Robert W. Kay, Jonathan Stringer, Patrick J. Smith, Colm Connaughton, Jonathan D. Shephard (Appl. Surf. Sci. 357 (2015) 248–254). *Applied Surface Science*, 2016, vol. 379, pp. 111–113. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.04.056.
18. Wang G., Zhang T.-Y. Oxygen adsorption induced superhydrophilic-to-superhydrophobic transition on hierarchical nanostructured CuO surface. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2012, vol. 377, pp. 438–441. DOI: 10.1016/j.jcis.2012.03.035.
 19. Long J., Zhong M., Zhang H., Fan P. Superhydrophilicity to superhydrophobicity transition of picosecond laser microstructured aluminum in ambient air. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2015, vol. 441, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.jcis.2014.11.015.
 20. Bizi-bandoki P., Valette S., Audourard E., Benayoun S. Time dependency of the hydrophilicity and hydrophobicity of metallic alloys subjected to femtosecond laser irradiations. *Applied Surface Science*, 2013, vol. 273, pp. 399–407. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.02.054.
 21. Hoorfar M., Neumann A.W. Recent progress in axisymmetric drop shape analysis (ADSA). *Advances in Colloid and Interface Science*, 2006, vol. 121, pp. 25–49. DOI: 10.1016/j.jcis.2006.06.001.
 22. Orlova E.G., Feoktistov D.V., Kuznetsov G.V., Ponomarev K.O. Spreading of a distilled water droplet over polished and laser-treated aluminum surfaces. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 2018, vol. 68, pp. 118–127. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2017.12.002.
 23. Burdonsky I.N., Golsov A.Yu., Leonov A.G., Makarov K.N., Timofeev I.S., Yufa V.N. Generatsiya udarnykh voln pri vzaimodeistvii moshchnogo lazernogo izlucheniya s polikristallicheskimishishenyami [Shock wave generation in the high-power laser interaction with polycrystalline targets]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Termoyadernyi sintez – Problems of Atomic Science and Engineering. Series “Thermonuclear Fusion”*, 2013, vol. 36, pp. 8–18.
 24. Thomas T.R. *Rough surfaces*. 2nd ed. London, Imperial College Press, 1999. 279 p.
 25. Sarbada S., Shin Y.C. Superhydrophobic contoured surfaces created on metal and polymer using a femtosecond laser. *Applied Surface Science*, 2017, vol. 405, pp. 465–475. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.02.019.
 26. Wenzel R.N. Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1936, vol. 28, pp. 988–994. DOI: 10.1021/ie50320a024.
 27. Ahuir-Torres J.I., Arenas M.A., Perrie W., Damborenea J. de. Influence of laser parameters in surface texturing of Ti6Al4V and AA2024-T3 alloys. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, vol. 103, pp. 100–109. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2017.12.004.
 28. Gyorgy E., Perez del Pino A., Serra P., Morenza J.L. Chemical composition of dome-shaped structures grown on titanium by multi-pulse Nd: YAG laser irradiation. *Applied Surface Science*, 2004, vol. 222, pp. 415–422. DOI: 10.1016/j.apsusc.2003.09.010.
 29. Libenson M.N. Poverkhnostnye elektromagnitnye volny v optike [Surface electromagnetic waves in optics *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal – Soros Education Journal*, 1996, no. 11, pp. 103–110.
 30. Golubev V.S., Lebedev F.V. *Fizicheskie osnovy tekhnologicheskikh lazerov* [Physical bases of technological lasers]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1987. 191 p.
 31. Vorozhtsov A.B., Lerner M., Rodkevich N., Nie H., Abraham A., Schoenitz M., Dreizin E.L. Oxidation of nano-sized aluminum powders. *Thermochimica Acta*, 2016, vol. 636, pp. 48–56. DOI: 10.1016/j.tca.2016.05.003.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Феоктистов Дмитрий Владимирович – родился в 1983 году, канд. техн. наук, научный сотрудник Научно-исследовательского сектора Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Область научных интересов: теплофизика, поверхностные явления, текстурирование материалов, смачивание, растекание и испарение капель и тонких пленок. Опубликовано более 39 научных работ. (Адрес: 634050, Россия, Томск, ул. Усова, 7. E-mail: fdv@tpu.ru).

Feoktistov Dmitry Vladimirovich (b. 1983) – Candidate of Sciences (Eng.), a research fellow in the Research Sector, Institute of Thermophysics Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. His research interests are currently focused on thermal physics, interfacial phenomena, material texturing, wetting, spreading and evaporation of drops and thin films. He is the author of more than 39 scientific papers. (Address: 7, Usova Street, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: fdv@tpu.ru).



Орлова Евгения Георгиевна – родилась в 1991 году, ассистент Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета. Область научных интересов: теплофизика, поверхностные явления, текстурирование материалов, смачивание, растекание. Опубликовано более 36 научных работ. (Адрес: 634050, Россия, Томск, ул. Усова, 7. E-mail: lafleur@tpu.ru).

Orlova Evgeniya Georgievna (b. 1991) – an assistant in the Butakov Research Center, National Research Tomsk Polytechnic University. Her research interests are currently focused on thermal physics, interfacial phenomena, material texturing, wetting, and spreading. She is the author of more than 36 scientific papers. (Address: 7, Usova Street, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: lafleur@tpu.ru).

*Статья поступила 13 марта 2019
Received March 13, 2019*

To Reference:

Feoktistov D.V., Orlova E.G. Smachivanie poverkhnostei alyuminievo-magnievogo splava posle obrabotki lazernym izlucheniem [Wetting of aluminum-magnesium alloy surfaces after laser processing]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2019, no. 3 (44), pp. 18–33. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-18-33.

УДК 621.396.677

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ 4-ЛУЧЕВОЙ ПЕЧАТНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ
АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С МАТРИЦЕЙ БАТЛЕРА****А.П. Горбачев, Ю.Н. Паршин***Новосибирский государственный технический университет*

Данная работа посвящена анализу, расчету и проектированию печатной диаграммообразующей матрицы Батлера 4×4, входящей в состав 4-лучевой ФАР, предназначенной для работы на частоте 2,2 ГГц. Разработка модели велась стратегией «от простого к сложному» в следующей последовательности: трехдецибелный направленный ответвитель; узел для сглаживания негативного воздействия пересечения соединительных полосковых линий с противоположных сторон платы, разводка под антенное полотно, матрица Батлера 4×4, излучатель и 4-лучевая фазированная антенная решетка.

Ключевые слова: матрица Батлера, направленный ответвитель, фазированная антенная решетка, излучатель.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-34-47

Введение

Известно, что многолучевые фазированные антенные решетки (ФАР) весьма широко применяются в радиолокационных и инфокоммуникационных системах диапазона сверхвысоких частот (СВЧ) для обзора окружающего пространства и обмена информацией с корреспондентами, координаты которых имеют жесткую привязку к территориальному районированию страны (офисы фирм в городах, вахтовые поселки нефтяников и газовиков, базовые лагеря геологоразведочных партий и т. п.) [1, 2]. Несмотря на значительный прогресс в проектировании и серийном выпуске таких ФАР, внимание к их модернизации и совершенствованию не ослабевает с течением времени [3–5], причем в этом процессе существенное значение имеет всемерное сокращение габаритов и массы многолучевой ФАР. В значительной мере этой тенденции отвечает печатное полосковое и микрополосковое исполнение элементов и узлов антенной решетки. В связи с этим в настоящей работе представляются основные результаты эскизного проектирования 4-лучевой ФАР диапазона 2...3 ГГц, разработанной в рамках реализации Договора о научно-техническом сотрудничестве № 25/304 между НГТУ и АО «Ордена Трудового Красного Знамени Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры» (АО «ВНИИРА») во второй половине 2017 года. В 2018 году эта ФАР была доработана за счет установки модифицированных печатных дипольных излучателей, архитектура и топология которых описаны в работе [6], причем сама работа [6] была оформлена также в рамках вышеупомянутого Договора с АО «ВНИИРА».

1. Расчет ключевых геометрических размеров топологии 4-лучевой ФАР с позиций системного подхода

Проектируемая ФАР, структурная схема которой представлена на рис. 1, формирует в верхней полусфере четыре луча (четыре диаграммы направленности), каждый из которых связан с соответствующим входом i ($i = 1, \dots, N = 4$) матрицы [диаграммообразующего устройства (ДООУ)] Батлера, обведенной на рис. 1 штриховыми линиями.

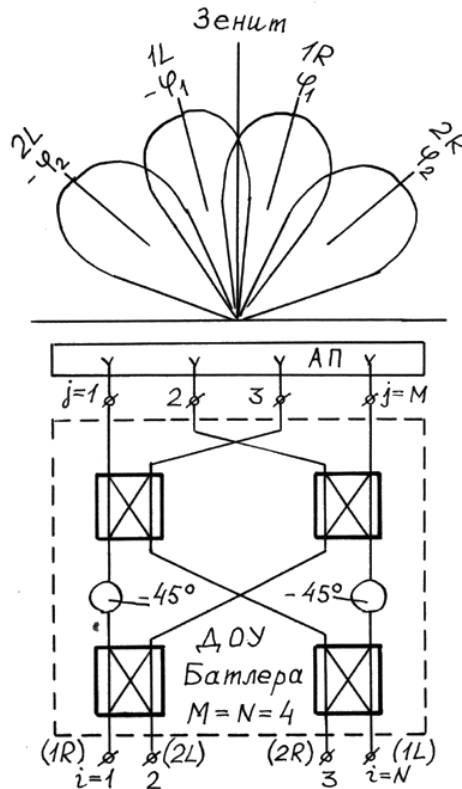


Рис. 1 – Структурная схема проектируемой ФАР

Fig. 1 – Structure diagram of the designed phased antenna array

Это устройство содержит два ряда из двух 3-децибельных четвертьволновых направленных ответвителей (НО) и двух фазовращателей (ФВ, точнее: фазозадерживателей) с задержкой по фазе (-45°) , реализованных на диэлектрической подложке из соединенных должным образом между собой полосковых линий передачи.

Выходы j ($j = 1, \dots, M = 4$) матрицы соединены такими же линиями передачи со входами печатных дипольных излучателей, объединенных на той же диэлектрической подложке в антенное полотно (АП), обведенное на рис. 1 сплошными линиями. В результате разность фаз ψ_i между возбуждающими токами соседних дипольных излучателей зависит от номера входа и составляет:

$$\begin{aligned}
 i = 1, \quad \psi_1 &= -45^\circ \text{ (луч } 1R); \\
 i = 2, \quad \psi_2 &= +135^\circ \text{ (луч } 2L); \\
 i = 3, \quad \psi_3 &= -135^\circ \text{ (луч } 2R); \\
 i = 4, \quad \psi_4 &= +45^\circ \text{ (луч } 1L).
 \end{aligned}$$

При этом угол отклонения φ_i оси луча относительно зенита определяется как [1]

$$\varphi_i = \arcsin (\psi/\pi). \tag{1}$$

Таким образом, 1-й ($i = 1$) и 3-й ($i = 3$) лучи отклонены вправо от направления в зенит (на рис. 1 введены дополнительные обозначения $1R$ и $2R$ соответственно; буква R от слова *Right* – правый), а 2-й ($i = 2$) и 4-й ($i = 4$) – влево (на рис. 1 дополнительные обозначения $1L$ и $2L$; буква L от слова *Left* – левый).

Основным элементом матрицы Батлера является четвертьволновый полосковый НО, представляющий собой четырехплечее устройство, образованное четвертьволновым отрезком двух параллельных, близко расположенных и электромагнитно связанных между собой за счет полного наложения по всей длине l линий передачи, которые формируются на обеих сторонах изначально двухсторонне фольгированной диэлектрической пленки (рис. 2).

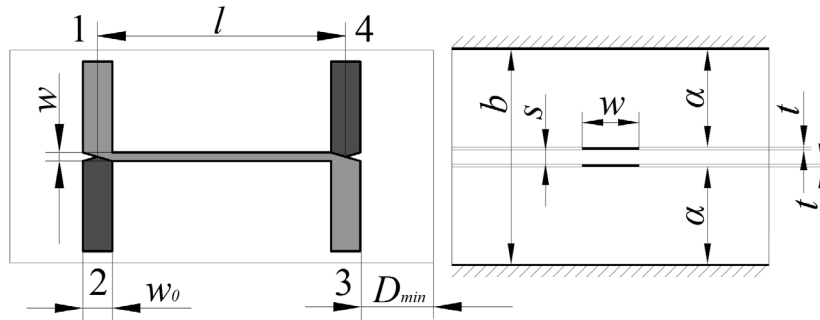


Рис. 2 – Размеры направленного ответвителя

Fig. 2. – Directional coupler dimensions

Эта пленка толщиной s размещается между двумя листами нефольгированного диэлектрика из того же материала толщиной α [7]. В результате СВЧ сигнал, поданный на плечо 1, делится в отношении 1:1 между плечами 2 и 3 и практически не поступает в плечо 4, развязанное относительно плеча 1, причем это плечо хорошо (теоретически идеально) согласовано с источником сигнала.

Исходные данные:

$f_0 = 2,2$ ГГц – рабочая частота;

$\rho_0 = 50$ Ом – волновое сопротивление подводящих линий;

$S_{21} = 3$ дБ – переходное затухание направленного ответвителя.

Основным материалом для работы был выбран фольгированный фторопласт (ФАФ-4Д) с параметрами:

$t = 0,035$ мм – толщина фольги;

$\alpha = 1,43$ мм – толщина изолирующего диэлектрика;

s = (вычисляется ниже) – толщина пленки;

$\epsilon_r = 2,5$ – диэлектрическая проницаемость подложки.

Расчет размеров направленного ответвителя (рис. 2) производился согласно [7].

Коэффициент электромагнитной связи

$$k = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,7071.$$

Для применяемого материала ФАФ-4Д воспользуемся семейством характеристик из [8], приведенных на рис. 3.

Уровень коэффициента $k = 0,707$ пересекает график $s/b = 0,1$, в проекции этой точки на горизонтальную ось получается значение $w/b = 0,44$.

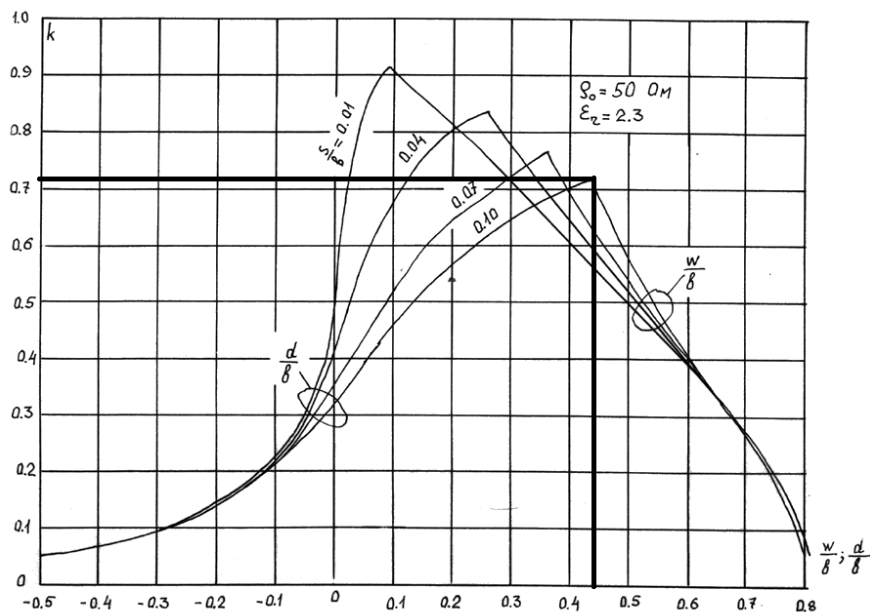


Рис. 3 – Графики зависимостей размеров направленного ответвителя

Fig. 3 – Plot size dependencies plots

Расстояние между пластинами корпуса:

$$b = 3 \cdot t + s + 2 \cdot \alpha = 3 \cdot 0,035 + s + 2 \cdot 1,43 = (2,965 + s) \text{ мм.} \quad (2)$$

Толщину пленки найдем, подставив (2) в выражение $s/b = 0,1$:

$$\frac{s}{2,965 + s} = 0,09. \quad (3)$$

Решив уравнение (3), получаем

$$s = \frac{0,1 \cdot 2,965}{1 - 0,1} \approx 0,33 \text{ мм.}$$

Конкретизируем расстояние между пластинами корпуса:

$$b = 2,965 + s = 2,965 + 0,33 = 3,295 \text{ мм.}$$

Длина полоска НО

$$l = \frac{\lambda}{4 \cdot \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{136,364}{4 \cdot \sqrt{2,5}} = 21,56 \approx 22 \text{ мм,}$$

где длина волны

$$\lambda = \frac{c}{f_0} = \frac{3 \cdot 10^8}{2,2 \cdot 10^9} \approx 136,364 \text{ мм.}$$

Ширина полоска НО

$$w = 0,44b = 0,44 \cdot 3,295 = 1,45 \text{ мм.}$$

Ширина подводящих линий

$$w_0 = 0,81b = 0,81 \cdot 3,295 = 2,67 \text{ мм.}$$

Минимальное расстояние между корпусом и ближайшей линией

$$D_{\min} = 2b = 2 \cdot 3,295 = 6,59 \text{ мм.}$$

Выходные контакты матрицы Батлера для сочленения с излучателями должны быть размещены на расстоянии полволны в воздухе:

$$l_{\text{вых}} = \frac{\lambda}{2} \approx 68 \text{ мм.}$$

2. Компьютерное моделирование базовых печатных фрагментов топологии 4-лучевой ФАР

В этом разделе описаны основные этапы компьютерного моделирования печатных фрагментов, таких как направленный ответвитель, пересечение линий передачи, разводка под антенное полотно, матрица Батлера 4×4 и печатный излучатель.

2.1 Направленный ответвитель

Топология модели представлена на рис. 4 (светло-серый цвет – линии на лицевой стороне пленки, темно-серый цвет – линии на обратной стороне пленки).

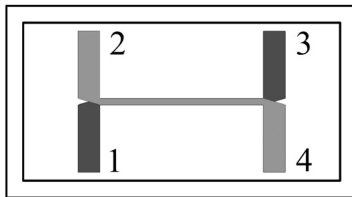


Рис. 4 – Топология направленного ответвителя

Fig. 4 – Directional coupler topology

В результате компьютерного моделирования и оптимизации геометрических размеров получили результаты затуханий в направленном ответвителе, находящиеся на рис. 5, где черный график – S_{21} , а серый – S_{31} , а также график разностей набега фаз между S_{21} и S_{31} , представленный на рис. 6.

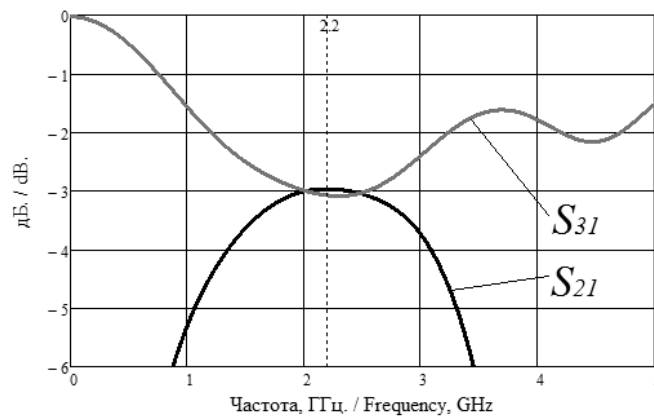


Рис. 5 – Графики затуханий

Fig. 5 – Attenuation graphs

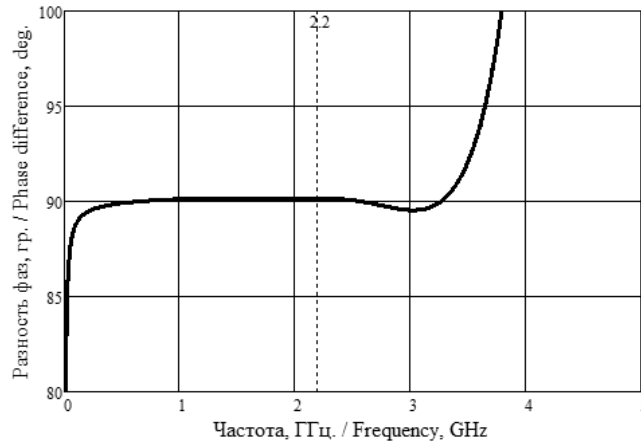


Рис. 6 – Разность набега фаз

Fig. 6 – Phase difference

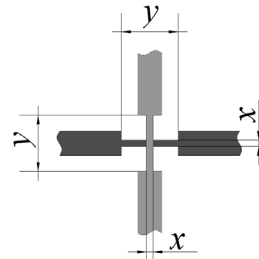
Анализируя графики, получаем вывод о том, что направленный ответитель пригоден для использования в полосе частот 1,9...2,6 ГГц.

2.2. Узел пересечения печатных линий передачи

В разделе представлен узел пересечения линий с противоположных сторон пленки. Хотя гальванический контакт и отсутствует, но из-за емкости взаимного перекрытия появляются искажения на используемой нами частоте. Основываясь на результатах из [9], было принято решение сделать подобную реализацию. На рис. 7 показано, оперируя какими размерами были улучшены характеристики.

Рис. 7 – Изменяемые размеры

Fig. 7 – Resizable dimensions



Размеры были подобраны при помощи программной оптимизации и составили: $x = 0,4$ мм, $y = 2,6$ мм. Согласно этим размерам на рис. 8 представлена топология этого пересечения.

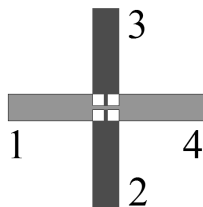


Рис. 8 – Топология пересечения

Fig. 8 – Intersection topology

На рис. 9 видны затухания в исследуемом узле (черная сплошная линия – S_{11} , серая сплошная линия – S_{21} (S_{31}), черная пунктирная линия – S_{41}), слева – до изменений, справа – после изменений.

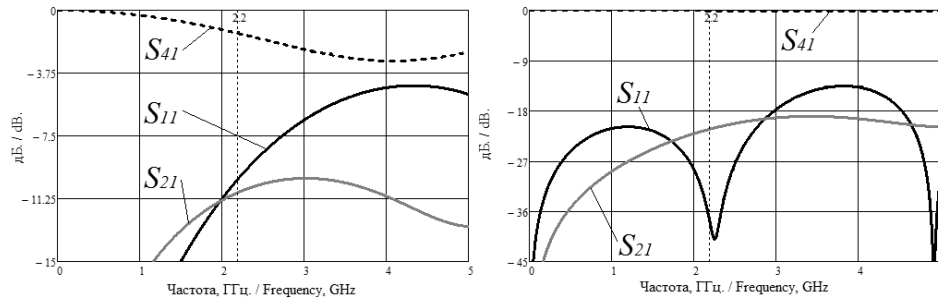


Рис. 9 – Графики затуханий

Fig. 9 – Attenuation graphs

2.3. Разводка под антенное полотно

Разводка под антенное полотно была выполнена отдельным этапом, так как требует особого внимания при моделировании из-за существенного влияния на диаграммы направленности ФАР. Согласно расчетам и программной оптимизации получилась топология, представленная на рис. 10. Геометрические размеры элемента составили 219,6×41,8×3,16 мм.

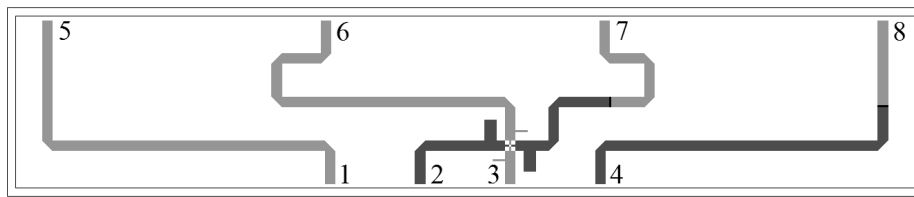


Рис. 10 – Топология разводки

Fig. 10 – Layout topology

Результаты затуханий, полученные в ходе компьютерного моделирования, представлены на рис. 11, где сплошная черная линия – S_{51} (S_{84}), черная пунктирная – S_{63} , серая сплошная – S_{72} .

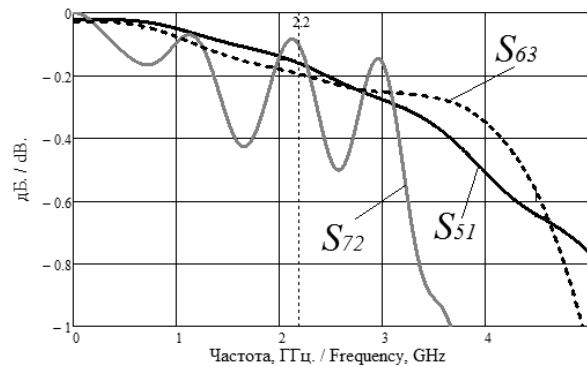


Рис. 11 – Графики затуханий

Fig. 11 – Attenuation graphs

Результаты получились приемлемыми, поэтому переходим к следующему этапу.

2.4. Матрица Батлера 4x4

После сочленения всех составляющих частей получилась топология матрицы, представленная на рис. 12. Геометрические размеры модели составили 219,6x73,6x3,16 мм.

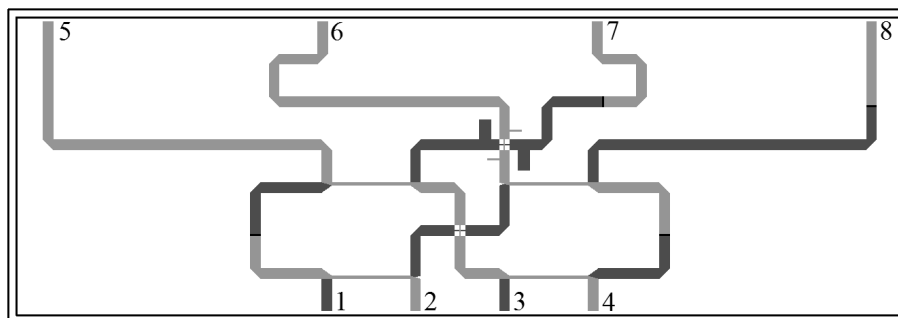


Рис. 12 – Топология матрицы Батлера 4x4

Fig. 12 – Butler 4x4 matrix topology

На рис. 13 показаны затухания в трактах передачи матрицы.

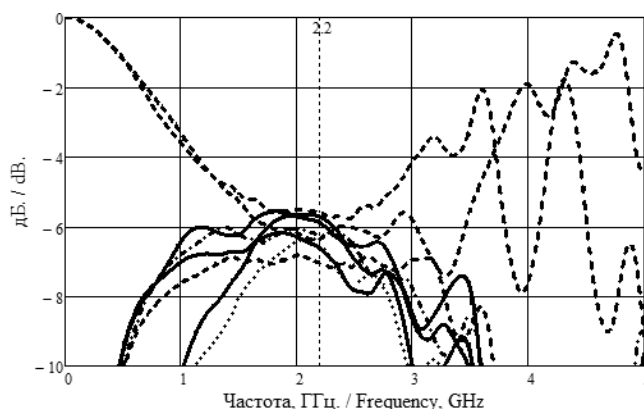


Рис. 13 – Графики ослаблений

Fig. 13. Attenuation graphs

В табл. 1 суммировано подробное описание значений согласования, отражения и затуханий в трактах передачи.

Таблица 1 / Table 1

**Подробные результаты моделирования
Detailed simulation results**

	Входы			
	1	2	3	4
S1	-29,44	-25,11	-24,97	-14,27
S2	-25,11	-20,56	-15,04	-28,95
S3	-25,11	-14,96	-18,65	-26,17
S4	-14,27	-28,95	-26,34	-27,1
S5	-5,72	-6,63	-6,21	-6,26

Окончание табл./ And table

		Входы			
		1	2	3	4
S6		-5,89	-6,51	-6,52	-6,14
S7		-7,04	-5,6	-5,71	-6,85
S8		-6,36	-6,22	-6,6	-5,7
КСВН		1,07	1,21	1,26	1,09
		Разность фаз между выходами ψ , °			$\psi_{\text{геор}}$, °
		5-6	6-7	7-8	
Входы	1	-50,49	-37,23	-43,67	-45
	2	+130,45	+141,34	+131,21	+135
	3	-144,72	-128,66	-132,7	-135
	4	+42,57	+49,69	+36,86	+45

В результате получили модель с хорошим согласованием по входам (КСВН не хуже 1,26), затуханием в прямом тракте $-6,32 \pm 0,72$ дБ и с максимальным отклонением разности фаз от идеального значения $9,72^\circ$. Результаты получились приемлемые, поэтому переходим к следующему разделу.

2.5. Излучатель

Было принято решение использовать усовершенствованный печатный дипольный излучатель [6], топология которого изображена на рис. 14.

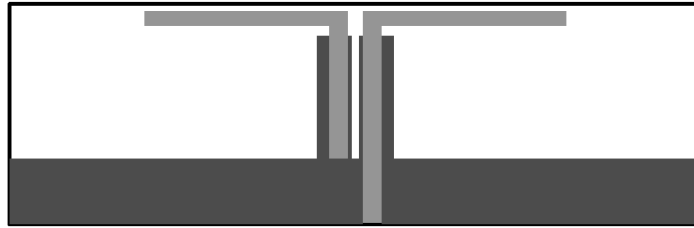


Рис. 14 – Топология излучателя

Fig. 14 – Radiator topology

Результаты моделирования представлены на рис. 15 и 16. Их можно классифицировать как вполне приемлемые.

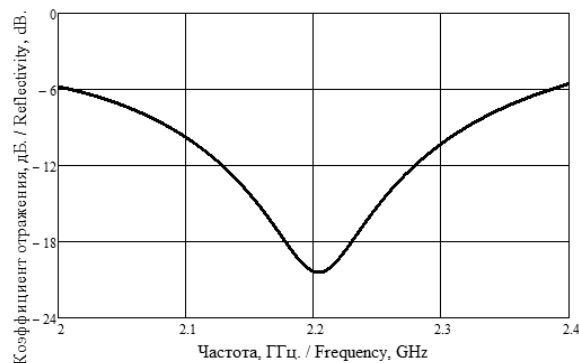


Рис. 15 – График согласования

Fig. 15 – Correlation graph

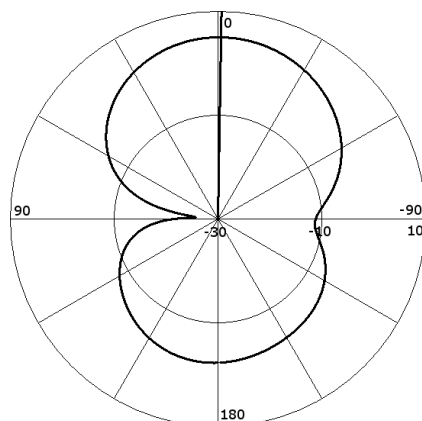


Рис. 16 – Диаграмма направленности
 Fig. 16 – Radiation pattern

2.6. 4-лучевая ФАР

Объединив матрицу Батлера 4×4 и антенное полотно, состоящее из четырех излучателей, получим модель, топология которой представлена на рис. 17. Геометрические размеры модели составили 282×94,8×3,16 мм.

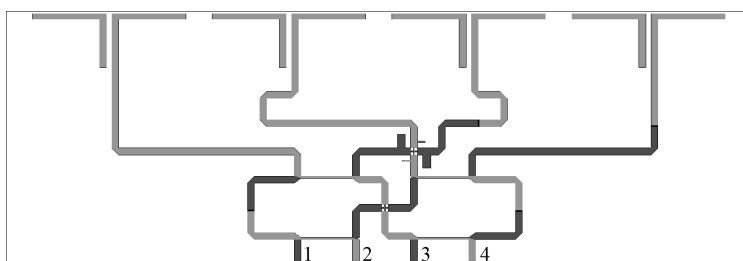


Рис. 17 – Топология 4-лучевой ФАР
 Fig. 17 – Four-beam phased array antenna topology

В табл. 2 представлены подробные значения результатов моделирования.

Таблица 2 / Table 2

**Подробные результаты моделирования
 Detailed simulation results**

	Входы			
	1	2	3	4
S1	-21,17	-24,08	-12,34	-6,45
S2	-23,02	-17,25	-4,7	-14,66
S3	-11,9	-4,5	-20,18	-22,57
S4	-6,71	-14,65	-20,56	-16,82
КСВН	1,19	1,31	1,22	1,34
$\varphi_{\text{теор}}, ^\circ$	+14,5	-48,6	+48,6	-14,5
$\varphi, ^\circ$	+13	-36	+37	-10
Отклонение, $^\circ$	1,5	12,6	11,6	4,5

На рис. 18 изображены диаграммы направленности моделируемой ФАР.

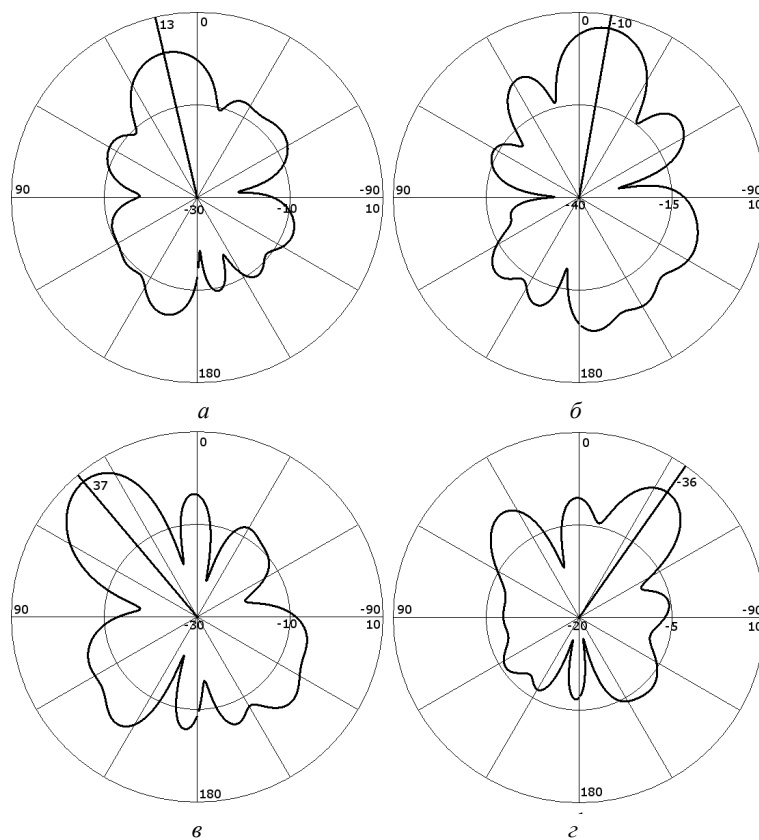


Рис. 18 – Диаграммы направленности лучей:

a – 1R; $б$ – 1L, $в$ – 2R; $г$ – 2L

Fig. 18 – Beam radiation patterns:

a – 1R; b – 1L; c – 2R; d – 2L

На рис. 19 расположены графики КСВН.

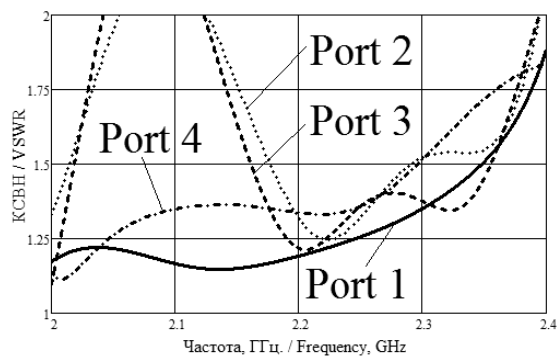


Рис. 19 – Графики КСВН портов модели

Fig. 19 – Graphs of the VSWR port mode

Полученные результаты были использованы для реализации печатной 4-лучевой ФАР на двухсторонне фольгированной пленке (рис. 20).

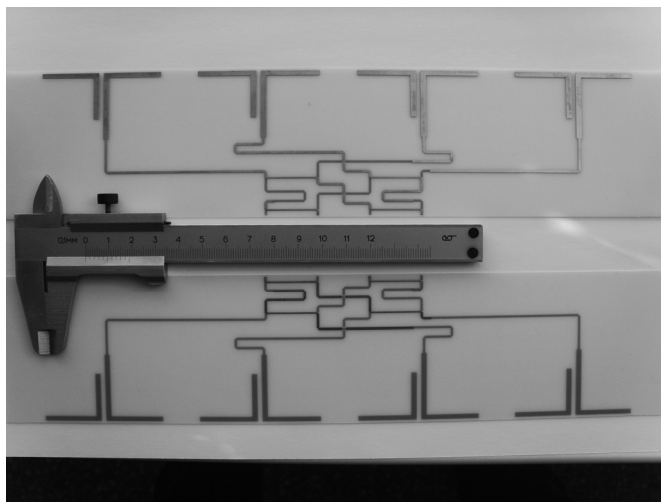


Рис. 20 – Фотография 4-лучевой ФАР

Fig. 20 – A four-beam phased array antenna photo

После оформления несущего металлического корпуса ФАР и использования разъемов серии SMA (Sub Miniature version A) были проведены измерения, которые подтвердили корректность результатов моделирования. Расхождения между экспериментальными и компьютерными значениями находились в пределах, определяемых уровнем диссипативных (джоулевых) потерь в проводниках и диэлектрике, разбросом значений диэлектрической проницаемости заготовок в партии листов и у различных фирм-изготовителей, зависимостью диэлектрической проницаемости от направления стекловолокна, армирующего диэлектрик, конечной разрешающей способностью технологического процесса фотолитографии и химического травления медной фольги с пробельных мест двусторонне фольгированной заготовки, а также неточностью совмещения фотошаблонов лицевой и обратной стороны всей печатной платы ФАР.

Заключение

Представленные в работе результаты эскизного проектирования 4-лучевой ФАР с матрицей Батлера на связанных полосковых линиях свидетельствуют о том, что описанная стратегия формирования печатной платы всей ФАР из отдельных, предварительно отработанных, печатных фрагментов оправдала себя. Эту стратегию можно рекомендовать при проектировании печатных дипольных многолучевых ФАР с числом лучей 8, 16, 32 и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проектирование фазированных антенных решеток / под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Радиотехника, 2012. – 744 с.
2. **Balanis C.A.** Antenna theory: analysis and design. – 4th ed. – Hoboken, NJ: Wiley, 2016. – 1072 p.
3. **Ding K., Kishk A.A.** 2-D Butler matrix and phase-shifter group // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2018. – Vol. 66, N 12. – P. 5554–5562.

4. A cost-effective wideband switched beam antenna system for a small cell base station / P.I. Bantavis, C.I. Kolitsidas, T. Empliouk, M.L. Roy, B.L.G. Jonsson, G.A. Kyriacou // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2018. – Vol. 66, N 12. – P. 6851–6861.
5. Матричные схемы Батлера СВЧ-диапазона / Н.Н. Щетинин, Р.Н. Андреев, М.Ю. Чепелев, В.А. Мельник // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. – 2012. – № 10-1. – С. 78–85.
6. **Алексейцев С.А., Горбачев А.П., Тарасенко Н.В.** Модифицированные печатные двухдиапазонные дипольные излучатели // *Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей»*. – 2017. – № 3. – С. 46–50.
7. **Горбачев А.П.** Синтез микроволновых устройств на связанных линиях передачи. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – 414 с.
8. **Горбачев А.П.** Многоэлементные направленные ответвители и их применение в радиотехнике: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1996. – 110 с.
9. Low-loss compact Butler matrix for a microstrip antenna / M. Bona, L. Manholm, J.P. Starski, B. Svensson // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2002. – Vol. 50, N 9. – P. 2069–2075.

DESIGN OF A 4-BEAM PRINTED PHASED ANTENNA ARRAY WITH A BATLER MATRIX

Gorbachev A.P., Parshin Y.N.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

This paper is devoted to the analysis, calculation, and design of a printed 4×4 Butler matrix, which is a part of a 4-beam phased antenna array designed to operate at a frequency of 2.2 GHz. The development of the model was carried out by the strategy “from simple to complex” in the following sequence: a three-channel directional coupler; a node for smoothing a negative impact of the intersection of connecting microstrip lines on opposite sides of the board, wiring for an antenna pattern, a 4x4 Butler matrix, an emitter and a 4-beam phased antenna array.

Keywords: Butler matrix, directional coupler, phased array, radiator.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-34-47

REFERENCES

1. Voskresenskii D.I., ed. *Proektirovanie fazirovannykh antenykh reshetok* [Designing phased antenna arrays]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2012. 744 p.
2. Balanis C.A. *Antenna theory: analysis and design*. 4th ed. Hoboken, NJ, Wiley, 2016. 1072 p.
3. Ding K., Kishk A.A. 2-D Butler matrix and phase-shifter group. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2018, vol. 66, no. 12, pp. 5554–5562.
4. Bantavis P.I., Kolitsidas C.I., Empliouk T., Roy M.L., Jonsson B.L.G., Kyriacou G.A. A cost-effective wideband switched beam antenna system for a small cell base station. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, vol. 66, no. 12, pp. 6851–6861.
5. Schetinin N.N., Andreev R.N., Chepelev M.Yu., Melnik V.A. Matrichnye skhemy Batlera SVCh-diapazona [Microwave Butler matrix schemes]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2012, no. 10-1, pp. 78–85.
6. Alekseitsev S.A., Gorbachev A.P., Tarasenko N.V. Modifitsirovannye pechatnye dvukhdia-pazonnye dipol'nye izluchateli [Modified printed dual-band dipole emitters]. *Vestnik Kon-cерна VKO "Almaz-Antei" – Concern's Bulletin VKO "Almaz-Antey"*, 2017, no. 3, pp. 46–50.
7. Gorbachev A.P. Sintez mikrovolnovykh ustroystv na svyazannykh liniyakh peredachi [Synthesis of microwave devices based on coupled transmission lines]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2010. 414 p.
8. Gorbachev A.P. *Mnogoelementnye napravlennye otvetviteli i ikh primeneniye v radiotekhnike* [Multiple directional otvetviteli and their application in radio engineering]. Novosibirsk, NSTU Publ., 1996. 110 p.

9. Bona M., Manholm L., Starski J.P., Svensson B. Low-loss compact Butler matrix for a microstrip antenna. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, vol. 50, no. 9, pp. 2069–2075.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Горбачев Анатолий Петрович – родился в 1951 году, д-р техн. наук по специальности 05.12.21 (номенклатура специальностей 1999 года), профессор кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств, аттестат доцента по кафедре конструирования и технологии радиоэлектронных средств факультета радиотехники и электроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: радиолокация, СВЧ-устройства, фазированные антенные решетки. Опубликовано 134 научные работы, 30 патентов, пять монографий и три учебных пособия с грифом УМО. (630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: apgor@ngs.ru).

Gorbachev Anatoly Petrovich (was born in Tumen in 1951) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, Department of Radio Receivers and Radio Transmitters, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk. His research interests include antennas, microwave devices, and phased array antennas. He is the author of more than 134 scientific papers, 30 patents, 5 monographs, and 3 manuals. Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: apgor@ngs.ru).



Паршин Юрий Николаевич – родился 26 августа 1994 года в Сарканде, Казахстан. Аспирант кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств факультета радиотехники и электроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: печатные фазированные антенные решетки. Опубликовано 8 научных работ. (630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: jurparnik@mail.ru).

Parshin Yury Nikolayevich was born on August 26, 1994 in Sarkand, Kazakhstan, a post-graduate student, Department of Radio Receivers and Radio Transmitters, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk. His research interests include printed phased antenna arrays. He is the author of 8 scientific papers. Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: jurparnik@mail.ru).

Статья поступила 09 мая 2019
Received May 09, 2019

To Reference:

Gorbachev A.P., Parshin Y.N. Proektirovanie 4-luchevoi pechatnoi fazirovannoi antennoi reshetki s matritsei Batlera [Design of a 4-beam printed phased antenna array with a Batler matrix]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, no. 3 (44), pp. 34–47. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-34-47.

УДК 621.313.333

**ПРИНЦИПЫ СИНТЕЗИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВА,
ПОДДЕРЖИВАЮЩЕГО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ
РЕЖИМ ДВИГАТЕЛЯ ПРИ НЕСИММЕТРИИ ОБМОТКИ РОТОРА****Е.О. Лавренов, З.С. Темлякова, А.А. Темляков***Новосибирский государственный технический университет*

Работа посвящена проблематике электрической несимметрии асинхронных двигателей. В качестве объекта исследования выступает асинхронный двигатель, используемый для привода ответственных механизмов, в которых отключение двигателя при появлении несимметрии в процессе работы является крайне нежелательным. Выявлено, что источником провала механического момента при несимметрии цепи ротора выступают паразитные токи статора, наведенные в нем полем обратной последовательности ротора. Для их минимизации выбран метод принудительного задания токов статора. Рассмотрен принцип действия разработанного устройства, позволяющего устранить провал момента асинхронного двигателя при наличии несимметрии в обмотке ротора. С целью корректного выбора элементов устройства и его эффективной работы составлен алгоритм, состоящий из трех блоков: расчет максимальных токов статора при наличии несимметрии роторной цепи, выбор элементов устройства по найденным токам, оптимизация системы устройство–двигатель. В качестве демонстрации работы предложенного устройства проведено моделирование системы устройство–двигатель при наличии несимметрии электрических сопротивлений обмотки ротора и выполнена верификация полученных результатов. Отмечена эффективность устройства для решения задачи компенсации провала электромагнитного момента, вызванного несимметрией цепи ротора асинхронного двигателя.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, моделирование, устройство питания, электрическая несимметрия.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-48-56

Введение

При эксплуатации крупных асинхронных двигателей возможно возникновение неисправностей, связанных с обмотками статора или ротора, результатом которых является появление в них электрической несимметрии. Используемая на сегодняшний день защита двигателей может лишь экстренно отключить двигатель при превышении заданного уровня тока в обмотках статора. Однако в некоторых отраслях промышленности (цементная, металлургическая, химическая) с непрерывным циклом производства это может оказаться крайне нежелательным по экономическим причинам или причинам, связанным с вопросами безопасности. Исходя из этого, возникает необходимость кратковременного устранения негативных воздействий несимметрии (в частности, снижения электромагнитного момента) с целью завершения производственной операции без сопутствующего отключению ущерба. Разработанное устройство питания асинхронного двигателя позволяет устранить провал механического момента, который проявляется при наличии электрической несимметрии в обмотке ротора двигателя.

Стоит отметить, что подавляющее большинство исследований, посвященных работе асинхронных двигателей в несимметричных режимах, рассматривает их негативное влияние на электрическую сеть и соответствующие методы его устранения [1–3]. В данной же работе рассмотрены физические процессы, происходящие непосредственно в двигателе, а для компенсации последствий несимметрии

предлагается воздействовать на первопричину – несимметричный асинхронный двигатель.

Целью данного исследования является разработка принципов синтезирования устройства для его эффективной и надежной эксплуатации, верификация полученных результатов.

1. Теоретические основы синтезирования устройства компенсации

В ходе проведенных исследований выявлено, что источником провала в механической характеристике асинхронного двигателя при несимметрии в цепи ротора выступает паразитный асинхронный момент, возникающий при воздействии магнитного потока обратной последовательности ротора на цепь статора.

Для минимизации этого паразитного момента необходимо ослабление силы тока обратной последовательности в роторе или статоре. Поскольку регулирование сопротивлений и индуктивностей ротора – довольно сложная задача, к тому же требующая конструктивной доработки ряда узлов электрической машины, то предпочтительнее осуществлять компенсацию провала механической характеристики со стороны статорной цепи.

Из ряда методов, пригодных для реализации поставленной задачи, выбран метод принудительного задания токов обмотки статора [4].

Принудительное задание токов обмоток статора реализуется с помощью принципиально нового разработанного устройства питания асинхронного двигателя (патент РФ № 2647882). Блок-схема данного устройства представлена на рис. 1.

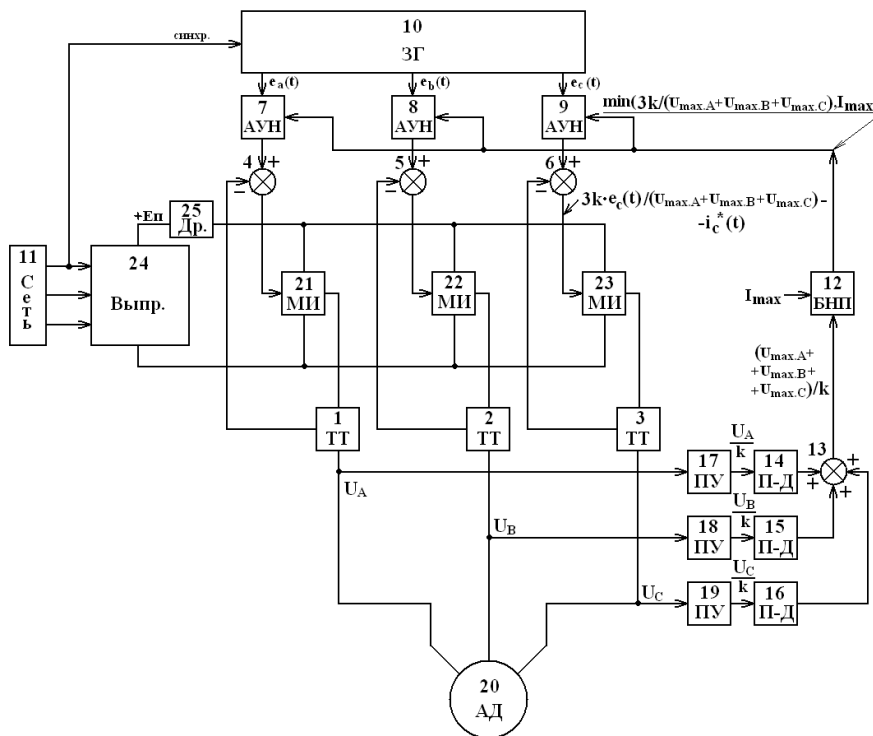


Рис. 1 – Блок-схема устройства питания асинхронного двигателя для принудительного задания токов статора

Fig. 1 – Block diagram of induction motor supply equipment for stator current forced setting

Устройство работает следующим образом: при подаче напряжения питания задающий генератор 10 (рис. 1) формирует синусоидальные симметричные уровни напряжений, умножаемые на некоторый коэффициент, обратно пропорциональный среднему значению амплитуд фазных напряжений статора и ограниченный задаваемым максимальным пусковым током. Произведения напряжений на этот коэффициент подаются на сумматоры 4, 5, 6, на выходах которых формируются разностные составляющие токов задаваемых и токов, фактически протекающих по фазам статора асинхронного двигателя 20. Эта разностная составляющая управляет мостовыми инверторами 21, 22, 23 на основе широтно-импульсной модуляции – появление положительного сигнала токового рассогласования приводит к увеличению длительности импульса в периоде, из-за чего среднее значение напряжения на выходе инверторов 21, 22, 23 повышается, и наоборот – отрицательный сигнал токового рассогласования снижает длительность импульса в периоде, что приводит к уменьшению среднего напряжения на выходе инверторов 21, 22, 23.

При больших скольжениях ротора и поддержании в статоре асинхронного двигателя 20 номинального тока момент на валу двигателя мал и возрастает только при скольжениях, близких к номинальным. Напряжение на зажимах фаз статора при больших скольжениях также мало. Для компенсации пускового момента в предлагаемом устройстве предусмотрена цепь коррекции, состоящая из блока формирования средней амплитуды 13, блока нелинейного преобразования 12 и аналоговых умножителей напряжения 7, 8, 9 и повышающая уровень фазных токов статора асинхронного двигателя 20 при малых напряжениях на зажимах фаз статора умножением формируемых задающим генератором 10 токов на коэффициент, обратно пропорциональный амплитудным напряжениям фаз статора [5].

Однако для корректного выбора элементов устройства и его эффективной работы необходимо соблюдать принципы синтеза, реализуемые в приведенном ниже алгоритме, состоящем из трех основных блоков.

Первый блок основан на определении максимальных токов в обмотках статора асинхронного двигателя при наличии электрической несимметрии в цепи ротора. Данная величина токов необходима для подбора некоторых элементов устройства – трансформаторов тока, мостовых инверторов и др. Токи обмоток статора асинхронного двигателя для варианта межвиткового короткого замыкания в роторе определяются на основе модификации математической модели асинхронного двигателя, представленной в работе [6].

Второй блок предназначен для корректного выбора элементов устройства (рис. 1), поддерживающего эксплуатационный режим работы при наличии электрической несимметрии в цепи ротора.

Третий блок предназначен для оптимизации системы устройство–двигатель, осуществляемой на основе моделирования конкретных исследуемых режимов. На данном этапе главной задачей является подбор корректных коэффициентов усиления соответствующих функциональных блоков. Подбор выполняется итерационным методом, с отладкой модели на каждом шаге.

Устройство представляет собой симметричный трехфазный источник синусоидального тока с управлением амплитуды тока по режиму на механической характеристике: в режиме пуска источник должен обеспечить двигателю трех-пятикратный номинальный ток, а при переходе в рабочий режим с номинальным скольжением ток не должен превышать своего номинального значения.

Блоки 17–19 «преобразователи уровней» должны адаптировать фазное напряжение сети к напряжению управляющего устройства, не превышающему, как правило, 5 В, потому напряжение делится на некоторый коэффициент k .

Блоки 14–16 «пик-детекторы» фиксируют максимальное значение входного сигнала.

Блок 13 представляет собой сумматор максимальных за период значений фазных напряжений. Использование всех трех фаз для формирования напряжения обратной связи вызвано необходимостью сохранять работоспособность двигателя в случае значительной несимметрии напряжений.

Блок 12 «блок нелинейных преобразований» должен задавать уровень токов фаз двигателя таким образом, чтобы при максимальном уровне входного сигнала, соответствующем полному фазному напряжению, ток имел номинальное значение, а при скольжениях больше критического, когда напряжение мало, пусковой ток задавался большими величинами, порядка трехкратного номинального значения.

Блок 12 формирует сигнал, пропорциональный необходимым для соответствующего режима амплитудам токов фаз двигателя.

Задающий генератор напряжения 10 формирует синусоидальный сигнал условно единичной амплитуды, по которому будут формироваться мгновенные значения токов фаз путем перемножения в блоках «аналоговый умножитель напряжения» 7, 8, 9.

Трансформаторы тока 1, 2, 3 формируют сигналы, пропорциональные токам фаз, необходимые для установления обратной связи блоками 4, 5, 6. При несоответствии реальных токов фаз разность между сигналами, снимаемыми с трансформаторов тока, и сигналами датчика, т.е. сигналами с аналоговых умножителей напряжения (7, 8, 9) подается на блоки мостовых инверторов 21, 22, 23 для нивелирования различия между токами требуемыми и реальными.

Следует отметить, что наиболее трудоемкой частью алгоритма является третий блок, поскольку при реализации метода последовательных приближений число циклов может быть различным.

2. Моделирование системы устройство–двигатель на примере короткого замыкания в роторе асинхронного двигателя

В качестве объекта исследования выступает высоковольтный асинхронный электродвигатель с фазным ротором 4ФАЗ-800/6000У2,5 с синхронной частотой вращения 750 об/мин производства НПО «ЭЛСИБ» ПАО.

С использованием программного пакета MatLab Simulink реализовано моделирование системы устройство–двигатель при несимметрии электрических сопротивлений в цепи ротора. Структурная схема моделируемой системы представлена на рис. 2.

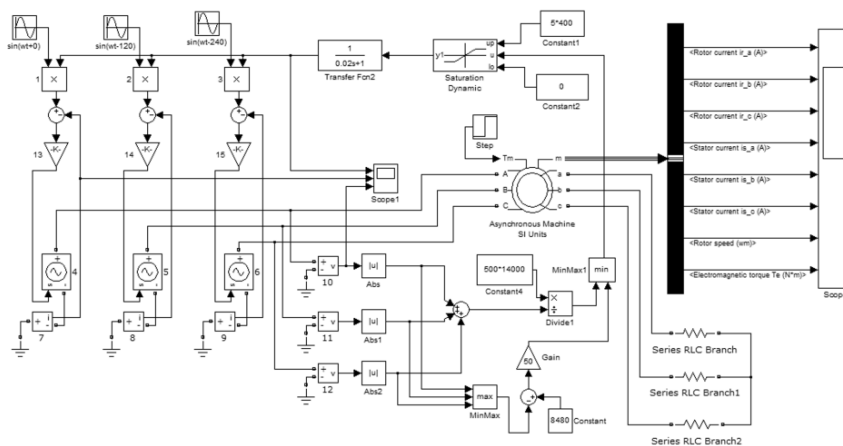


Рис. 2 – Структурная схема системы устройство–двигатель
 Fig. 2 – Structure diagram of a device-motor system

Характеристики двигателя в функции времени, полученные при моделировании, показаны на рис. 3–5.

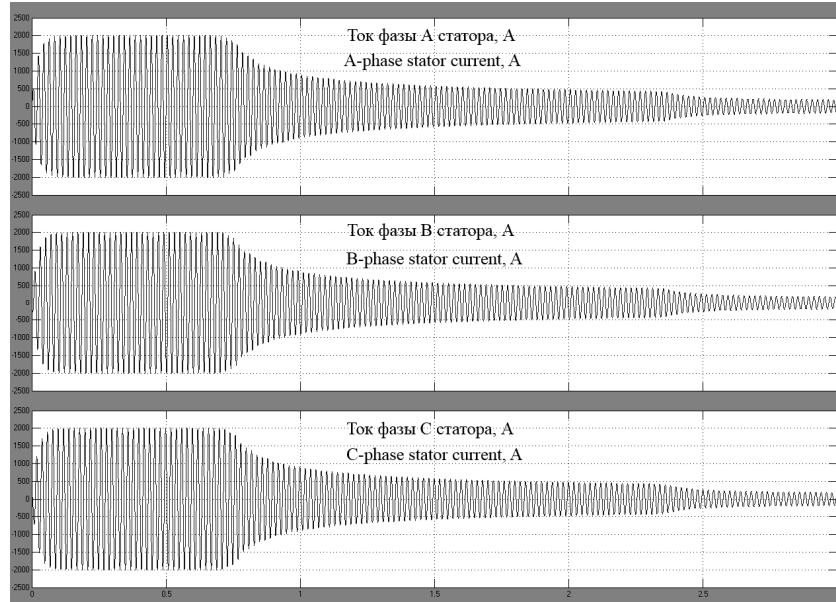


Рис. 3 – Токи фаз обмотки статора при несимметрии ротора и принудительном задании токов статора в функции времени

Fig. 3 – Time-function currents of stator phases at rotor asymmetry and stator currents forced set up

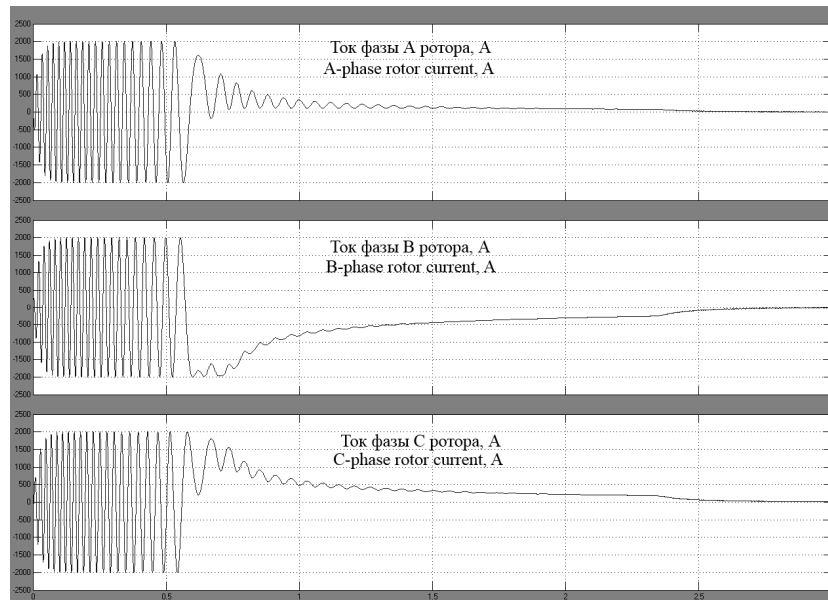


Рис. 4 – Токи фаз обмотки ротора при несимметрии ротора и принудительном задании токов статора в функции времени

Fig. 4 – Time-function currents of rotor phases at rotor asymmetry and stator currents forced set up

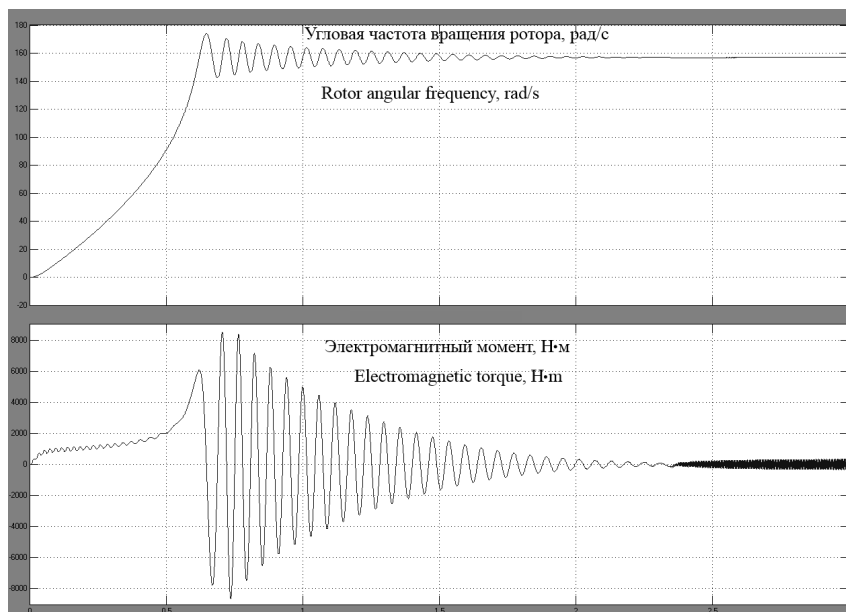


Рис. 5 – Угловая частота вращения ротора и электромагнитный момент при несимметрии ротора и принудительном задании токов статора в функции времени

Fig. 5 – Time-function rotor angular frequency and electromagnetic torque at rotor asymmetry and stator currents forced set up

3. Обсуждение результатов

Как показывают массивы расчетных данных отрезка двигателей типа 4ФАЗ, при появлении электрической несимметрии обмотки ротора неминуемо возникает провал электромагнитного момента. Величина провала зависит от различных факторов, таких как уровень несимметрии, величина механической нагрузки, тип нагрузки и др.

Результаты моделирования работы несимметричного двигателя при принудительном задании токов статора, реализуемом посредством разработанного устройства, показали эффективность решения задачи компенсации возникающего провала момента асинхронного двигателя. Цепь коррекции напряжения при больших скольжениях обеспечивает увеличение токов статора в пусковом режиме до уровня, необходимого для создания требуемого пускового момента.

Стоит отметить, что важной и наиболее трудоемкой задачей при оптимизации системы является подбор коэффициентов усиления соответствующих блоков структурной схемы для реализации эффективной работы системы в целом.

В приводах ответственных установок, где технологическим процессом не допускается остановок в рабочем цикле, с целью устранения данного провала момента целесообразно использовать предлагаемое устройство.

Заключение

Для решения задачи разработки устройства выделены критерии синтеза, позволяющие обеспечить эффективную компенсацию провала механического момента двигателя, обусловленную наличием электрической несимметрии в обмотке ротора:

– расчет величины максимальных токов в обмотке статора в режиме несимметрии со стороны ротора;

- корректный выбор элементов устройства по рассчитанным токам;
- оптимизация системы устройство–двигатель.

Для асинхронного двигателя типа 4ФАЗ-800/6000У2,5 рассмотрен вариант работы системы устройство–двигатель при неравенстве активных сопротивлений фаз обмотки ротора. Получена осциллограмма токового сигнала, подаваемого устройством в обмотки фаз статора электродвигателя, подающего ток, наведенные полем обратной последовательности ротора. По полученной механической характеристике можно сделать вывод об эффективном решении устройством задачи устранения провала электромагнитного момента при наличии электрической несимметрии обмотки ротора, что предоставляет возможность довести технологическую операцию до завершения без необходимости немедленного отключения двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
2. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия, 1980. – 256 с.
3. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
4. Лавренов Е.О. Методы компенсации влияния электрической несимметрии на механический момент индукционного двигателя // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327, № 1. – С. 72–78.
5. Патент 2647882 Российская Федерация. Устройство питания асинхронного двигателя / Е.О. Лавренов. – № 2016106441; заявл. 24.02.2016; опубл. 29.08.2017, Бюл. № 25.
6. Лавренов Е.О., Тюков В.А. Численное моделирование несимметрии статора и ротора асинхронного двигателя // Электротехника. – 2017. – № 1. – С. 7–12.

SYNTHESIS OF THE DEVICE SUPPORTING THE OPERATION MODE OF AN INDUCTION MOTOR UNDER ASYMMETRY OF A ROTOR WINDING

Lavrenov E.O., Temlyakova Z.S., Temlyakov A.A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

The paper is devoted to the problem of electrical asymmetry of induction motors. The research object is an induction motor used to drive responsible mechanisms. The motor shutdown at the appearance of asymmetry during the operation of such engines is exceptionally undesirable. It is revealed that the source of a mechanical moment dip under rotor asymmetry is parasite currents induced by the rotor negative sequence field. To minimize these currents, a method of stator current forced setting is selected. The operation principle of the developed device with the function of removing a torque dip under rotor electrical asymmetry is considered. With aim of correct selection of the device elements and its effective work, an algorithm consisting of three blocks is constructed. The first block is calculation of maximum stator currents in the presence of rotor circuit asymmetry, the second block is selection of device elements by the currents found and the third block is optimization of a device-motor system. As a demonstration of the proposed device, a device-engine system was simulated in the presence of rotor resistance asymmetry and the verification of the results was performed. The efficiency of the device for solving the problem of compensating an electromagnetic torque dip caused by the asymmetry of the rotor circuit of an induction motor is pointed out.

Keywords: induction motor, turn-to-turn short circuit, mathematical modeling, electrical asymmetry.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-48-56

REFERENCES

1. Syromyatnikov I.A. *Rezhimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh dvigatelei* [Modes of asynchronous and synchronous motors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 240 p.
2. Vazhnov A.I. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transient processes in AC machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1980. 256 p.
3. Kovach K.P., Rats I. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transient processes in AC machines]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1963. 744 p.
4. Lavrenov E.O. *Metody kompensatsii vliyaniya elektricheskoi nesimmetrii na mekhanicheskii moment induktsionnogo dvigatelya* [Compensation methods of electrical asymmetry effect on induction motor moment] *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 1, pp. 72–78.
5. Lavrenov E.O. *Ustroistvo pitaniya asinkhronnogo dvigatelya* [Power supply of asynchronous motor]. Patent RF, no. 2647882, 2017.
6. Lavrenov E.O., Tyukov V.A. *Chislennoe modelirovanie nesimmetrii statora i rotora asinkhronnogo dvigatelya* [Stator and rotor asymmetry modeling of an induction motor]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2017, no. 1, pp. 7–12. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



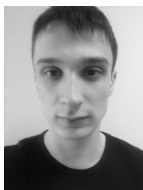
Лавренов Евгений Олегович – получил степень бакалавра и магистра техники и технологии в Новосибирском государственном техническом университете в 2011 и 2013 г. соответственно. В настоящее время является аспирантом кафедры электромеханики. Область научных интересов: математическое моделирование режимов работы асинхронных двигателей, диагностика неисправностей. Опубликовано 25 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: e.lavrenov@inbox.ru).

Lavrenov Evgenii Olegovich received B.S. and M.S. degrees from the Novosibirsk State Technical University in 2011 and 2013, respectively. He is currently a postgraduate student of the Electromechanics Department of the Novosibirsk State Technical University. His research interests are in the area of induction motor operation, fault diagnostics and detection using mathematical modeling. He is author of 25 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: e.lavrenov@inbox.ru).



Темлякова Зоя Савельевна – профессор кафедры электромеханики, д-р техн. наук, профессор. Окончила НГТУ (НЭТИ) в 1971 году, инженер электромеханик. Докторскую диссертацию «Развитие теории и методов электромагнитных расчетов управляемых асинхронных машин» защитила в 2000 году. Ученое звание профессора по кафедре электромеханики присвоено в 2003 году. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. Email: temlyakova@corp.nstu.ru).

Temlyakova Zoya Savel'evna – Doctor of Sciences (Eng.), professor at the Electromechanics department of Novosibirsk State Technical University since 2003. She graduated from NSTU in 1971. In 2000, she defended her doctoral dissertation on “Development of the theory and methods of electromagnetic calculations of controlled asynchronous machines”. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: temlyakova@corp.nstu.ru).



Темляков Антон Александрович – студент факультета мехатроники и автоматизации. Направление подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника». (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: maksidor@inbox.ru).

Temlyakov Anton Aleksandrovich – a student at the Mechatronics and Automation Faculty, NSTU. The field of training is power and electrical engineering. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: maksidor@inbox.ru).

*Статья поступила 02 декабря 2018 г.
Received December 02, 2018*

To Reference:

Lavrenov E.O., Temlyakova Z.S. Temlyakov A.A. Printsipy sintezirovaniya ustroystva, podderzhivayushchego ekspluatatsionnyi rezhim dvigatelya pri nesimmetrii obmotki rotora [Synthesis of the device supporting the operation mode of an induction motor under asymmetry of a rotor winding]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, no. 3 (44), pp.48–56. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-48-56.

УДК 535.34, 535.14, 53.082.52, 53.082.62

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ
ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ
ТЕТРААМИНОДИФЕНИЛА В ВИДИМОМ, ИК- И ТГц- ДИАПАЗОНАХ****А.Г. Паулиш^{1,4}, В.А. Голяшов², А.В. Гусаченко¹, А.О. Морозов¹,
К.В. Дорожкин³, В.И. Суляев³, В.Я. Костюченко⁴, С.М. Пыргаева⁵**¹Новосибирский филиал Института физики полупроводников
им. А.В. Ржанова СО РАН «Конструкторско-технологический
институт прикладной микроэлектроники»² Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН³Национальный исследовательский Томский государственный университет⁴Новосибирский государственный технический университет⁵Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова

Приведены результаты исследований спектральных характеристик чувствительности нового пироэлектрического детектора на основе слоев тетрааминодифенила толщиной 1 мкм в диапазоне длин волн 0,4...10 мкм и 300...3000 мкм. Размер фоточувствительного элемента пироприемника составил 1×1 мм. Для изготовления входного окна, прозрачного в указанных диапазонах, использовалась пленка майлара, толщиной около 70 мкм. Обнаружено, что майлар имеет линии поглощения в диапазоне 0,4...10 мкм, что необходимо учитывать при разработке широкополосных детекторов. Минимальная обнаруживаемая мощность излучения (мощность эквивалентная шуму) в видимом и ИК-диапазонах составила менее $6 \cdot 10^{-10}$ Вт/Гц^{1/2}, что примерно в пять раз ниже, чем для аналогов. В ТГц-диапазоне чувствительность пироприемника в 2...8 раз превышает чувствительность оптико-акустического приемника (ячейки Голея). Показано, что чувствительность такого пироприемника слабо зависит от длины волны во всем измеренном диапазоне. Это может быть объяснено аномальным скин-эффектом в полупрозрачном алюминиевом электроде, который приводит к спектрально независимому поглощению излучения на уровне 40...50 %. Полоса пропускания пироприемника, определенная из измеренной амплитудно-частотной характеристики при синусоидальной и прямоугольной засветке, составляет примерно 500 Гц и определяется параметрами усилителя, расположенного на чипе сенсора, и может быть расширена.

Ключевые слова: пироэлектрический детектор, приемники ИК- и ТГц-излучения, тетрааминодифенил, ИК-спектроскопия, ТГц-спектроскопия.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-57-69

Введение

Пироэлектрические приемники являются неохлаждаемыми тепловыми фотоприемниками, используемыми, как правило, для регистрации теплового излучения в диапазоне длин волн 2...20 мкм [1–5]. Будучи практически неселективными приборами, они часто применяются в ИК-спектрометрах. В последнее время было показана возможность их применения в терагерцовой (ТГц) части оптического диапазона 100...1000 мкм [6–10]. Для создания пироприемников ИК- и ТГц-диапазонов исследовано много пироэлектрических материалов, таких как цирконат-титанат свинца, сополимеры винили-денфторида, органические полимеры тетрааминодифенила (ТАДФ), танталат лития (LiTaO₃), ниобат лития (LiNbO₃), соединения KTaNbO₃, PbZnNbO₃, PbScTaO₃, Sr_{0,5}Ba_{0,5}Nb₂O₆ и другие. Идеальный

пироэлектрический сенсор помимо большого пироэлектрического коэффициента и малой диэлектрической постоянной должен обладать малой теплоемкостью. К таким материалам, прежде всего, относится тетрааминодифенил (или дифенилтетраамина (ДФТА)). В работах [11–15] были исследованы физико-химические свойства пленок ДФТА толщиной 0,6...1,0 мкм, полученные методом вакуумного термического напыления, для создания тонкопленочной мишени в пироэлектрическом электронно-оптическом преобразователе, рассчитанном для регистрации ИК-излучения с рабочим диапазоном 8...14 мкм. Для других материалов, например для танталата лития и ниобата лития, рабочие толщины пленок существенно больше, так как получаются механическим утонением толстой пластины до 25...50 мкм с последующим ионным травлением до 10...20 мкм [16]. Как было показано в [17], заряд, т. е. ток, генерируемый пироэлектрическим детектором, увеличивается с уменьшением толщины материала. Кроме того, малая толщина пироэлектрической пленки обеспечивает малую теплоемкость сенсора и, следовательно, высокую чувствительность и быстродействие детектора. На сегодня характеристики пиродетекторов на основе тонких слоев ТАДФ в ТГц-диапазоне и субТГц-диапазоне не исследовались.

Целью работы является определение спектральных характеристик чувствительности пироэлектрического фотодетектора на основе ТАДФ в видимом, инфракрасном и терагерцовом диапазонах и выяснение перспектив использования таких детекторов в данных диапазонах.

1. Образцы и методы исследований

Образцы пироэлектрических детекторов изготавливались на НПП «Восток», г. Новосибирск, в стандартном корпусе КТ-3 [18]. В качестве материала входного окна использовалась пленка полиэтилентерефталата (то же, что и лавсан или майлар) толщиной около 70 мкм, предположительно прозрачной в видимом, ИК- и ТГц-диапазонах. Структурная схема пиродетектора показана на рис. 1, а.

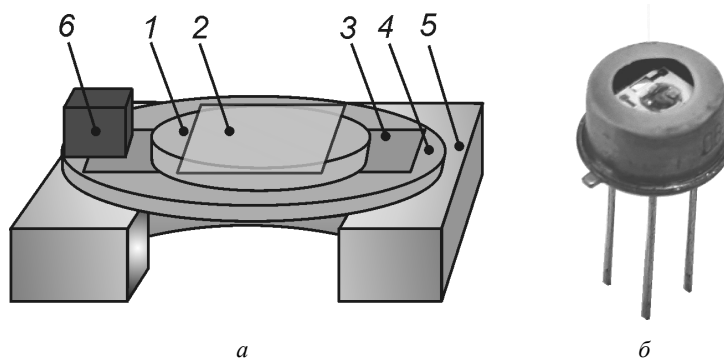


Рис. 1 – Пироэлектрический детектор на основе тетрааминодифенила:
 а – структурная схема; б – внешний вид пироприемника в корпусе; 1 – слой ТАДФ; 2, 3 – электроды; 4 – несущая полимерная пленка; 5 – ситалловая подложка; б – предусилитель

Fig. 1 – A pyroelectric detector based on tetraamine diphenyl:
 a is a structure diagram b is an overview of the pyroelectric detector in a case;
 1 is a tetraamine diphenyl layer; 2, 3 are contact electrodes; 4 is a self support polymer carrier film; 5 is a Sitall substrate; б is a preamplifier;

Фоточувствительный элемент представляет собой конденсатор, где в качестве диэлектрика использован слой ТАДФ (1) толщиной 1 мкм. В качестве верхнего

электрода 2 использован полупрозрачный слой алюминия толщиной 0,01 мкм, а для нижнего электрода – слой алюминия толщиной 0,07 мкм 3. Конденсатор размещен на свободно висящей пленке полиарилатно-эпоксидного лака марки ЛКС толщиной 0,3 мкм 4, закрепленной по краям на ситалловой подложке 5 размером 4×4×1 мм с отверстием в центре диаметром 2 мм. Такая конструкция позволяет минимизировать теплоотвод от пиропленки, которая нагревается при поглощении излучения, что увеличивает чувствительность детектора. На ситалловой подложке также размещен предварительный усилитель 6. Размер фоточувствительной площадки составлял 1×1 мм. На рис. 1, б показан внешний вид детектора в корпусе с габаритными размерами без выводов $\varnothing 9 \times 6,6$ мм. Данный детектор подключался к вторичному усилителю и формирователю выходного сигнала с максимальной амплитудой ± 4 В (нагрузка 50 Ом) и максимальным шумом усилителя на уровне 0,3 мВ.

Измерение спектральных характеристик чувствительности пироприемника в видимом и ИК-диапазоне проводилось на спектрометрическом комплексе на основе монохроматора МДР-41 с рабочим диапазоном длин волн $\lambda = 0,4 \dots 10$ мкм. В качестве источников излучения для диапазона $\lambda = 0,4 \dots 2,0$ мкм использовалась кварцевая вольфрам-галогенная лампа, а для диапазона $\lambda = 2,0 \dots 10$ мкм использовался карбид-кремниевый глобар. Для разных диапазонов λ использовались разные дифракционные решетки: 1500 штрихов на мм для диапазона 0,4...1,0 мкм, 600 штр/мм для 1,0...2,0 мкм, 300 штр/мм для 2,0...4,0 мкм и 150 штр/мм для 4,0...10 мкм, спектральное разрешение составляло около 4, 10, 20 и 40 нм соответственно. Излучение модулировалось с помощью оптико-механического модулятора на частоте 74 Гц, исследуемый фотоприемник освещался равномерно по всей площади, выходной сигнал приемника регистрировался с помощью синхронного усилителя EG&G 5210. Измерения проводились следующим образом. Сначала измерялся спектр отклика исследуемого пироприемника, затем измерялся спектр опорного пироприемника (с калиброванным спектром чувствительности) и первый спектр нормировался на второй. Опорным детектором являлся калиброванный пироэлектрический фотоприемник Oriol 70123 (Oriol Instruments, США) на основе танталата лития с входным окном CaF_2 и чувствительностью 1000 В/Вт. Абсолютная калибровка вольт-ваттной чувствительности исследуемого пироприемника проводилась с помощью сфокусированного излучения полупроводникового лазера с длиной волны 650 нм. Схема измерений строилась так, чтобы все излучение лазера полностью попадало на фотоприемные площадки обоих пироприемников.

Измерения в ТГц-диапазоне проводилось на квазиоптическом спектрометре с набором ламп обратной волны (ЛОВ) в качестве перестраиваемых источников монохроматического излучения с общим рабочим диапазоном частот излучения $\nu = 100 \dots 1000$ ТГц ($\lambda = 300 \dots 3000$ мкм). Измерения проводились при модуляции излучения с частотой 23 Гц оптико-механическим модулятором. Опорным детектором служил калиброванный оптико-акустический приемник (ОАП), по-другому называемый ячейкой Голея, производства Microtech Instruments, Inc. (США). Измерения проводились по аналогичной методике: сначала измерялся спектр отклика исследуемого пироприемника, затем спектр ячейки Голея, далее первый спектр нормировался на второй. Следует отметить, что диаметр фоточувствительной площадки ячейки Голея составляет примерно 6 мм и этого достаточно, чтобы поглотить весь поток излучения. Размер фоточувствительной площадки пироприемника составляет 1×1 мм и это меньше размера светового пятна в плоскости пироприемника. Поэтому для корректного сравнения чувствительностей ячейки Голея и пироприемника был измерен профиль пучка излучения и определена доля мощ-

ности, приходящейся на фоточувствительную площадку пироприемника. На частоте $\nu = 626$ ГГц доля составила 27 % от общей мощности излучения. Поэтому при сравнении абсолютных чувствительностей сигнал с пироприемника умножался на коэффициент $1/0,27 = 3,7$. Данная частота была выбрана потому, что на ней пространственное распределение мощности излучения по площади пучка было наиболее близким к распределению Гаусса и имело минимальную ширину на полувысоте. На других частотах форма распределения мощности отличалась от распределения Гаусса в более значительной степени и имело бóльшую ширину. Таким образом, проведенная калибровка чувствительности нового пироприемника является оценкой снизу.

2. Результаты и обсуждение

На рис. 2, *a* показан пример измеренного спектра вольт-ваттной чувствительности пироприемника в видимом и ИК-диапазоне. Видно, что с одной стороны спектральная зависимость практически ровная во всем диапазоне. С другой стороны зависимость имеет осцилляции в коротковолновой части спектра (0,4...3,0 мкм) и провалы в окрестности длин волн $\lambda \approx 3,4$; 6,8; 7,2 и 8,6 мкм. Также присутствуют небольшие осцилляции в диапазоне от 4,0 до 6,5 мкм.

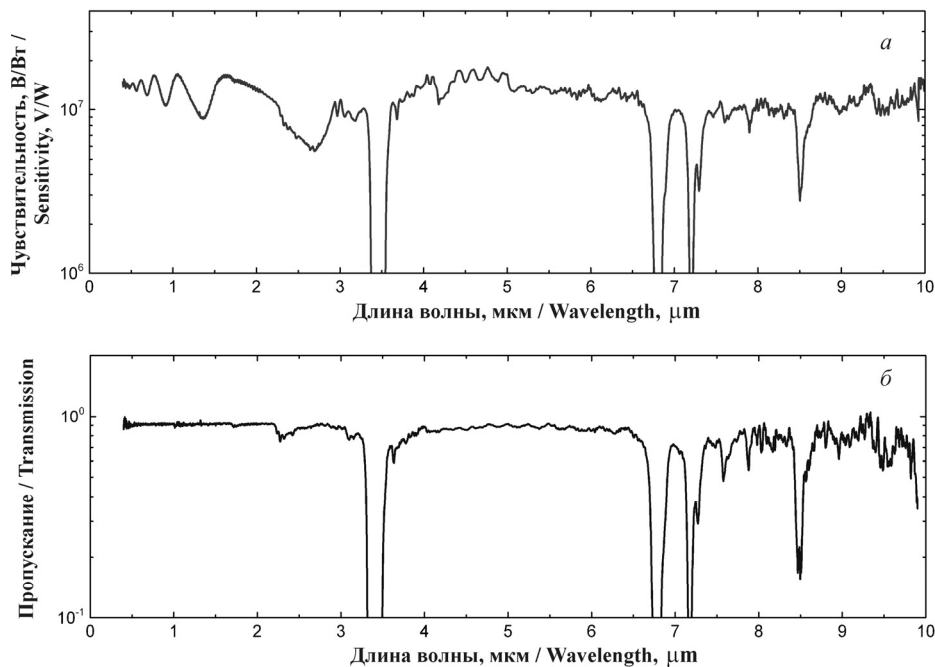


Рис. 2 – Спектр вольт-ваттной чувствительности пироприемника (*a*); спектр пропускания майларовой пленки (*б*)

Fig. 2 – A pyroelectric detector volt – watt sensitivity spectrum (*a*) and a mylar film transmission spectrum (*b*)

Увеличение шума в диапазоне 8...10 мкм связано с уменьшением энергии излучения источника (глобар + монохроматор) в этом диапазоне. Осцилляции могут быть связаны с интерференцией световых лучей, например, в пироэлектрической пленке или в майларовой пленке входного окна. Выяснение причин наблюдаемых осцилляций и их устранения требует дополнительных исследований, которые

будут выполнены в дальнейшей работе. Причиной провалов, можно предположить, является поглощение в майларовом окне. Для проверки этого предположения был измерен спектр пропускания пленки майлара, который показан на рис. 2, б. Видно, что провалы в спектрах хорошо совпадают и связаны с линиями поглощения майлара. Спектральные характеристики майларовых пленок в данном диапазоне ранее не исследовались, полученные результаты являются новыми, и их необходимо учитывать при конструировании детекторов с майларовым окном.

Вольт-ваттная чувствительность предложенного пироприемника находится в диапазоне $\approx 0,5 \dots 1,5 \cdot 10^7$ В/Вт. Вольт-ваттная чувствительность пироэлектрического фотоприемника Oriel 70123 составляла $1,0 \cdot 10^3$ В/Вт и эквивалентная мощность шума в единичной полосе (noise equivalent power, NEP) на уровне $3 \cdot 10^{-9}$ Вт/Гц^{1/2}. Максимальный шум исследуемого пироприемника составлял 6,0 мВ, что при полученной средней вольт-ваттной чувствительности $1,0 \cdot 10^7$ В/Вт дает $NEP = 6 \cdot 10^{-10}$ Вт/Гц^{1/2}. Что, примерно, в пять раз ниже NEP калибровочного детектора.

На рис. 3, а показан фрагмент спектральных зависимостей отклика пироприемника и ячейки Голя, измеренных на ЛОВ-спектрометре. Видно, что все спектры, включая спектр ячейки Голя, имеют ярко выраженный линейчатый характер, который связан с линейчатым спектром излучения ЛОВ [19, 20].

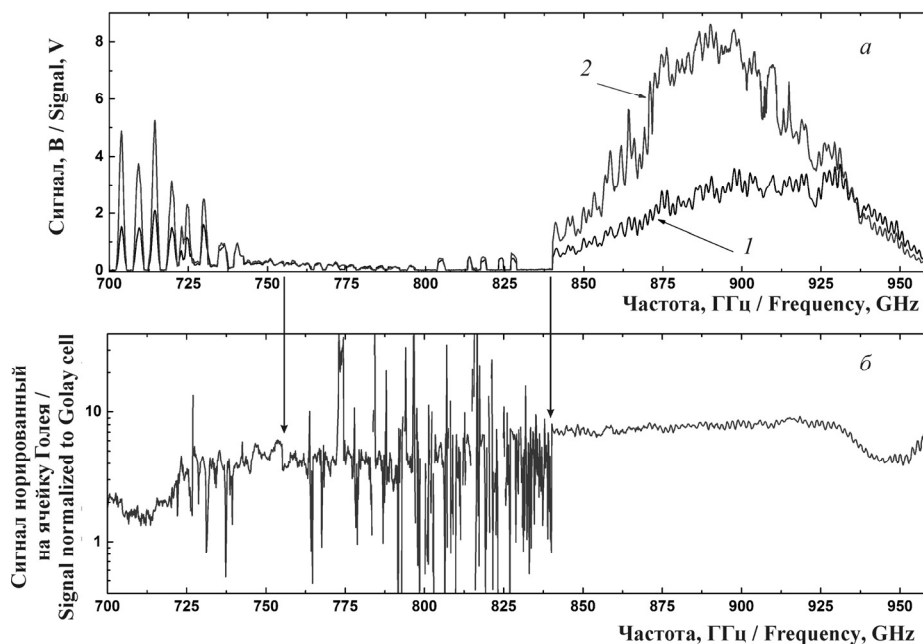


Рис. 3 – Фрагмент спектров отклика ячейки Голя и пироприемника:

а – исходные спектры ячейки Голя (1) и пироприемника (2); б – спектр отклика пироприемника, нормированный на сигнал ячейки Голя

Fig. 3 – A fragment of the Golay cell and pyroelectric detector response spectra:

a is an initial Golay cell (1) and pyroelectric detector response spectra; b is a pyroelectric detector response spectrum normalized to the Golay cell signal

При определенных частотах излучение практически отсутствует, например в диапазоне 750...830 ГГц, а там, где излучение регистрируется, амплитуда отклика пироприемника в 2–5 раз превышает сигнал от ячейки Голя. При этом, как гово-

рилось ранее, на фоточувствительную площадку пироприемника попадает только часть излучения, в отличие от ячейки Голя, которая поглощает все излучение.

В результате, при нормировке спектра пироприемника на спектр ячейки Голя в местах, где полезный сигнал отсутствует, возрастает роль шумов, что проявляется как шум высокой амплитуды, показанный на рис. 3, б (см. диапазон 750...830 ГГц, обозначенный стрелками). Чтобы уменьшить вклад таких шумов, была проведена математическая обработка нормированных спектров методом быстрого преобразования Фурье (FFT – Fast Fourier Transform) с окном 50. На рис. 4 приведен пример спектра отклика пироприемника во всем измеренном диапазоне частот 100...1000 ГГц, обработанном по данной методике. Пики, показанные стрелками, являются артефактами нормировки в случае отсутствия полезного сигнала и не должны учитываться.

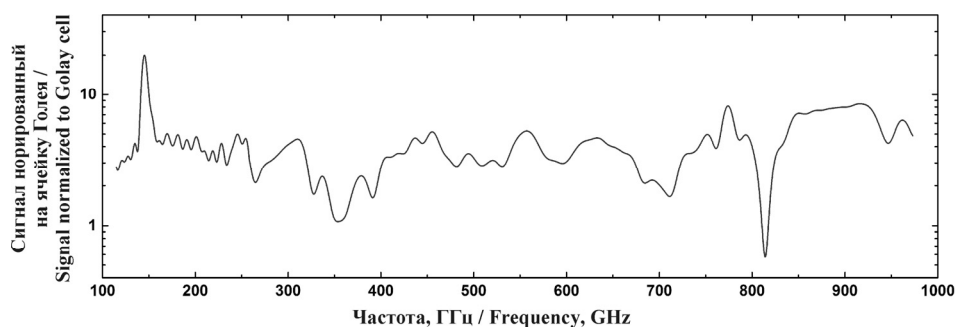


Рис. 4 – Спектр отклика пироприемника, нормированный на сигнал ячейки Голя и сглаженный методом быстрого преобразования Фурье. Стрелками показаны артефакты нормировки

Fig. 4 – The response spectrum of the pyroelectric detector normalized to the Golay cell signal and smoothed by the fast Fourier transform method. Arrows indicate normalization artifacts

Из рисунка видно, что чувствительность пироприемника в среднем имеет ровную спектральную (или спектрально независимую) характеристику и в 2...8 раз превышает чувствительность ячейки Голя, который является наиболее чувствительным детектором в данном диапазоне.

Спектральная независимость чувствительности пироприемника с толщиной чувствительного слоя 1 мкм в диапазоне длин волн 0,4...10 мкм и 300...3000 мкм не может быть объяснена поглощением в пироэлектрической пленке тетрааминодифенила. Вероятно, поглощение возникает в верхнем полупрозрачном электроде из алюминия, толщиной 0,01 мкм, и обусловлено аномальным скин-эффектом. Известно, что оптические характеристики металлических пленок, толщина которых меньше толщины скин-слоя, не зависят от частоты излучения [21–23], а поглощение при определенном соотношении толщины и проводимости слоя может достигать 50 %. В этом случае такая структура пироприемника является идеальной для сверхширокополосного приемника с чувствительностью от ультрафиолетового диапазона до миллиметрового диапазона.

На рис. 5 приведена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) пироприемника, измеренная при синусоидальной форме засветки и нормированная на максимум при частоте 100 Гц (кривая 1). Синусоидальная форма засветки обеспечивалась с помощью механического прерывателя, размер окна которого примерно совпадал с поперечным размером пучка излучения. Полученная характеристика определяется

параметрами предварительного усилителя, расположенного на чипе сенсора (позиция *б* на рис. 1, *а*). Данный усилитель имеет полосу частот пропускания 60...400 Гц с максимумом на 100 Гц. При использовании пироприемников в активных системах, как правило, с подсветкой прямоугольной формы, необходимо знать, как трансформируется АЧХ детектора. На рис. 5 показана АЧХ пироприемника при засветке источником на основе лавинно-пролетного диода с частотой излучения 140 ГГц (кривая 2). Модуляция проводилась подачей импульсов прямоугольной формы в систему питания источника. Полученная характеристика нормировалась на сигнал при частоте модуляции 100 Гц, так же как и для зависимости 1. Видно, что формы характеристик 1 и 2 похожи при частоте модуляции более 200 Гц. При этом сигнал при прямоугольной засветке превышает сигнал при синусоидальной засветке. При низких частотах, менее 100 Гц, характеристики ведут себя по-разному – при синусоидальной засветке сигнал падает, а при прямоугольной засветке растет.

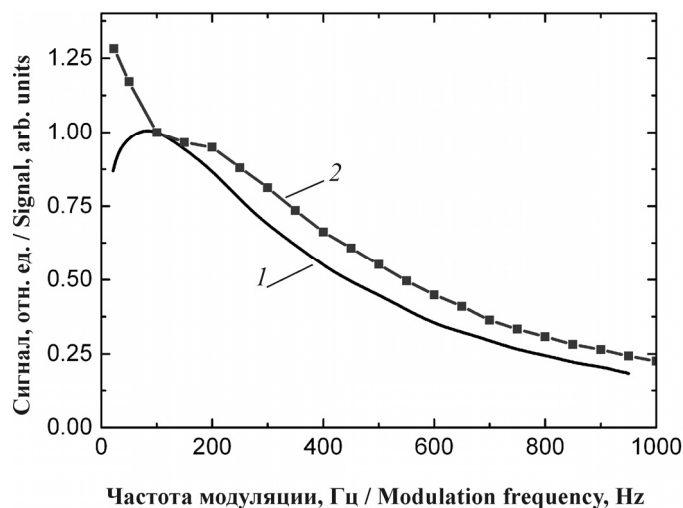


Рис. 5 – Амплитудно-частотные характеристики пироприемника при синусоидальной засветке 1 и при прямоугольной засветке 2

Fig. 5 – Amplitude-frequency characteristics of the pyroelectric detector with sinusoidal illumination 1 and with rectangular illumination 2

Данное отличие в поведении АЧХ обусловлено тем, что при прямоугольной засветке, в отличие от синусоидальной, в сигнале присутствует широкий набор частот, независимо от частоты модуляции, поэтому при частоте модуляции менее 100 Гц в сигнале засветки присутствуют сигналы с более высокими частотами, которые дают добавку к сигналу на частоте модуляции. Это также объясняет и прирост сигнала при частотах более 100 Гц. В нашем случае полученная АЧХ пироприемника определяется частотными характеристиками предварительного усилителя, расположенного на чипе сенсора. Однако известно, что пироэлектрические детекторы могут работать на частотах более 10 кГц, так как скорость отклика пироэлектрика ограничена лишь частотой колебательной поляризации кристаллической решетки (около 10^{12} Гц) [1]. Для расширения полосы пропускания детектора необходимо менять параметры предусилителя.

Заключение

В данной работе исследованы спектральные характеристики чувствительности нового пироэлектрического детектора излучения на основе слоев тетрааминодифенила толщиной 1 мкм в диапазонах длин волн 0,4...10 мкм и 300...3000 мкм. Показано, что вольт-ваттная чувствительность такого пироприемника имеет относительно ровную характеристику во всем измеренном диапазоне. Полученная мощность, эквивалентная шуму, составила $\approx 6 \cdot 10^{-10}$ Вт/Гц^{1/2}, что в 2...8 раз ниже, чем для известных пироэлектрических детекторов и ячейки Голея. Обнаружено, что пленка майлара, использованная в качестве входного окна детектора, имеет линии поглощения в ИК-диапазоне, что необходимо учитывать при конструировании приборов. Измерение амплитудно-частотной характеристики показало, что полоса пропускания пироприемника составляет около 500 Гц на уровне 0,7, определяется предварительным усилителем на чипе сенсора и может быть расширена за счет изменения параметра предусилителя.

Использование компактных вторичных усилителей и многоканального блока питания позволит строить относительно недорогие системы для спектрорадиометрических измерений в научных и технологических исследованиях. Также такие детекторы перспективны для построения компактных систем безопасности для выявления скрытых опасных объектов – оружия, взрывных устройств и др., использующих высокую проникающую способность ТГц-излучения. Такие системы привлекательны тем, что не оказывают ионизирующего воздействия на живые организмы и обладают приемлемым пространственным разрешением [24–25].

Таким образом, данный пироэлектрический приемник имеет хорошие перспективы для использования в широком спектральном диапазоне, от видимого до миллиметрового излучения, в спектрометрах для научных исследований, в промышленности для оперативного контроля источников ТГц-излучения, а также в системах безопасности и других системах, использующих видимое, ИК- и ТГц-излучение.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Rogalski A.** Infrared detectors. – 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. – 876 p.
2. **Shibasaki I., Kuze N.** Mass production of sensors grown by molecular beam epitaxy // Molecular beam epitaxy: from research to mass production / ed. by M. Henini. – 2nd ed. – Elsevier Inc., 2018. – Ch. 31. – P. 693–719. – DOI: 10.1016/C2016-0-02290-8.
3. **Spain E., Venkatanarayanan A.** Review of physical principles of sensing and types of sensing materials // Comprehensive Materials Processing. – 2014. – Vol. 13. – P. 5–46. – DOI: 10.1016/B978-0-08-096532-1.01302-9.
4. Pyroelectric materials for uncooled infrared detectors: processing, properties, and applications / M.D. Aggarwal, A.K. Batra, P. Guggilla, M.E. Edwards, B.G. Penn, J.R. Currie, Jr.. – Huntsville, Ala.: National Aeronautics and Space Administration, Marshall Space Flight Center, 2010. – 92 p.
5. **Schossing M., Norkus V., Gerlach G.** High performance pyroelectric infrared detectors // SENSOR+TEST Conferences 2009: Proceedings OPTO 2009 & IRS² 2009. – AMA Service, 2009. – P. 191–196. – DOI: 10.5162/irs09/i1.2.
6. Thin Film Lithium Tantalate (TFLTTM) pyroelectric detectors / V. Stenger, M. Shnider, S. Sriram, D. Dooley, M. Stout // Proceedings of SPIE. – 2012. – Vol. 8261. – Art. 82610Q.
7. **Wang J., Gou J., Li W.** Preparation of room temperature terahertz detector with lithium tantalate crystal and thin film // AIP Advances. – 2014. – Vol. 4. – P. 027106. – DOI: 10.1063/1.4865097.
8. **Rogalski A., Sizov F.** Terahertz detectors and focal plane arrays // Opto-Electronics Review. – 2011. – Vol. 19, N 3. – P. 346–404. – DOI: 10.2478/s11772-011-0033-3.

9. Novel detectors for traceable THz power measurements / R. Müller, W. Bohmeyer, M. Kehrt, K. Lange, C. Monte, A. Steiger // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2014. – Vol. 35, iss. 8. – P. 659–670. – DOI: 10.1007/s10762-014-0066-z.
10. Characterization of a large-area pyroelectric detector from 300 GHz to 30 THz / R. Müller, V. Gutschwager, J. Hollandt, M. Kehrt, C. Monte, R. Müller, A. Steiger // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2015. – Vol. 36, iss. 7. – P. 654–661. – DOI: 10.1007/s10762-015-0163-7.
11. Свойства дифенил-2,2',4,4'-тетрамина и тонкопленочная мишень пироэлектрического электронно-оптического преобразователя на его основе / С.М. Зорин, Б.Г. Гончаренко, В.В. Козлов, А.Н. Романов, В.Д. Салов // *Известия вузов. Материалы электронной техники*. – 2015. – Т. 18, № 3. – С. 205–211.
12. Молекулярная структура дифенил-2,2',4,4'-тетрамина и природа пироэлектрических свойств тонких пленок на его основе / А.Н. Романов, С.К. Гулярян, С.М. Зорин, В.В. Козлов, Б.Г. Гончаренко, В.Д. Салов // *Инженерный вестник Дона*. – 2014. – № 2. – URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_32_Romanov.pdf_2337.pdf (дата обращения: 08.11.2019).
13. Measurement of the dielectric, conductance and pyroelectric properties of MWCNT: PVDF nanocomposite thin films for application in infrared technologies / M. Edwards, J. Corda, S. Egarievwe, P. Guggilla // *Proceedings of SPIE*. – 2013. – Vol. 8868. – Art. 88680E. – DOI: 10.1117/12.2023097.
14. Pyroelectric properties of PVDF: MWCNT nanocomposite film for uncooled infrared detectors and medical applications / A.K. Batra, M.E. Edwards, P. Guggilla, M.D. Aggarwal, R.B. Lal // *Integrated Ferroelectrics*. – 2014. – Vol. 158, N 1. – P. 98–107. – DOI: 10.1080/10584587.2014.957559.
15. **Batra A.K., Aggarwal M.D.** Pyroelectric materials: infrared detectors, particle, accelerators, and energy harvesters. – Bellingham, WA: SPIE Press, 2013. – 202 p.
16. **Muralt P.** Micromachined infrared detectors based on pyroelectric thin films // *Reports on Progress in Physics*. – 2001. – N 64. – P. 1339–1388. – DOI: 10.1007/0-387-23319-9_5.
17. **Hossain A., Rashid M.** Pyroelectric detectors and their applications // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 1991. – Vol. 27, N 5. – P. 824–829. – DOI: 10.1109/28.90335.
18. Малогабаритный приемник оптического излучения пироэлектрический МГ-33 [Электронный ресурс] / ОАО НПП «Восток»: <http://www.vostok.nsk.su/files/pdf/MG33.pdf> (дата обращения: 08.11.2019).
19. **Лебедев И.В.** Техника и приборы СВЧ: в 2 т. – М.: Высшая школа, 1970–1972. – 2 т.
20. **Альтшулер Ю.Г., Татаренко А.С.** Лампы малой мощности с обратной волной. – М.: Советское радио, 1963. – 296 с.
21. **Андреев В.Г., Вдовин В.А., Воронов П.С.** Спектральные характеристики пленок хрома нанометровой толщины в терагерцовом диапазоне частот // *Письма в ЖТФ*. – 2003. – Т. 29, вып. 22. – С. 68–73.
22. Экспериментальное исследование поглощения волн миллиметрового диапазона в тонких металлических пленках / В.Г. Андреев, А.А. Ангелуц, В.А. Вдовин, В.Ф. Лукичев // *Письма в ЖТФ*. – 2015. – Т. 41, вып. 4. – С. 52–60.
23. **Пронин С.М., Вдовин В.А., Андреев В.Г.** Исследование оптических коэффициентов нанометровых пленок меди и золота в СВЧ диапазоне // *Ученые записки физического факультета Московского университета*. – 2016. – Т. 5. – С. 165411.
24. THz and security applications: detectors, sources and associated electronics for THz applications / ed. by C. Corsi, F. Sizov. – Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2014. – 292 p. – (NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics).
25. Hidden object detection: security applications of terahertz technology / W.R. Tribe, D.A. Newnham, Ph.F. Taday, M.C. Kemp // *Proceedings of SPIE*. – 2004. – Vol. 5354. – P. 168–176. – DOI: 10.1117/12.543049.

**SPECTRAL CHARACTERISTICS OF THE PYROELECTRIC
DETECTOR SENSITIVITY BASED ON TETRAAMINODIPHENYL
IN VISIBLE, IR AND THz - RANGES**

**Paulish A.G.^{1,4}, Golyashov V.A.², A.V. Gusachenko A.V.¹, Morozov A.O.¹,
Dorozhkin K.V.³, Suslyaev V.I.³, Kostyuchenko V.Ya.⁴, Pyrgaeva S.M.⁵**

¹ *Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics,
SB RAS, "Technological Design Institute of Applied
Microelectronics", Novosibirsk, Russian Federation*

² *Institute of Semiconductor Physics, SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation*

³ *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

⁴ *Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation*

⁵ *Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation*

The results of studies of the spectral sensitivity characteristics of a new pyroelectric detector based on tetraaminodiphenyl layers 1 μm thick in the wavelength range of 0.4–10 μm and 300...3000 μm are presented. The photosensitive element size of the pyrodetector was 1 \times 1 mm. A mylar film with a thickness of about 70 μm was used as an input window that is transparent in the indicated ranges. The mylar was found to have absorption lines in the range of 0.4...10 μm , which must be taken into account when developing broadband detectors. The minimum detectable radiation power (noise equivalent power) in the visible and infrared ranges was less than 6×10^{-10} W/Hz^{1/2}, which is about five times lower than for analogues. In the THz range, the sensitivity of the pyrodetector presented is 2...8 times higher than the sensitivity of the Golay cell. It was shown that the sensitivity of such a pyrodetector weakly depends on the wavelength in the entire measured range. This can be explained by an anomalous skin-effect in a semitransparent aluminum electrode, which leads to spectrally independent absorption of radiation at a level of 40...50 %. The passband of the pyrodetector, determined from the measured amplitude-frequency characteristic for sinusoidal and rectangular illumination, is approximately 500 Hz and is determined by the parameters of the amplifier located on the sensor chip, and can be expanded.

Keywords: pyroelectric detectors, IR and THz radiation detectors, tetraaminodiphenyl, IR spectroscopy, THz spectroscopy

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-57-69

REFERENCES

1. Rogalski A. *Infrared detectors*. 2nd ed. Boca Raton, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. 876 p.
2. Shibasaki I., Kuze N. Mass production of sensors grown by molecular beam epitaxy. *Molecular Beam Epitaxy: from research to mass production*. 2nd ed. Ed. by M. Henini. Elsevier Inc., 2018, pp. 693–719. DOI: 10.1016/C2016-0-02290-8.
3. Spain E., Venkatanarayanan A. Review of physical principles of sensing and types of sensing materials. *Comprehensive Materials Processing*, 2014, vol. 13, pp. 5-46. DOI: 10.1016/B978-0-08-096532-1.01302-9.
4. Aggarwal M.D., Batra A.K., Guggilla P., Edwards M.E., Penn B.G., Currie J.R., Jr. *Pyroelectric materials for uncooled infrared detectors: processing, properties, and applications*. Huntsville, Ala., National Aeronautics and Space Administration, Marshall Space Flight Center, 2010. 92 p.
5. Schossing M., Norkus V., Gerlach G. High performance pyroelectric infrared detectors. *SENSOR+TEST Conferences 2009: Proceedings OPTO 2009 & IRS² 2009*. AMA Service, 2009, pp. 191–196. DOI: 10.5162/irs09/i1.2.
6. Stenger V., Shnider M., Sriram S., Dooley D., Stout M. Thin Film Lithium Tantalate (TFLTTM) pyroelectric detectors. *Proceedings of SPIE*, 2012, vol. 8261, art. 82610Q.
7. Wang J., Gou J., Li W. Preparation of room temperature terahertz detector with lithium tantalate crystal and thin film. *AIP Advances*, 2014, vol. 4, p. 027106. DOI: 10.1063/1.4865097.
8. Rogalski A., Sizov F. Terahertz detectors and focal plane arrays. *Opto-Electronics Review*, 2011, vol. 19, no. 3, pp. 346–404. DOI: 10.2478/s11772-011-0033-3.

9. Müller R., Bohmeyer W., Kehrt M., Lange K., Monte C., Steiger A. Novel detectors for traceable THz power measurements. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2014, vol. 35, iss. 8, pp. 659–670. DOI: 10.1007/s10762-014-0066-z.
10. Müller R., Gutschwager B., Hollandt J., Kehrt M., Monte C., Müller R., Steiger A. Characterization of a large-area pyroelectric detector from 300 GHz to 30 THz. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2015, vol. 36, iss. 7, pp. 654–661. DOI: 10.1007/s10762-015-0163-7.
11. Zorin S.M., Goncharenko B.G., Kozlov V.V., Romanov A.N., Salov V.D. Svoistva difenil–2,2',4,4'–tetraamina i tonkopenochnaya mishen' piroelektricheskogo elektronno-opticheskogo preobrazovatelya na ego osnove [Diphenyl–2,2',4,4'–tetraamine properties and the thin–film target of a pyroelectric thermal image transducer on its basis]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Materialy elektronnoi tekhniki – Materials of Electronics Engineering*, 2015, vol. 18, no. 3, pp. 205–211.
12. Romanov A.N., Gularyan S.K., Zorin S.M., Kozlov V.V., Goncharenko B.G., Salov V.D. Molekulyarnaya struktura difenil–2,2',4,4'–tetraamina i priroda piroelektricheskikh svoystv tonkikh plenok na ego osnove [Diphenyl–2,2',4,4'–tetraamine molecular structure and its thin film pyroelectric properties]. *Inzhenernyi vestnik Dona – Engineering Journal of Don*, 2014, no. 2. Available at: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_32_Romanov.pdf_2337.pdf (accessed 08.11.2019).
13. Edwards M., Corda J., Egarievwe S., Guggilla P. Measurement of the dielectric, conductance and pyroelectric properties of MWCNT: PVDF nanocomposite thin films for application in infrared technologies. *Proceedings of SPIE*, 2013, vol. 8868, art. 88680E. DOI: 10.1117/12.2023097.
14. Batra A.K., Edwards M.E., Guggilla P., Aggarwal M.D., Lal R.B. Pyroelectric properties of PVDF: MWCNT nanocomposite film for uncooled infrared detectors and medical applications. *Integrated Ferroelectrics*, 2014, vol. 158, no. 1, pp. 98–107. DOI: 10.1080/10584587.2014.957559.
15. Batra A.K., Aggarwal M.D. *Pyroelectric materials: infrared detectors, particle, accelerators, and energy harvesters*. Bellingham, WA, SPIE Press, 2013. 202 p.
16. Murali P. Micromachined infrared detectors based on pyroelectric thin films. *Reports on Progress in Physics*, 2001, no. 64, pp. 1339–1388. DOI: 10.1007/0-387-23319-9_5.
17. Hossain A., Rashid M. Pyroelectric detectors and their applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1991, vol. 27, no. 5, pp. 824–829. DOI: 10.1109/28.90335.
18. *Malogabaritnyi priemnik opticheskogo izlucheniya piroelektricheskii MG-33* [Small-sized pyroelectric optical radiation receiver MG-33]. OAO NPP "Vostok". (In Russian). Available at: <http://www.vostok.nsk.su/files/pdf/MG33.pdf> (accessed 08.11.2019).
19. Lebedev I.V. *Tekhnika i pribory SVCh. V 2 t.* [Microwave equipment and devices. In 2 vol.]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1970–1972.
20. Al'tshuler Yu.G., Tatarenko A.S. *Lampy maloi moshchnosti s obratnoi volnoi* [Low-power backward wave tubes]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1963. 296 p.
21. Andreev V.G., Vdovin V.A., Voronov P.S. Spektral'nye kharakteristiki plenok khroma nanometrovoy tolshchiny v teragertsovom diapazone chastot [Spectral characteristics of chromium films of nanometer thickness in the terahertz frequency range]. *Pis'ma v ZhTF – Technical Physics Letters*, 2003, vol. 29, iss. 22, pp. 68–73. (In Russian).
22. Andreev V.G., Angeluts A.A., Vdovin V.A., Lukichev V.F. Eksperimental'noe issledovanie pogloshcheniya voln millimetrovogo diapazona v tonkikh metallicheskih plenkakh [Experimental study of the absorption of millimeter-wave waves in thin metal films]. *Pis'ma v ZhTF – Technical Physics Letters*, 2015, vol. 41, no. 4, pp. 52–60. (In Russian).
23. Pronin S.M., Vdovin V.A., Andreev V.G. Issledovanie opticheskikh koeffitsientov nanometrovoykh plenok medi i zolota v SVCh diapazone [Studying the optical coefficients of nanometer-thick copper and gold films at microwave frequencies]. *Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo universiteta – Memoirs of the Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University*, 2016, no. 5, p. 165441.
24. Corsi C., Sizov F., eds. *THz and security applications: detectors, sources and associated electronics for THz applications*. Dordrecht, The Netherlands, Springer, 2014. 292 p.
25. Tribe W.R., Newnham D.A., Taday Ph.F., Kemp M.C. Hidden object detection: security applications of terahertz technology. *Proceedings of SPIE*, 2004, vol. 5354, pp. 168–176. DOI: 10.1117/12.543049.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Паулиш Андрей Георгиевич – родился в 1963 году, канд. физ.-мат. наук, доцент, ученый секретарь Филиала Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники, доцент Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: оптико-электронные системы и приборы, ИК- и ТГц-спектроскопия, тензометрия. Опубликовано более 100 научных работ. (Адрес: 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 2/1. E-mail: paulish@corp.nstu.ru).

Paulish Andrey Georgievich (b. 1963) – Candidate of Sciences (Phys.&Math.), assistant professor, Scientific Secretary of Novosibirsk Branch of the Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SB RAS, «Technological Design Institute of Applied Microelectronics». Assistant professor of Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on optoelectronic system and devices, IR- and THz-spectroscopy, strain gauge. He is author of more than 100 scientific papers. (Address: 2/1, Lavrentev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: paulish@corp.nstu.ru).



Голяшов Владимир Андреевич – родился в 1989, м.н.с. Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН. Область научных интересов: физика полупроводников и диэлектриков, тонкие пленки, спектроскопия. Опубликовано более 17 научных работ. (Адрес: 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 13. E-mail: vladimirogolyashov@gmail.com).

Golyashov Vladimir Andreevich (b. 1989) – Junior Researcher of Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS. His research interests are currently focused on semiconductor and dielectric science and technology, thin films, spectroscopy. He is author of more than 17 scientific papers. (Address: 13, Lavrentev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: vladimirogolyashov@gmail.com).



Гусаченко Анатолий Вячеславович – родился в 1963 году, заведующий сектором Филиала Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники. Область научных интересов: оптико-электронные системы и приборы. Опубликовано 20 научных работ. (Адрес: 630090, Россия, г. Новосибирск, про. Лаврентьева, 2/1. E-mail: avgus@oesd.ru).

Gusachenko Anatoly Vyacheslavovich (b. 1963) – head of electronic sector of Novosibirsk Branch of the Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SB RAS, «Technological Design Institute of Applied Microelectronics». His research interests are currently focused on optoelectronic system and devices. He is author of 20 scientific papers. (Address: 2/1, Lavrentev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: avgus@oesd.ru).



Морозов Александр Олегович – родился в 1989 году, старший инженер-электроник Филиала Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники. Область научных интересов: оптико-электронные системы и приборы. Опубликовано 6 научных работ. (Адрес: 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 2/1. E-mail: Msmer@yandex.ru).

Morozov Alexander Olegovich (b. 1989) – senior electronic engineer of Novosibirsk Branch of the Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SB RAS, «Technological Design Institute of Applied Microelectronics». His research interests are currently focused on optoelectronic system and devices. He is author of 6 scientific papers. (Address: 2/1, Lavrentev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: Msmer@yandex.ru).



Дорожкин Кирилл Валерьевич – родился в 1990 году, аспирант Национального исследовательского Томского государственного университета. Область научных интересов: радиофизика, ТГц-спектроскопия. Опубликовано 29 научных работ. (Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: yasbtk@yandex.ru).

Dorozhkin Kirill Valerevich (b. 1990) – graduate student of National Research Tomsk State University. His research interests are currently focused on radiophysics, THz spectroscopy. He is author of 29 scientific papers. (Address: 36, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russia. E-mail: yasbtk@yandex.ru).



Суслев Валентин Иванович – родился в 1946 году, канд. физ.-мат. наук, доцент Национального исследовательского Томского государственного университета. Область научных интересов: радиоэлектроника, оптика, СВЧ техника и технология. Опубликовано 85 научных работ. (Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: susl@mail.tsu.ru).

Suslyayev Valentin Ivanovich (b. 1946) – Candidate of Sciences (Phys.&Math.), assistant professor of National Research Tomsk State University. His research interests are currently focused on radio electronics, optics, microwave equipment and technology. He is author of 85 scientific papers. (Address: 36, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russia. E-mail: susl@mail.tsu.ru).



Костюченко Владимир Яковлевич – родился в 1957 году, д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: физика полупроводников и диэлектриков, физическая электроника. Опубликовано 67 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: kostyuchenko@corp.nstu.ru).

Kostyuchenko Vladimir Yakovlevich (b. 1957) – Doctor of Sciences (Phys.&Math.), assistant professor, professor of Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on physics of semiconductors and dielectrics, physical electronics. He is author of 67 scientific papers. (Address: 20, Karl Marks Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: kostyuchenko@corp.nstu.ru).



Пыргаева Светлана Михайловна родилась в 1963 году, канд. физ.-мат. наук, доцент Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. Область научных интересов: физика конденсированного состояния, дефекты в кристаллах и поликристаллах, спектроскопия. Опубликовано 56 научных работ. (Адрес: 656038, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, 46. E-mail: genphys@mail.ru).

Pyrgaeva Svetlana Mikhailovna (b. 1963) – Candidate of Sciences (Phys.&Math.), assistant professor of Polzunov Altai State Technical University. His research interests are currently focused on solid state physics, defects in crystals and polycrystals, spectroscopy. He is author of 56 scientific papers. (Address: 46, Lenin Av., Barnaul, 656038, Russia. E-mail: genphys@mail.ru).

*Статья поступила 06 августа 2019 г.
Received August 06, 2019*

To Reference:

Paulish A.G., Golyashov V.A., Gusachenko A.V., Morozov A.O., Dorozhkin K.V., Suslyayev V.I., Kostyuchenko V.Ya., Pyrgaeva S.M. Spektral'nye kharakteristiki chuvstvitel'nosti piroelektricheskogo detektora na osnove tetraaminodifenila v vidimom, IK- i TGts-diapazonakh [Spectral characteristics of the pyroelectric detector sensitivity based on tetraaminodiphenyl in visible, IR and THz-ranges]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, no. 3 (44), pp. 57-69. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-57-69.

УДК 537.2 (075)

**ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН В ЖИДКОСТИ
ПРИ ЗАВИСИМОСТИ ВЯЗКОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ****В.К. Ткачев, А.В. Еремин, Т.Б. Тарабрина, И.В. Кудинов**
Самарский государственный технический университет

На основе определения дополнительной искомой функции и дополнительных граничных условий в интегральном методе теплового баланса получено приближенное аналитическое решение задачи теплообмена при течении жидкости в цилиндрическом канале при параболическом законе изменения вязкости от температуры. В качестве дополнительной принималась функция, характеризующая изменение температуры по продольной координате в центре канала. Ее использование основано на свойстве параболического уравнения, связанном с бесконечной скоростью распространения теплоты, согласно которому температура в центре канала изменяется сразу после приложения граничного условия на его поверхности. Применение дополнительной искомой функции позволяет сводить решение уравнения в частных производных к интегрированию обыкновенного дифференциального уравнения. Дополнительные граничные условия находятся в таком виде, чтобы их выполнение искомым решением было эквивалентно выполнению исходного дифференциального уравнения в граничных точках. Показано, что выполнение уравнения на границах приводит к его выполнению и внутри рассматриваемой области, с точностью, зависящей от числа используемых при получении решения дополнительных граничных условий. Исследования полученных результатов показали существенное различие профилей скорости при нагреве жидкости и при охлаждении. Так, при нагреве профиль скорости приближается к профилю стержневого течения, характеризующегося практически постоянной скоростью по сечению канала, а при охлаждении он оказывается вытянутым в продольном направлении. Выполненные исследования показали существенное различие в распределении температуры, полученной с учетом температурной зависимости вязкости и без ее учета.

Ключевые слова: теплообмен в движущейся жидкости, зависимость вязкости от температуры, дополнительная искомая функция, дополнительные граничные условия, бесконечная скорость распространения теплоты, интегральный метод теплового баланса.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-70-86

Введение

Классические математические постановки краевых задач теплообмена для движущихся жидкостей включают допущение о независимости профиля скорости течения от температуры. Формула для профиля скорости в данном случае определяется из решения уравнения Навье–Стокса, которое для гидродинамически стабилизированного течения приводится к уравнению Пуассона [1, 2]. Из решений этого уравнения следует, что профиль скорости для канала конкретной формы поперечного сечения определяется вязкостью жидкости и перепадом давления по его длине. Учитывая, что вязкость многих жидкостей существенно зависит от температуры, то неучет этой зависимости в математических постановках краевых задач может приводить к существенному отличию распределения скорости и температуры от результатов, наблюдающихся в реальных физических процессах теплообмена в движущихся жидкостях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00029 мол_а.

© 2019 В.К. Ткачев, А.В. Еремин, Т.Б. Тарабрина, И.В. Кудинов

Теоретические положения, связанные с учетом зависимости вязкости от температуры при расчетах распределения скоростей и температур в движущихся жидкостях, приводятся в работах [3–6]. В них принимается линейная или экспоненциальная зависимость вязкости от температуры $\mu(T) = \mu_0(1 - \beta(T - T_0))$; $\mu(T) = \mu_0 e^{-\beta(T - T_0)}$, где μ_0 – вязкость при температуре $T = T_0$; β – коэффициент, характеризующий интенсивность изменения вязкости от температуры; T_0 – начальная температура. Из формул (1) и (2) следует, что при нагреве ($T > T_0$) вязкость уменьшается, а при охлаждении – возрастает. При использовании этих формул температура оказывается включенной в уравнение движения (Навье–Стокса). В связи с чем для определения профилей скорости и температурного состояния движущихся жидкостей необходимо совместное решение сильно нелинейных уравнений движения и энергии. Математическая постановка задачи в этом случае настолько усложняется, что получение ее не только аналитических, но и численных решений, крайне затруднительно. В работах [3–6] подобная система уравнений упрощается за счет отказа от учета нестационарности процесса и конвективного переноса теплоты по пространственным переменным. Однако подобное упрощение можно принять лишь в отдельных частных случаях (например, когда число Рейнольдса мало, $Re < 1$), что существенно снижает число задач, к которым можно применить данный метод. К тому же при нагреве жидкости вязкость уменьшается и, следовательно, число Рейнольдса возрастает. Это возрастание может быть столь существенным, что неучет нестационарности процесса и конвективного переноса теплоты по продольной переменной могут привести к существенному отклонению математической модели от реального физического процесса.

В работе П.В. Цоя [2] рассматривается метод учета зависимости вязкости от температуры, в котором уравнения движения и энергии решаются раздельно. В данном случае формула для вязкости принимается в виде линейной, параболической или экспоненциальной зависимости от поперечной пространственной переменной, считая, что температура по этой переменной также изменяется по какой-либо из этих зависимостей. В данном случае формула для вязкости не содержит непосредственно температуру и, в связи с чем появляется возможность раздельного решения уравнений движения и энергии с учетом в уравнении энергии профиля скорости, полученного из решения уравнения движения. При этом уравнения энергии на нагрев и на охлаждение жидкости решаются раздельно. Разумеется, такой метод решения является приближенным, так как закон изменения вязкости от поперечной пространственной переменной задается в предположении, что температура качественно изменяется по аналогичному закону. Исходя из начальных и граничных условий теплообмена, подобную оценку приближенно всегда можно выполнить. Преимущества такого метода в том, что не требуется вводить все указанные выше допущения.

1. Постановка задачи

В настоящей работе при определении профиля скорости с учетом зависимости вязкости от температуры применена математическая теория, разработанная в [2]. Найденные профили используются затем при решении задач теплообмена методом, основанном на определении дополнительных искомым функций и дополнительных граничных условий.

2. Описание метода решения и полученные результаты

Уравнение, определяющее распределение скорости в цилиндрическом канале, имеет вид [1, 2]

$$\frac{1}{y} \frac{\partial W}{\partial y} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} = -\frac{r_0^2}{\mu} \frac{\partial p}{\partial \eta}, \quad (1)$$

где $y = \xi / r_0$ – безразмерная поперечная координата; η – продольная координата, м; W – скорость, м/с; r_0 – радиус трубы, м; μ – коэффициент динамической вязкости, кг/(м · с); ξ – поперечная координата, м; p – давление, Па.

При постоянной от температуры вязкости величина r_0^2 / μ правой части уравнения (1) для любого y будет неизменной. В работе [2] зависимость величины $1 / \mu$ от координаты y представляется в виде

$$1 / \mu = \varphi(y, \delta) / \mu_0, \quad (2)$$

где $\varphi(y, \delta)$ – функция, учитывающая зависимость величины $1 / \mu$ от координаты y и от некоторого параметра δ , характеризующего степень (интенсивность) этой зависимости ($\delta > 0$ – нагрев, $\delta < 0$ – охлаждение жидкости); μ_0 – коэффициент динамической вязкости жидкости на оси трубы. Величина $\varphi(y, \delta)$ принимается в таком виде, чтобы на оси трубы $\varphi(0, \delta) = 1$. Таким образом, задавая различные зависимости функции $\varphi(y, \delta)$ (линейные, параболические, экспоненциальные) от координаты y , выполняется учет зависимости вязкости и от температуры ввиду того, что температура также зависит от координаты y .

Уравнение (1) с учетом (2) принимает вид

$$\frac{1}{y} \frac{dW}{dy} + \frac{d^2W}{dy^2} = -\frac{r_0^2}{\mu_0} \varphi(y, \delta) \frac{\Delta P}{l}, \quad (3)$$

где $\Delta P / l = \partial p / \partial \eta$; l – длина трубы.

Полагая, что величина $\varphi(y, \delta)$ является линейной функцией координаты y , получаем $\varphi(y, \delta) = \mu_0(1 + \delta y)$. Решение уравнения (3) при граничных условиях:

$$\partial W(0) / \partial y = 0; \quad (4)$$

$$W(1) = 0 \quad (5)$$

имеет вид [2]

$$W(y, \delta) = r_0^2 \Delta P (9 + 4\delta - y^2(9 + 4\delta y)) / (36\mu_0 l). \quad (6)$$

Средняя скорость жидкости находится по формуле $W_{\text{ср}} = G / S$, где $S = \pi r_0^2$ – площадь сечения трубопровода; G – расход жидкости, определяемый по соотношению [1, 2]:

$$G = \pi r_0^2 W_{\text{ср}} = \int_0^{2\pi} d\rho \int_0^{r_0} W(y, \delta) y dy = \pi r_0^2 (45 + 24\delta) \Delta P / (360\mu_0 l). \quad (7)$$

С учетом формулы для средней скорости соотношение (6) принимает вид

$$W(y, \delta) = W_{\text{cp}} \left(9 + 4\delta - y^2(9 + 4\delta y) \right) / (4,5 + 2,4\delta). \quad (8)$$

При параболическом распределении вязкости ($\varphi(y, \delta) = 1 + \delta y^2$) уравнение (3) будет

$$\frac{1}{y} \frac{dW}{dy} + \frac{d^2W}{dy^2} = - \frac{r_0^2 (1 + \delta y^2) \Delta P}{\mu_0 l}. \quad (9)$$

Интегрируя уравнение (9) при граничных условиях (4), (5), находим

$$W(y, \delta) = 1,5W_{\text{cp}}(4(1 - y^2) + \delta(1 - y^4)) / (3 + \delta). \quad (10)$$

Средняя скорость при известном перепаде давления по длине трубы находится по формуле $W_{\text{cp}} = r_0^2 (3 + \delta) \Delta P / (24\mu_0 l)$.

При $\delta \rightarrow 0$ формула (10) приводится к известному классическому решению Пуазейля для уравнения (9) $W(y, 0) = 2W_{\text{cp}}(1 - y^2)$.

Профили безразмерной скорости $\omega(y, \delta) = W(y, \delta) / W_{\text{cp}}$, найденные по формуле (10) при нагреве ($\delta = 10$), охлаждении ($\delta = -2$) и изотермическом течении ($\delta = 0$), приведены на рис. 1.

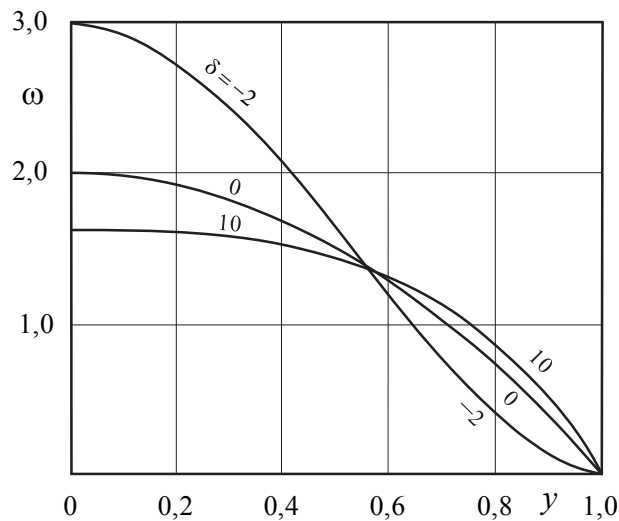


Рис. 1 – Распределение скорости при нагреве ($\delta = 10$), охлаждении ($\delta = -2$) и изотермическом течении ($\delta = 0$). Расчет по формуле (10)

Fig. 1 – Velocity distribution when heated ($\delta = 10$), cooled ($\delta = -2$) and in an isothermal flow ($\delta = 0$). Evaluation by formula (10)

Найдем решение краевой задачи теплообмена с учетом зависимости вязкости среды от температуры в следующей математической постановке (рис. 2)

$$W(y, \delta) \frac{\partial t(\xi, \eta)}{\partial \eta} = \frac{a}{\xi} \frac{\partial t(\xi, \eta)}{\partial \xi} + a \frac{\partial^2 t(\xi, \eta)}{\partial \xi^2}; \quad (11)$$

$$(\eta > 0; 0 < \xi < r_0);$$

$$t(\xi, 0) = t_0; \quad (12)$$

$$t(r_0, \eta) = t_c; \quad (13)$$

$$\partial t(0, \eta) / \partial \xi = 0, \quad (14)$$

где t – температура; η – продольная координата; ξ – поперечная координата; a – коэффициент температуропроводности жидкости; $W(y, \delta)$ – профиль скорости; t_0 – температура жидкости на входе в канал ($\eta = 0$); t_c – температура жидкости на стенке ($\xi = r_0$).

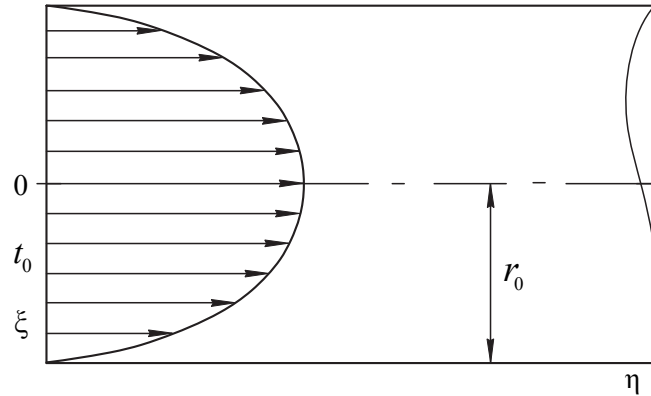


Рис. 2 – Схема стабилизированного ламинарного течения жидкости в круглой трубе

Fig. 2 – A diagram of a stabilized laminar liquid flow in a circular pipe

В математической постановке задачи (11)–(14) приняты следующие допущения: течение жидкости стабилизированное (профиль скорости по длине канала не изменен); жидкость несжимаема, ее физические свойства постоянны; внутренние источники теплоты отсутствуют; изменением температуры в результате трения (диссипацией энергии) пренебрегается [1, 2].

Квазистационарная нелинейная задача (11)–(14) известна как задача Гретца–Нуссельта. Впервые она была решена Гретцем и, независимо от него – Нуссельтом. Уточнение полученного ими решения дано в [1]. Приведенное в [1] решение представляет бесконечный функциональный ряд, плохо сходящийся при малых значениях продольной переменной. И к тому же в зависимости от величины поперечной координаты решение включает функции Бесселя различного (в том числе и дробного) порядка. Особую трудность представляет также нахождение собственных чисел, определяемых из степенных уравнений, решение которых при большом числе членов ряда решения возможно лишь численными методами.

В аналитической теории теплопроводности известны методы, основанные на определении фронта температурного возмущения – глубины прогретого (терми-

ческого) слоя [7–11]. При их использовании процесс теплопроводности разделяется на две стадии по времени, первая из которых характеризуется постепенным продвижением фронта температурного возмущения от поверхности тела к его центру, а вторая – изменением температуры в пределах всей области изменения пространственной переменной. Отметим, что применительно к задачам теплообмена для движущихся жидкостей процесс теплообмена разделяется на две стадии по продольной пространственной переменной. Общим недостатком интегральных методов является низкая точность получаемых решений. Для ее повышения в работах [7, 12] применены дополнительные граничные условия. На их основе показано, что с увеличением числа приближений n происходит уменьшение времени перемещения фронта температурного возмущения от поверхности тела до его центра, т. е. происходит возрастание скорости его движения. И в пределе при $n \rightarrow \infty$ скорость перемещения фронта также устремляется к бесконечному значению, что подтверждает факт бесконечной скорости распространения теплоты. Отсюда следует, что с увеличением числа приближений диапазон времени (для движущихся жидкостей – диапазон продольной переменной), в котором определена первая стадия процесса, уменьшается, а второй стадии – увеличивается. В связи с чем решения, полученные для первой стадии, могут быть использованы лишь при малых и сверхмалых значениях времени (для жидкостей – продольной переменной). Учитывая этот факт, в настоящей работе рассматривается метод получения аналитического решения, позволяющий избежать рассмотрения первой стадии процесса.

Основная идея метода связана с использованием дополнительной искомой функции и дополнительных граничных условий. Целью введения дополнительной функции является сведение решения исходного уравнения в частных производных к интегрированию обыкновенного дифференциального уравнения. Дополнительные граничные условия находятся в таком виде, чтобы их выполнение искомым решением было эквивалентно выполнению исходного уравнения в граничных точках. Отметим, что метод решения, связанный с выполнением уравнения в граничных точках, использовался в работах [13 – 15].

В качестве конкретного примера применения изложенного метода рассмотрим последовательность получения аналитического решения задачи (11)–(14) при $\delta = -2$ (задача на охлаждение, $t_0 > t_c$). Формула (10) в этом случае будет

$$W(y, \delta) = 3W_{cp}(1 - 2y^2 + y^4).$$

Введем следующие безразмерные переменные:

$$\Theta = \frac{t - t_c}{t_0 - t_c}; \quad y = \frac{\xi}{r_0}; \quad x = \frac{\eta a}{3W_{cp}r_0^2}. \quad (15)$$

С учетом принятых обозначений задача (11) – (14) будет

$$y(1 - 2y^2 + y^4) \frac{\partial \Theta(y, x)}{\partial x} = \frac{\partial \Theta(y, x)}{\partial y} + y \frac{\partial^2 \Theta(y, x)}{\partial y^2}; \quad (16)$$

$$(x > 0; \quad 0 < y < 1);$$

$$\Theta(y, 0) = 1; \quad (17)$$

$$\Theta(1, x) = 0; \quad (18)$$

$$\partial \Theta(0, x) / \partial y = 0. \quad (19)$$

Введем дополнительную искомую функцию

$$q(x) = \Theta(0, x), \quad (20)$$

характеризующую изменение температуры в центре канала в зависимости от величины продольной координаты. Отметим, что ввиду бесконечной скорости распространения теплоты температура в центре канала будет изменяться сразу после приложения граничного условия первого рода (18) на его поверхности. Следовательно, диапазон изменения функции $q(x)$ будет включать весь диапазон изменения продольной пространственной переменной x .

Решение задачи (16)–(19) принимается в виде

$$\Theta(y, x) = \sum_{k=1}^n b_k(q) \varphi_k(y), \quad (21)$$

где $b_k(q)$ – неизвестные коэффициенты; $\varphi_k(y) = 1 - y^{2k}$ – координатные функции.

Очевидно, что ввиду принятой системы координатных функций соотношение (21) удовлетворяет граничным условиям (18), (19). Неизвестные коэффициенты $b_k(q)$ будем находить из соотношения (20) и некоторых дополнительных граничных условий, определяемых в таком виде, чтобы их выполнение соотношением (21) было эквивалентно выполнению уравнения (16) в граничных точках $y = 0$ и $y = 1$. Уравнение (16) в точке $y = 1$ приводится к соотношению, представляющему первое дополнительное граничное условие

$$\frac{\partial \Theta(1, x)}{\partial y} + \frac{\partial^2 \Theta(1, x)}{\partial y^2} = 0. \quad (22)$$

Уравнение (16) в точке $y = 0$ принимает вид соотношения $\partial \Theta(0, x) / \partial y = 0$, совпадающего с граничным условием (19), которое решением (21) выполняется в любом приближении.

Применительно к точке $y = 0$ необходимо также сформулировать дополнительное граничное условие, получаемое на основе соотношения (20). Для этого продифференцируем соотношение (20) по переменной x :

$$\frac{dq(x)}{dx} = \frac{\partial \Theta(0, x)}{\partial x}. \quad (23)$$

Уравнение (16) с учетом (23) принимает вид

$$\frac{dq(x)}{dx} = \frac{1}{y(1-2y^2+y^4)} \frac{\partial \Theta(0, x)}{\partial y} + \frac{1}{(1-2y^2+y^4)} \frac{\partial^2 \Theta(0, x)}{\partial y^2}. \quad (24)$$

Раскрывая неопределенность в первом слагаемом правой части соотношения (24) по правилу Лопиталя, находим дополнительное граничное условие вида

$$\frac{\partial q(x)}{\partial x} = 2 \frac{\partial^2 \Theta(0, x)}{\partial y^2}. \quad (25)$$

Для получения решения задачи (16)–(19) в первом приближении подставим (21), ограничиваясь одним членом ряда, в соотношение (20). Относительно неизвестного коэффициента $b_1(q)$ получаем алгебраическое уравнение, из решения кото-

рого находим $b_1(q) = q(x)$. С учетом найденного значения $b_1(q)$ соотношение (21) принимает вид

$$\Theta(y, x) = q(x)(1 - y^2). \quad (26)$$

Потребуем, чтобы соотношение (26) удовлетворяло не уравнению (16), а некоторому осредненному в интервале $0 < y < 1$ уравнению, т. е. интегралу теплового баланса

$$\int_0^1 \left[y(1 - 2y^2 + y^4) \frac{\partial \Theta(y, x)}{\partial x} - \frac{\partial \Theta(y, x)}{\partial y} - y \frac{\partial^2 \Theta(y, x)}{\partial y^2} \right] dy = 0. \quad (27)$$

Подставляя (26) в (27), после определения интегралов относительно неизвестной функции $q(x)$ получаем следующее обыкновенное дифференциальное уравнение

$$0,25dq(x)/dx + q(x) = 0. \quad (28)$$

Интегрируя уравнение (28), находим

$$q(x) = C \exp(-64(\delta + 3)x / (5\delta + 16)), \quad (29)$$

где C – постоянная интегрирования.

Подставляя (29) в (26), получаем

$$\Theta(y, x) = C \exp(-64(\delta + 3)x / (5\delta + 16))(1 - y^2). \quad (30)$$

Для определения постоянной интегрирования составим невязку граничного условия (17) и потребуем выполнения ее ортогональности к координатной функции $\varphi_1(y) = 1 - y^2$:

$$\int_0^1 (\Theta(y, 0) - 1)(1 - y^2) dy = 0. \quad (31)$$

Подставляя (30) в (31), после определения интеграла относительно постоянной интегрирования будем иметь алгебраическое линейное уравнение, из решения которого находим $C = 1,25$.

Соотношение (30) с учетом найденного значения постоянной интегрирования представляет решение задачи (16)–(19) в первом приближении. Анализ результатов расчетов по формуле (30) в сравнении с решением задачи (16)–(19) численным методом (метод конечных разностей) позволяет заключить, что в диапазоне $0,1 \leq x \leq 0,4$ их расхождение не превышает 12 %.

Повышение точности связано с увеличением числа членов ряда (21). Для получения решения во втором приближении подставим (21) (ограничиваясь двумя членами ряда) в условие (20) и дополнительное граничное условие (25). Относительно неизвестных коэффициентов $b_k(q)$, ($k = 1, 2$) будем иметь систему двух алгебраических уравнений. Соотношение (21) после определения $b_k(q)$ принимает вид

$$\Theta(y, x) = -0,25q'(1 - y^2) + (0,25q' + q)(1 - y^4), \quad (32)$$

где $q' = dq(x)/dx$.

Подставляя (32) в (27), после определения интегралов относительно неизвестной функции $q(x)$ получаем следующее обыкновенное дифференциальное уравнение

$$4q'' + 5q' + q = 0, \quad (33)$$

где $q'' = d^2q(x) / dx^2$.

Интегрируя уравнение (33), находим

$$q(x) = C_1 \exp(4(-13 + \sqrt{129})x) + C_2 \exp(-4(13 + \sqrt{129})x), \quad (34)$$

где C_1, C_2 – постоянные интегрирования.

Подставляя (34) в (32), получаем

$$\begin{aligned} \Theta(y, x) = & C_1 e^{v_1 x} \left(-\frac{1}{4} v_1 (1 - y^2) + \left(\frac{1}{4} v_1 + 1 \right) (1 - y^4) \right) + \\ & + C_2 e^{v_2 x} \left(-\frac{1}{4} v_2 (1 - y^2) + \left(\frac{1}{4} v_2 + 1 \right) (1 - y^4) \right), \end{aligned} \quad (35)$$

где $v_{1,2} = \pm 4(\mp 13 + \sqrt{129})$.

Составляя невязку граничного условия (17) и требуя выполнения ортогональности невязки к координатным функциям $\phi_j(y)$ ($j = k = 1, 2$), находим

$$\int_0^1 (\Theta(y, 0) - 1) \phi_j(y) dy = 0 \quad (j = k = 1, 2). \quad (36)$$

Подставляя (35) в (36) после определения интегралов относительно постоянных интегрирования C_k ($k = 1, 2$) получаем систему двух алгебраических уравнений

$$\left. \begin{aligned} C_1(0, 2\sqrt{129} - 1) - C_2(0, 2\sqrt{129} + 1) &= 7/4; \\ C_1 \left(\frac{1}{3}\sqrt{129} - 2 \right) - C_2 \left(\frac{1}{3}\sqrt{129} + 2 \right) &= 21/8, \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

из решения которой находим

$$C_{1,2} = \frac{7}{16} \pm \frac{35}{688} \sqrt{129}. \quad (38)$$

С учетом полученных значений постоянных интегрирования решение задачи (16)–(19) во втором приближении находится из (35). Сравнение результатов расчетов по формуле (35) с численным решением задачи (16)–(19) позволяет заключить, что в диапазоне $0,1 \leq x \leq 0,4$ их расхождение не превышает 8 % (рис. 3).

Для нахождения решения задачи (16)–(19) в третьем приближении подставим (21) (ограничиваясь тремя членами ряда) в соотношение (20) и дополнительные граничные условия (22), (25). Относительно неизвестных коэффициентов $b_k(q)$ ($k = 1, 2, 3$) будем иметь систему трех алгебраических уравнений. После их определения соотношение (21) принимает вид

$$\Theta(y, x) = \frac{1}{4} q'(1 - y^2) + \frac{1}{5} (2q' + 9q)(1 - y^4) - \frac{1}{5} \left(\frac{3}{4} q' + 4q \right) (1 - y^6). \quad (39)$$

Подставляя (39) в интеграл теплового баланса (27), относительно неизвестной функции $q(x)$ получаем следующее обыкновенное дифференциальное уравнение

$$q'' + 106q' / 3 + 480q = 0. \quad (40)$$

Интегрируя уравнение (40), находим

$$q(x) = C_1 e^{v_1 x} + C_2 e^{v_2 x}, \quad (41)$$

где C_1, C_2 – постоянные интегрирования; $v_{1,2} = \pm \frac{1}{3}(\mp 103 + \sqrt{6289})$.

Подставляя (39) с учетом (41) в (36), относительно постоянных интегрирования получаем систему двух алгебраических уравнений, из решения которой находим

$$C_{1,2} = \frac{51}{128} \pm \frac{7737}{804992} \sqrt{6289}. \quad (42)$$

После определения постоянных интегрирования решение задачи (16)–(19) в третьем приближении находится из (35). Результаты расчетов по формуле (35) в сравнении с решением численным методом приведены на рис. 3. Их анализ позволяет заключить, что в диапазоне $0,1 \leq x \leq 0,4$ расхождение результатов не превышает 6 %.

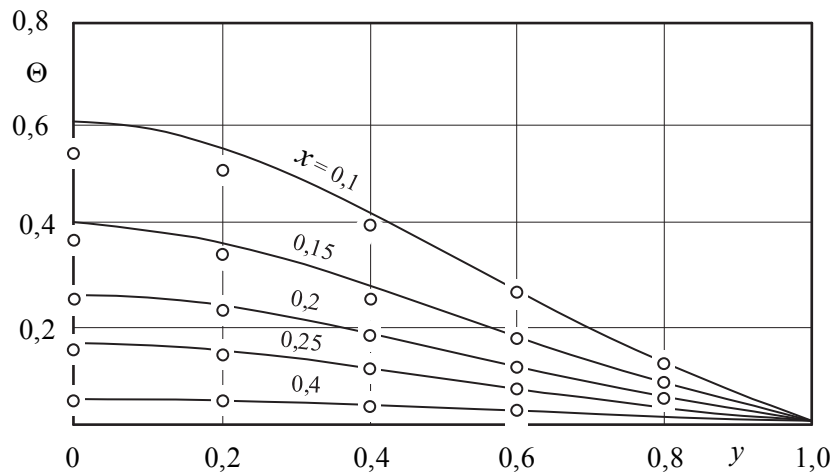


Рис. 3 – Распределение температуры:

○ – по формуле (39) при $\delta=-2$; ——— численное решение

Fig. 3 – Temperature distribution:

○ is by formula (39) with $\delta=-2$; ——— is a numerical solution

Найдем решение задачи при нагреве жидкости. Безразмерная температура в этом случае будет приниматься в виде $\Theta = (t - t_0) / (t_c - t_0)$. Граничное условие (19) не изменяется, а соотношения (17), (18) принимают вид

$$\Theta(y, 0) = 0; \quad (43)$$

$$\Theta(1, x) = 1. \quad (44)$$

Решение задачи (16), (19), (43), (44) принимается в виде

$$\Theta(y, x) = 1 - \sum_{k=1}^n b_k(q)(1 - y^{2k}). \quad (45)$$

Очевидно, что соотношение (45) удовлетворяет граничным условиям (19), (44). Неизвестные коэффициенты $b_k(q)$ будем находить из соотношения (20) и приведенных выше дополнительных граничных условиях. Решение задачи (16), (19), (43), (44) при $\delta = 10$ во втором приближении имеет вид

$$\begin{aligned} \Theta(y, x) = & \left(2,527e^{-1,934x} + 9,526e^{-22,067x} \right) \frac{(1-y^2)}{4} + \left[1,307e^{-1,934x} + \right. \\ & \left. + 0,432e^{-22,067x} - \frac{1}{4}(1,307e^{-1,934x} + 9,526e^{-22,067x}) \right] (1-y^4) + 1. \end{aligned} \quad (46)$$

Результаты расчетов по формуле (46) приведены на рис. 4, из которого следует, что при $x \approx 3$ жидкость прогревается до температуры $\Theta = 1,0$, заданной граничным условием (44), т. е. практически наступает режим стационарного теплообмена.

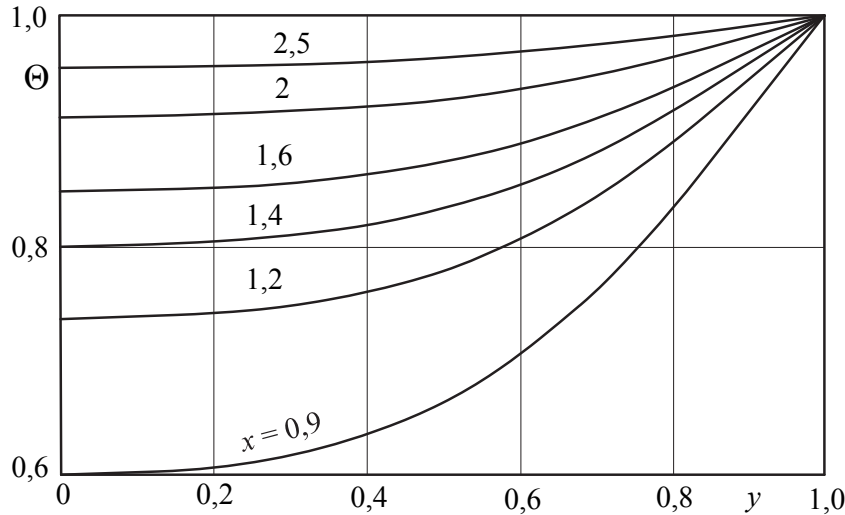


Рис. 4 – Распределение температуры. Расчет по формуле (46). $\delta = 10$

Fig. 4 – Temperature distribution. Evaluation by formula (46). $\delta = 10$

На рис. 5 приведены результаты расчетов в случае, когда $\delta = 0$, т. е. когда формула профиля скорости имеет вид $W(y, 0) = 2W_{cp}(1 - y^2)$. Уравнение (16) в данном случае приводится к виду

$$y(1-y^2) \frac{\partial \Theta(y, x)}{\partial x} = \frac{\partial \Theta(y, x)}{\partial y} + y \frac{\partial^2 \Theta(y, x)}{\partial y^2}, \quad (47)$$

где $x = \eta a / (2W_{cp}r_0^2)$.

Решение задачи (47), (17) – (19) принималось в виде (21). Анализ результатов расчетов по формуле (21) в третьем приближении в сравнении с решением данной задачи по методу Л.В. Канторовича в шестом приближении [16], а также с точным аналитическим решением [1] позволяет заключить, что в диапазоне $0,05 \leq x \leq \infty$ их расхождение не превышает 2,5 %. Отметим, что решение по методу Л.В. Канторовича и точное аналитическое решение в указанном диапазоне переменной x практически совпадают.

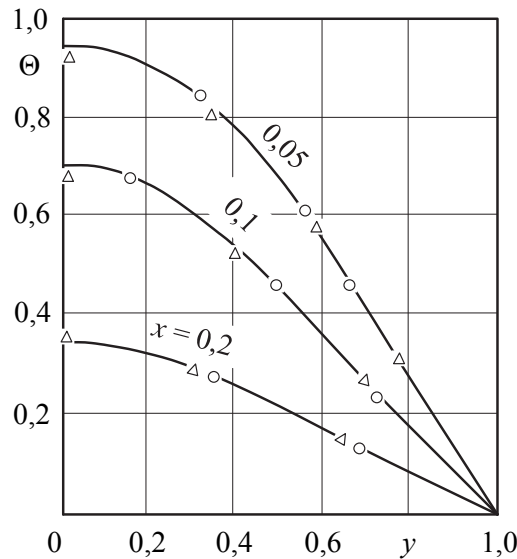


Рис. 5 – Распределение температуры:

○ – метод Л.В. Канторовича (шестое приближение [16]);
 △ – по формуле (21) при $n=3$; ———— – точное решение [1]

Fig. 5 – Temperature distribution:

○ is L.V. Kantorovich's method (the sixth approximation [16]);
 △ by formula (21) with $n=3$; ———— is an exact solution [1]

Краевая задача (15)–(19) представлена полностью в безразмерном виде. В связи с чем полученные решения вида (30), (35), (39), соответственно в первом, втором и третьем приближениях, могут быть использованы при любых значениях размерных величин параметров, входящих в формулы (15), т. е. может быть найдено решение любой конкретной задачи теплообмена, в которой будет реализована параболическая зависимость вязкости жидкости от температуры.

В неизотермических течениях от температуры зависит не только вязкость, но и теплофизические свойства жидкости. И, в частности, при линейной зависимости коэффициента температуропроводности от температуры $a(t) = a_0(1 + \gamma t)$ уравнение (11) принимает вид $W(y, \delta) \frac{\partial t}{\partial \eta} = \frac{a_0}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[(1 + \gamma t) \xi \frac{\partial t}{\partial \xi} \right]$, где a_0 – температуропроводность жидкости при $t = t_0$; γ – коэффициент.

Изложенный выше метод позволяет находить решение задачи и для такого вида уравнений, что будет предметом следующей статьи.

Отметим, что применительно к нестационарным задачам теплопроводности для бесконечной пластины с переменными начальными и граничными условиями, с неоднородными граничными условиями, а также с источниками теплоты в работах [17 – 20], используя рассмотренный выше метод, получены точные аналитические решения в форме бесконечных рядов.

3. Обсуждение результатов

Используя дополнительную искомую функцию и дополнительные граничные условия в интегральном методе теплового баланса, получено приближенное аналитическое решение задачи теплообмена для движущейся жидкости, при переменной от температуры вязкости. Применение дополнительной искомой функции основано на свойстве параболического уравнения теплообмена, связанном с бесконечной скоростью распространения теплоты. Ее использование позволяет свести решение уравнения в частных производных к интегрированию обыкновенного дифференциального уравнения. Дополнительные граничные условия находятся в таком виде, чтобы их выполнение искомым решением было эквивалентно выполнению исходного дифференциального уравнения в граничных точках. Ввиду отсутствия необходимости интегрирования уравнения в частных производных по радиальной пространственной переменной, ограничиваясь интегрированием обыкновенного дифференциального уравнения относительно дополнительной искомой функции, данный метод может быть применен для решения краевых задач со сложными дифференциальными операторами в уравнениях, не допускающими разделения переменных (нелинейных, с переменными физическими свойствами среды, с учетом диссипации энергии и др.). Следует однако отметить, что с увеличением числа приближений трудности получения решения возрастают. И, в частности, возрастает порядок обыкновенного дифференциального уравнения относительно дополнительной искомой функции. Однако эти трудности не являются принципиальными – они приводят лишь к возрастанию объема вычислительной работы, выполняемой на компьютерах. При этом получаемое решение сохраняется в аналитическом виде.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Петухов Б.С.** Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. – М.: Энергия, 1967. – 412 с.
2. **Цой П.В.** Системные методы расчета краевых задач тепломассопереноса. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 568 с.
3. **Reddy M.G., Makinde O.D.** Magnetohydrodynamic peristaltic transport of Jeffrey nanofluid in an asymmetric channel // *Journal of Molecular Liquids*. – 2016. – Vol. 223. – P. 1242–1248.
4. Peristalsis of nonconstant viscosity Jeffrey fluid with nanoparticles / N. Alvi, T. Latif, Q. Hussain, S. Asghar // *Results in Physics*. – 2016. – Vol. 6. – P. 1109–1125.
5. MHD Couette-Poiseuille flow of variable viscosity nanofluids in a rotating permeable channel with Hall effect / O.D. Makinde, T. Iskander, F. Mabood, W.A. Khan, M.S. Tshela // *Journal of Molecular Liquids*. – 2016. – Vol. 221. – P. 778–787.
6. **Hasona W.M., El-Shehpi A.A., Ybrahim M.G.** Combined effects of magnetohydrodynamic and temperature dependent viscosity on peristaltic flow of Jeffrey nanofluid through a porous medium: applications to oil refinement // *International Journal of Heat Mass Transfer*. – 2018. – Vol. 126. – P. 700–714.
7. **Кудинов В.А., Стефанюк Е.В.** Задачи теплопроводности на основе определения фронта температурного возмущения // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. – 2008. – № 5. – С. 141–157.
8. **Лыков А.В.** Методы решения нелинейных уравнений нестационарной теплопроводности // *Известия АН СССР. Энергетика и транспорт*. – 1970. – № 5. – С. 109–150.

9. Гудмен Т. Применение интегральных методов в нелинейных задачах нестационарного теплообмена // Проблемы теплообмена: сборник научных трудов. – М.: Атомиздат, 1967. – С. 41–96.
10. Глазунов Ю.Т. Вариационные методы. – М.; Ижевск: Регулярная и хаотичная динамика: Ин-т компьютер. исслед., 2006. – 470 с.
11. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы нестационарной теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1978. – 328 с.
12. Кудинов В.А., Кудинов И.В., Котова Е.В. Дополнительные граничные условия в нестационарных задачах теплопроводности // Теплофизика высоких температур. – 2017. – Т. 55, № 4. – С. 556–563.
13. Канторович Л.В. Об одном методе приближенного решения дифференциальных уравнений в частных производных // Доклады АН СССР. – 1934. – Т. 2, № 9. – С. 532–534.
14. Федоров Ф.М. Граничный метод решения прикладных задач математической физики. – Новосибирск: Наука, 2000. – 220 с.
15. Кудряшов Л.И., Меньших Н.Л. Приближенные решения нелинейных задач теплопроводности. – М.: Машиностроение, 1979. – 232 с.
16. Карташов Э.М., Кудинов В.А., Калашников В.В. Теория тепломассопереноса: решение задач для многослойных конструкций. – 2-е изд. – М.: Юрайт, 2018. – 435 с.
17. Кудинов И.В. Получение точных аналитических решений задач теплопроводности с переменными во времени граничными условиями // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2016. – № 4 (52). – С. 108–117.
18. Об одном методе получения точных аналитических решений задач теплопроводности с источником теплоты / И.В. Кудинов, Е.В. Стефанюк, М.П. Скворцова, Г.Н. Максименко // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60, № 11. – С. 877–882.
19. Об одном методе решения нестационарных краевых задач / И.В. Кудинов, В.А. Кудинов, Е.В. Котова, А.В. Еремин // Инженерно-физический журнал. – 2017. – Т. 90, № 6. – С. 1387–1397.
20. Кудинов В.И., Кудинов В.А., Котова Е.В. Дополнительные граничные условия в нестационарных задачах теплопроводности // Теплофизика высоких температур. – 2017. – Т. 55, № 4. – С. 556–563.

HYDRODYNAMICS AND HEAT EXCHANGE IN FLUIDS WITH VISCOSITY DEPENDENCE ON TEMPERATURE

Tkachev V.K., Eremin A.V., Tarabrina T.B., Kudinov I.V.
Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

By introducing an additional sought-for function (ASF) and additional boundary conditions (ABC) using the integral heat balance method, an analytical solution to the problem of heat transfer in a fluid moving in a cylindrical pipe under the parabolic law of viscosity dependence on temperature was found. A function characterizing a change in temperature along the longitudinal coordinate in the center of the pipe was taken as an additional one. Its use is based on the infinite velocity of heat distribution described by a parabolic equation solution. According to it, the temperature of the liquid in the center of the pipe changes immediately after the ASF of the boundary condition is applied to its surface. The application of the ASF makes it possible to reduce a partial differential equation to an ordinary equation. ABCs are defined so that their fulfillment is equal to solving an equation at boundary points. It is shown that solving the equation at the boundary also leads to its solving inside the area with the accuracy depending on the number of additional boundary conditions used in obtaining the solution. The study of the results obtained showed a significant difference in the velocity profiles caused by fluid heating and cooling. So, when heated, the velocity profile approaches the profile of a core flow which is characterized by an almost constant velocity across the channel, and when cooled, it is elongated longitudinally. The studies performed showed a significant difference in the temperature distribution obtained with and without taking into account the viscosity dependence on temperature.

Keywords: heat exchange in a moving fluid, viscosity dependence on temperature, additional sought-for function, additional boundary conditions, infinite velocity of heat propagation, integral method.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-70-86

REFERENCES

1. Petukhov B.S. *Teploobmen i soprotivlenie pri laminarnom techenii zhidkosti v trubakh* [Heat transfer and resistance during laminar fluid flow in pipes]. Moscow, Energiya Publ., 1967. 412 p.
2. Tsoi P.V. *Sistemnye metody rascheta kraevykh zadach teplomassoperenosa* [Systemic methods for calculating boundary-value problems of heat and mass transfer]. Moscow, MEI Publ., 2005. 568 p.
3. Reddy M.G., Makinde O.D. Magnetohydrodynamic peristaltic transport of Jeffrey nanofluid in an asymmetric channel. *Journal of Molecular Liquids*, 2016, vol. 223, pp. 1242–1248.
4. Alvi N., Latif T., Hussain Q., Asghar S. Peristalsis of nonconstant viscosity Jeffrey fluid with nanoparticles. *Results in Physics*, 2016, vol. 6, pp. 1109–1125.
5. Makinde O.D., Iskander T., Mabood F., Khan W.A., Tshela M.S. MHD Couette – Poiseuille flow of variable viscosity nanofluids in a rotating permeable channel with Hall effect. *Journal of Molecular Liquids*, 2016, vol. 221, pp. 778–787.
6. Hasona W.M., El-Shehhi A.A., Ybrahim M.G. Combined effects of magnetohydrodynamic and temperature dependent viscosity on peristaltic flow of Jeffrey nanofluid through a porous medium: applications to oil refinement. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 2018, vol. 126, pp. 700–714.
7. Kudinov V.A., Stefanyuk E.V. Zadachi teploprovodnosti na osnove opredeleniya fronta temperaturnogo vozmushcheniya [Heat exchange problems based on temperature perturbation front determination]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika – Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2008, no. 5, pp. 141–157.
8. Lykov A.V. Metody resheniya nelineinykh uravnenii nestatsionarnoi teploprovodnosti [Methods for solving nonlinear equations of nonstationary heat conduction]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR – Proceedings of Academy of Sciences. Power Engineering and Transport*, 1970, no. 5, pp. 109–150.
9. Goodman T. Primeneniye integralnykh metodov v nelineinykh zadachah nestatsionarnogo teploobmena [Application of integral methods in nonlinear problems of unsteady heat transfer]. *Problemy teploobmena* [Advances in heat transfer]. Moscow, Atomizdat Publ., 1967, pp. 41–96. (In Russian).
10. Glazunov Yu.T. *Variatsionnye metody* [Variational methods]. Moscow, Izhevsk, Regularnaya i khaotichnaya dinamika Publ., Institut komp'yuternykh issledovaniy Publ., 2006. 470 p.
11. Belyaev N.M., Ryadno A.A. *Metody nestatsionarnoi teploprovodnosti* [Methods of nonstationary thermal conductivity]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1978. 328 p.
12. Kudinov V.A., Kudinov I.V., Kotova E.V. Dopolnitel'nye granichnye usloviya v nestatsionarnykh zadachakh teploprovodnosti [Additional boundary conditions in unsteady-state heat conduction problems]. *Teplofizika vysokikh temperature – High Temperature*, 2017, vol. 55, no. 4, pp. 556–563. (In Russian).
13. Kantorovich L.V. Ob odnom metode priblizhennogo resheniya differentsial'nykh uravnenii v chastnykh proizvodnykh [On one method of approximate solution to partial differential equations]. *Doklady Akademii nauk SSSR – Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 1934, vol. 2, no. 9, pp. 532–534. (In Russian).
14. Fedorov F.M. *Granichnyi metod resheniya prikladnykh zadach matematicheskoi fiziki* [Boundary method for solving applied problems of mathematical physics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2000. 220 p.
15. Kudryashov L.I., Men'shikh N.L. *Priblizhennye resheniya nelineinykh zadach teploprovodnosti* [Approximate solutions of nonlinear heat problems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 232 p.

16. Kartashov E.M., Kudinov V.A., Kalashnikov V.V. *Teoriya teplomassoperenosa: reshenie zadach dlya mnogosloynnykh konstruktii* [Theory of heat and mass transfer: solving problems for multilayer structures]. 2nd ed. Moscow, Yurait Publ., 2018. 435 p.
17. Kudinov I.V. Poluchenie tochnykh analiticheskikh reshenii zadach teploprovodnosti s peremennymi vo vremeni granichnymi usloviyami [Obtaining exact analytical decisions of tasks heat conductions with variables in time boundary conditions]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki – Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, 2016, no. 4 (52), pp. 108–117.
18. Kudinov I.V., Stefanyuk E.V., Skvortsova M.P., Maksimenko G.N. Ob odnom metode polucheniya tochnykh analiticheskikh reshenii zadach teploprovodnosti s istochnikom teploty [Method of obtaining exact analytical solutions of tasks of heat conductivity with warmth sources]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya – Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2017, vol. 60, no. 11, pp. 877–882.
19. Kudinov I.V., Kudinov V.A., Kotova E.V., Eremin A.V. Ob odnom metode resheniya nestatsionarnykh kraevykh zadach [On one method of solving nonstationary boundary-value problems]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal – Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2017, vol. 90, no. 6, pp. 1387–1397. (In Russian).
20. Kudinov V.I., Kudinov V.A., Kotova E.V. Dopolnitel'nye granichnye usloviya v nestatsionarnykh zadachakh teploprovodnosti [Additional boundary conditions in unsteady-state heat conduction problems]. *Teplofizika vysokikh temperature – High Temperature*, 2017, vol. 55, no. 4, pp. 556–563. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Ткачев Василий Константинович – родился в 1993 году, ассистент, кафедра промышленной теплоэнергетики, ФГБОУ ВО Самарский государственный технический университет. Область научных интересов: математическое моделирование, теплообмен, гидравлика. Опубликовано 40 научных работ. (Адрес: 443100, Россия, Самара, ул. Молодогвардейская, 244. E-mail: tvk93@yandex.ru).

Tkachev Vasily Konstantinovich (b. 1993) – an assistant lecturer at the Department of Industrial Heat & Power Engineering, Samara State Technical University. His research interests are currently focused on mathematical modeling, heat exchange, and hydraulics. He is the author of 40 scientific papers. (Address: 244, Molodogvardeiskaya St., Samara, 443100, Russia. E-mail: tvk93@yandex.ru).



Еремин Антон Владимирович – родился в 1988 году, канд. техн. наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой, доцент, кафедра промышленной теплоэнергетики, ФГБОУ ВО Самарский государственный технический университет. Область научных интересов: математическое моделирование, теплообмен, гидравлика. Опубликовано 70 научных работ. (Адрес: 443100, Россия, Самара, ул. Молодогвардейская, 244. E-mail: a.v.eremin@list.ru).

Eremin Anton Vladimirovich (b. 1988) – PhD (Eng.), an associate professor at the Department of Industrial Heat & Power Engineering, Samara State Technical University. His research interests are currently focused on mathematical modeling, heat exchange, and hydraulics. He is the author of 70 scientific papers. (Address: 244, Molodogvardeiskaya St., Samara, 443100, Russia. E-mail: a.v.eremin@list.ru).



Тарабрина Тамара Борисовна – родилась в 1962 году, канд. пед. наук, доцент, кафедра теоретических основ теплотехники и гидромеханики, ФГБОУ ВО Самарский государственный технический университет. Область научных интересов: математическое моделирование, теплообмен, гидравлика. Опубликовано 25 научных работ. (Адрес: 443100, Россия, Самара, ул. Молодогвардейская, 244. E-mail: ttb2007@yandex.ru).

Tarabrina Tamara (b. 1962) – Candidate of Sciences (Ed.), Associate Professor, Department of Theoretical Foundations of Thermal Engineering and Hydromechanics, Samara State Technical University. Her research interests are currently focused on Mathematical modeling, heat exchange, hydraulics. She is author of 25 scientific papers. (Address: 244, Molodogvardeiskaya St., Samara, 443100, Russia. E-mail: ttb2007@yandex.ru).



Кудинов Игорь Васильевич – родился в 1987 году, д-р техн. наук, доцент, профессор, кафедра теоретических основ теплотехники и гидромеханики, ФГБОУ ВО Самарский государственный технический университет. Область научных интересов: математическое моделирование, теплообмен, гидравлика. Опубликовано 80 научных работ. (Адрес: 443100, Россия, Самара, ул. Молодогвардейская, 244. E-mail: igor-kudinov@bk.ru).

Kudinov Igor Vasil'evich (b. 1987) – D.Sc.(Eng.), an associate professor, professor at the Department of Theoretical Foundations of Thermal Engineering and Hydromechanics, Samara State Technical University. His research interests are currently focused on mathematical modeling, heat exchange, and hydraulics. He is the author of 80 scientific papers. (Address: 244, Molodogvardeiskaya St., Samara, 443100, Russia. E-mail: igor-kudinov@bk.ru).

*Статья поступила 22 апреля 2019 г.
Received April 22, 2019*

To Reference:

Tkachev V.K., Eremin A.V., Tarabrina T.B., Kudinov I.V. Gidrodinamika i teploobmen v zhidkosti pri zavisimosti vyazkosti ot temperature [Hydrodynamics and heat exchange in fluids with viscosity dependence on temperature]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, no. 3 (44), pp. 70–86. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-70-86.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

**ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Выпуск 3(44) июль–сентябрь 2019

Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *И.Е. Семенова*
Компьютерная верстка *Н.В. Гаврилова*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 17.09.2019. Выход в свет 20.09.2019. Бумага офсетная. Формат 70×108 1/16
Тираж 300 экз. Уч.-изд. л. 7,7. Печ. л. 5,5. Изд. № 257. Заказ № 91

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20