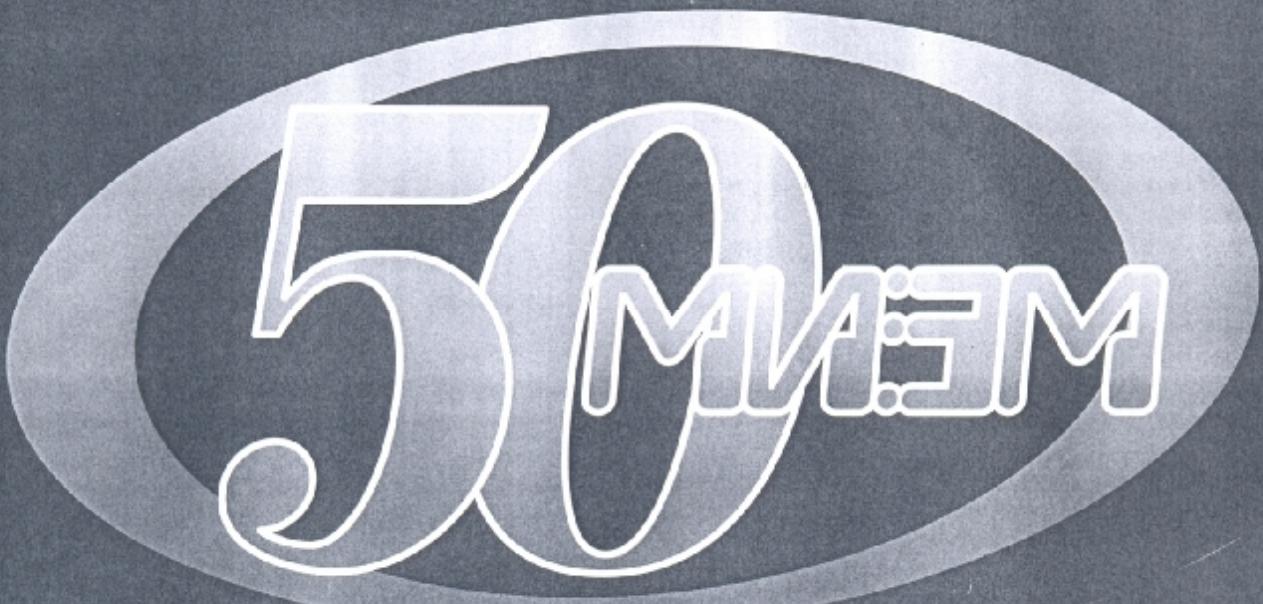


ISSN 1729-2670

№ 3 (42) 2012

# Технологии ЭМС



# Технологии электромагнитной совместимости

## *Technologies of electromagnetic compatibility*

### 2012. № 3(42).

ISSN 1729-2670

**УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА:**

ООО «Издательский Дом «ТЕХНОЛОГИИ». Зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Регистрационное свидетельство ПИ № 77-9669 от 24 августа 2001 года

Оформить подписку можно по объединенному каталогу «Пресса России»: 10362 — полугодовой индекс; в издательстве (предпочтительно) (8-985-134-4367).

Главный редактор журнала, председатель редакционного совета КЕЧИЕВ ЛЕОННД НИКОЛАЕВИЧ, д.т.н., проф. Зам. главного редактора журнала КАРМАШЕВ ВИКТОР СЕРГЕЕВИЧ АЛЕШИН АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ, к.т.н.  
**Редакционный совет:**  
 АКБАШЕВ БЕСЛАН БОРИСОВИЧ, д.т.н.  
 БАЛЮК НИКОЛАЙ ВАСИЛЬЕВИЧ, д.т.н., проф.  
 ВОРИШЕВСКИЙ АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ, д.т.н., проф.  
 КИРИЛЛОВ ВЛАДИМИР ЮРЬЕВИЧ, д.т.н., проф.  
 КОСТРОМНИНОВ АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ, д.т.н., проф.  
 КРИКОВ АНАТОЛИЙ СЕРГЕЕВИЧ, д.т.н., проф.  
 МЫРОВА ЛЮДМИЛА ОШЕРОВНА, д.т.н., проф.  
 НЕФЕДОВ ВИКТОР ИВАНОВИЧ, д.т.н., проф.  
 НИКИТИНА ВАЛЕНТИНА НИКОЛАЕВНА, д.мед.н., проф.  
 НИКИФОРОВ ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ, к.т.н.  
 ОЛЬШЕВСКИЙ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ, к.т.н.  
 ПОЖИДАЕВ ЕВГЕНИЙ ДМИТРИЕВИЧ, д.т.н., проф.  
 ПУГАЧЕВ СЕРГЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ  
 САРЫЛОВ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ  
 САХАРОВ КОНСТАНТИН ЮРЬЕВИЧ, д.т.н., с.н.с.  
 СТЕПАНОВ ПАВЕЛ ВЛАДИМИРОВИЧ, д.т.н., проф.  
 СУХОРУКОВ СЕРГЕЙ АРСЕНЬЕВИЧ, к.т.н., доцент  
 ТУХАС ВЯЧЕСЛАВ АНАТОЛЬЕВИЧ, д.т.н., проф.  
 ФОМИНИЧ ЭДУАРД НИКОЛАЕВИЧ, д.т.н., проф.  
 ЧЕРМОШЕНЦЕВ СЕРГЕЙ ФЕДОРОВИЧ, д.т.н., проф.  
**ИЗДАТЕЛЬ ЖУРНАЛА:**  
 ООО «Издательский Дом «ТЕХНОЛОГИИ».

Издается при содействии кафедры РТУиС МИЭМ-НИУ ВШЭ.

Главный редактор СТАСЬ Константин Николаевич  
 Исполнительный директор  
 ЛЕОНТЬЕВА Анна Анатольевна  
 Адрес: 105005, Москва, Наб. академика Туполева, 15,  
 стр. 29, оф. 117.  
 ООО «Издательский Дом «ТЕХНОЛОГИИ»  
 Редакция: тел./факс (495) 917-9090,  
 e-mail: [kln1940@gmail.com](mailto:kln1940@gmail.com).

Статьи рецензируются. Статьи опубликованы в авторской редакции. Мнение членов редакционного совета может не совпадать с точкой зрения авторов публикаций. Перепечатка материалов допускается только с письменного разрешения редакции. Рукописи не возвращаются.

Журнал включен в перечень ведущих журналов и изданий Высшей аттестационной комиссии (ВАК).

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

**Содержание**

Белик Г.А., Абрамешин А.Е., Саенко В.С. Внутренняя электризация бортовой аппаратуры космических аппаратов.....	5
Борисов Н.И., Баскаков А.Е., Абрамешин А.Е. Макромоделирование процесса растекания токов по поверхности космических аппаратов.....	17
Востриков А.В., Абрамешин А.Е. Вычислительная схема ускоренного метода расчета наводок в бортовой кабельной сети космических аппаратов.....	22
Абрамешин А.Е. Развитие концепции нанопроводимости диэлектриков в отечественной космической технике.....	29
Абрамешин А.Е., Кечиев Л.Н. Функциональная безопасность бортовых систем летательных аппаратов при ЭСР.....	33
Абрамешин, А.Е., Галухин, И.А., Кечиев Л.Н., Кузнецов В.В., Назаров Р.В. Воздействие ЭСР на полупроводниковые компоненты: моделирование схем защиты, методов и средств испытаний.....	44
Балюк Н.В., Здухов Л.Н., Парфенов Ю.В., Сахаров К.Ю., Титов Б.А., Туркин В.А., Сухов А.В. Актуальные проблемы гармонизации отечественных и зарубежных стандартов в области защиты гражданской инфраструктуры от мощных электромагнитных воздействий.....	59
Мамонтов А.В., Назаров В.Н., Нефедов В.Н., Потапова Т.А. Методы снижения побочных излучений от СВЧ устройств термообработки материалов с малым диэлектрическими потерями.....	66
Елизаров А.А., Закирова Э.А. Анализ паразитных колебаний и волн в микрополосковых линиях с учетом многомодовой дисперсии.....	69
Медведев А.М., Мылов Г.В., Кечиев Л.Н. Проблемы технологического обеспечения параметров линий передачи в МПП.....	73

УДК 621.385.6.6

*А.В.Мамонтов, И.В.Назаров, В.Н.Нефедов, Т.А.Потапова*

## **Методы снижения уровня побочных излучений от СВЧ установок термообработки материалов с малыми диэлектрическими потерями**

*Рассмотрены методы снижения уровня побочных излучений от СВЧ установок, предназначенных для термообработки материалов с малыми диэлектрическими потерями. СВЧ установки созданы на основе секций двумерно-периодических замедляющих систем. Показано, что уровень побочного излучения от работающего СВЧ устройства не превышает допустимых норм.*

**СВЧ устройство, распределение температуры, диэлектрический материал, волновод, замедляющая система**

В настоящее время в промышленности широко используются СВЧ технологии термообработки различных диэлектрических материалов на частоте колебаний электромагнитного поля 2450 МГц. СВЧ устройства являются источниками побочных и внеполосных излучений. В связи с этим необходимо при разработке СВЧ устройств термообработки предусмотреть, как методы снижения уровня побочных излучений, так и защиту самих СВЧ устройств от побочных излучений, которые могут исходить от работы окружающего электрооборудования.

Наиболее распространенный метод термообработки слабо поглощающих СВЧ энергию диэлектрических материалов состоит в том, что в обрабатываемый материал вводят специальные добавки, которые хорошо поглощают СВЧ энергию и не оказывают нежелательных влияний на его свойства. Однако существует целый спектр материалов, в частности, пластических масс, добавки в которые крайне нежелательны, так как они нарушают их свойства. Термообработка таких материалов газом или другим известными способами не приводит к равномерности нагрева по всему объему материала ввиду малой теплопроводности пластических масс и при последующих операциях, таких как прессование или штамповка, возникают растрескивание или другие дефекты. К таким материалам, в частности, относятся: полистирол, полипропилен и полизтилен с различными наполнителями, например, в виде 10 % сажи или других красителей, плексиглас, эбонит и другие пластические массы.

Наиболее эффективными электродинамическими системами, которые используются в устройствах СВЧ нагрева, являются замедляющие системы, которые позволяют концентрировать электромагнитное поле над своей поверхностью и непосредственно в объеме обрабатываемого диэлектрического материала. Для увеличения постоянной затухания амплитуды напряженности электрического поля сверхвысоких частот в материале в качестве нагревательного элемента используют секции двумерно-периодических замедляющих систем [1, 2].

Двумерно-периодическая замедляющая система характеризуется в направлении оси  $x$  периодом пространства взаимодействия  $L_x$  и фазовым сдвигом  $\phi_x$ , а в направлении оси  $z$  периодом пространства взаимодействия  $L_z$  и фазовым сдвигом  $\phi_z$ . Секция двумерно-периодической замедляющей системы ограничена в направлении оси  $x$  электрическими стенками, расположенными в плоскостях симметрии системы, а в направлении оси  $z$  согласована с источником СВЧ энергии, а с другой стороны согласована с водяной волноводной нагрузкой, в которой установлен датчик проходящего уровня мощности для контроля технологического процесса термообработки материала.

Основу конструкции секций двумерно-периодических замедляющих систем составляют проводники многопроводной линии, расположенные параллельно друг другу и оси  $z$  и на одинаковом расстоянии друг от друга. На проводниках линии в периодической последовательности располагаются элементы конструкции, которые обеспечивают необходимые электродинамические параметры замедляющей системы, как в направлении оси  $x$  – направлении движения обрабатываемого материала, в котором устанавливается замедленная стоячая волна, так и в направлении оси  $z$  – направлении распространения энергии электромагнитного поля [3].

Основой конструкции устройства СВЧ – нагрева является модуль. На рис. 1, а представлен модуль для термообработки относительно тонких диэлектрических материалов, в котором распределение температуры по толщине материала  $d$  можно не учитывать, а по ширине – задается условиями технологического процесса. Модуль образован двумя одинаковыми по конструкции и параметрам секциями устройства СВЧ нагрева, которые расположены одна над другой, а энергия электромагнитного поля распространяется во взаимно противоположных направлениях.

Верхняя секция расположена над обрабатываемым материалом и смешена относительно нижней секции на половину периода пространства взаимодействия в поперечном направлении, вдоль оси  $x$ , как это показано на рис. 1, б.

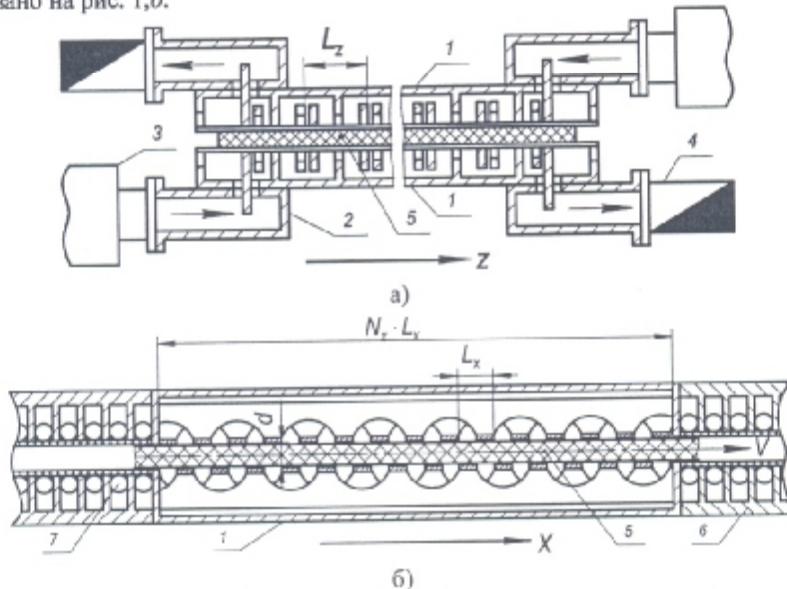


Рис. 1. Модуль устройства СВЧ-нагрева тонких материалов (а) и со смещением верхней секции (б):  
1 – секция двумерно-периодической замедляющей системы; 2 - переходное согласующее устройство; 3 – источник СВЧ энергии; 4 – согласованная нагрузка; 5 – диэлектрический материал; 6 - фильтр;  
7 – трубка с водой

Распределение мощности  $P(z,y)$  в обрабатываемом материале в направлении распространения энергии электромагнитного поля вдоль оси  $z$  и по толщине материала вдоль оси  $y$  в плоскости замедляющей системы имеет вид [1, 2]:

$$P(z,y) = P_{ax} \cdot e^{-2\alpha_x z} \cdot e^{-2\alpha_y y} \quad (1)$$

$$\alpha_x = \frac{2\pi^2 \cdot L_z \cdot \epsilon''}{\lambda^2 \cdot \phi_z}, \quad (2)$$

$$\alpha_y = \sqrt{\left(\frac{\phi_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{\phi_z}{L_z}\right)^2 - \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \cdot \epsilon' - \frac{1}{4} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \cdot \left(\frac{L_z}{\phi_z}\right)^2 \cdot (\epsilon'')^2}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – длина волны источника СВЧ энергии.

Следовательно, для двумерно-периодической замедляющей системы распределение СВЧ мощности в обрабатываемом диэлектрическом материале спадает по экспоненциальному закону, как от ее поверхности, так и вдоль распространения СВЧ энергии, т.е. сконцентрирована в объеме обрабатываемого материала и практически не излучается в окружающее пространство.

Источник СВЧ энергии с волноводным выводом энергии через контактную пластину присоединен к волноводу переходного согласующего устройства двумерно-периодической замедляющей системы. При этом значение коэффициента стоячей волны по напряжению не превышает значения 1,12. С другой стороны, замедляющая система присоединена с помощью согласующего переходного устройства через контактную пластину к волноводной водяной нагрузке. Водяная нагрузка имеет КСВН  $\leq 1,37$  в диапазоне частот  $2450 \pm 50$  МГц. СВЧ мощность практически полностью поглощается

ся в обрабатываемом материале, и значение коэффициента отражения от водяной согласованной нагрузки особой роли не играет.

Источник СВЧ энергии собран на элементной базе бытовых СВЧ печей. Уровень побочных излучений определяется степенью уплотнения посадки магнетрона в излучающий волновод и, как правило, существенно меньше, чем в бытовых печах.

Для снижения уровня излучения на входе и выходе обрабатываемого материала используются специальные конструкции фильтров, препятствующих выходу СВЧ излучения из работающей установки.

Конструкция этих фильтров, показанная на рис. 1,б, защищена патентом РФ [4] и состоит из ребристой структуры, между ребрами которой расположены трубы, выполненные из радиопрозрачного материала и заполненные водой для поглощения возможного излучения из СВЧ установки.

Секция двумерно-периодической замедляющей системы характеризуется следующими параметрами:

- рабочая частота колебаний электромагнитного поля, МГц .....	2450
- период замедляющей системы вдоль оси z, мм .....	36
- длина секции l, мм .....	400
- ширина секции в поперечном направлении $N_r \times L_r$ , мм .....	200
- поперечный фазовый сдвиг $\varphi_x$ .....	$\pi$
- продольный фазовый сдвиг $\varphi_z$ .....	$0,2\pi$
- температура материала, °C .....	70
- отклонение температуры в материале от номинального значения температуры в материале не более, % .....	7
- значение фактора потерь, ε' .....	0,02
- теплоемкость материала, Дж/(г·°C) .....	0,8
- плотность материала, г/см <sup>3</sup> .....	2,4

Экспериментальными исследованиями установлено, что уровень побочных излучений от СВЧ установки, благодаря принятым мерам, не превышал 10 мкВт/см<sup>2</sup>, что ниже допустимых пределов для излучения из устройств такого рода.

#### Список литературы

- Недедов В.Н. Сверхвысокочастотные устройства для термообработки диэлектрических материалов больших площадей (обзор). – Электронная техника. Сер. 1. СВЧ – техника. – 1998. – вып. 2. – С. 32–35.
- Шахбазов С.Ю., Назаров И.В., Недедов В.Н., Черкасов А.С. Методика выбора электродинамических систем СВЧ устройств типа бегущей волны для термообработки материалов. // Труды VIII межвузовской научной школы молодых специалистов: «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». – М.: МГУ. – С. 51–55.
- Мясников В.Е. //Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1969. – Вып.3. – С. 51.
- Патент РФ № 2060600 от 2.11.93. на изобретение «СВЧ – печь конвейерного типа (варианты)». Авторы: Недедов В.Н., Валеев Г.Г., Корнеев С.В., Карпенко Ю.В. // Опубл. 20.05.96. Бюл. № 5.

Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (МИЭМ НИУ ВШЭ).

Статья поступила 15.01.2012.

Mamontov A.V., Nazarov I.V., Nefedov V.N., Potapova T.A.

**Methods for decreasing spurious radiation from microwave devices intended for the thermal treatment of materials with low dielectric losses**

Methods for decreasing spurious radiation from microwave devices intended for the thermal treatment of materials with low dielectric losses are considered. It is shown that spurious radiation from microwave device is less than maximum permissible limit.

**microwave device, temperature distribution, dielectric material, waveguide, slow-wave structure**

*Moscow Institute of Electronics and Mathematics, Higher School of Economics (MIEM HSE)*

## АВТОРЫ НОМЕРА

**Абрамешин Андрей Евгеньевич**, доцент кафедры ИТАС МИЭМ НИУ ВШЭ, докторант, [aee@miem.edu.ru](mailto:aee@miem.edu.ru).

**Балюк Николай Васильевич**, д.т.н., профессор, МИЭМ НИУ ВШЭ, [balyknwwa@mail.ru](mailto:balyknwwa@mail.ru).

**Баскаков Андрей Евгеньевич**, ассистент, аспирант МИЭМ НИУ ВШЭ, тел.: 8-926-316-8729; [dronbas1984@gmail.com](mailto:dronbas1984@gmail.com).

**Белик Глеб Андреевич**, аспирант МИЭМ НИУ ВШЭ.

**Борисов Николай Иванович**, д.т.н., профессор кафедры ИТАС МИЭМ НИУ ВШЭ, тел.: 8(499) 161-98-84; [borisov@itas.miem.edu.ru](mailto:borisov@itas.miem.edu.ru).

**Востриков Александр Владимирович**, к.т.н., ассистент кафедры ИТАС МИЭМ НИУ ВШЭ, тел.: 8-926-566-3550; [sanchs@inbox.ru](mailto:sanchs@inbox.ru).

**Галухин Илья Андреевич**, магистр МИЭМ НИУ ВШЭ, [LutiyRoker@yandex.ru](mailto:LutiyRoker@yandex.ru).

**Елизаров Андрей Альбертович**, д.т.н., проф., тел: 8 915-137-1612, [yelizarov@list.ru](mailto:yelizarov@list.ru).

**Закирова Эльмира Алексеевна**, аспирантка МИЭМ НИУ ВШЭ, тел: 8 916-272-4808, [jekyll1604@mail.ru](mailto:jekyll1604@mail.ru).

**Здухов Леонид Николаевич**, ведущий научный сотрудник, д.т.н., Учреждение Российской академии наук Объединённый институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН). Тел.: (495) 484-44-38, [zdoukhovleonid@rambler.ru](mailto:zdoukhovleonid@rambler.ru).

**Кечисев Леонид Николаевич**, д.т.н., проф. зав. кафедрой РТУиС МИЭМ НИУ ВШЭ, тел. 495-916-8964, [kln1940@gmail.com](mailto:kln1940@gmail.com).

**Кузнецов Вадим Вадимович**, аспирант МИЭМ НИУ ВШЭ, тел.: 8(962)179-21-94, [ra3xdh@mail.ru](mailto:ra3xdh@mail.ru).

**Мамонтов Александр Владимирович**, к.т.н., доцент МИЭМ НИУ ВШЭ, [a.v.mamontov@gmail.com](mailto:a.v.mamontov@gmail.com)

**Медведев Аркадий Максимович**, д.т.н., проф. Московского авиационного института (Национальный исследовательский университет) – МАИ, Заслуженный технолог России, тел (499)158-46-48, [medvedevam@bk.ru](mailto:medvedevam@bk.ru).

**Мылов Геннадий Васильевич**, Директор производственного технического комплекса «Печатные платы» ОАО «Государственный Рязанский приборный завод» (ПТК ПП ГРПЗ), тел. (4912) 98-38-91, [pcb@grpz.ruzan.ru](mailto:pcb@grpz.ruzan.ru).

**Назаров Руслан Валерьевич**, магистр МИЭМ НИУ ВШЭ, [StroriR2006@yandex.ru](mailto:StroriR2006@yandex.ru).

**Назаров Игорь Васильевич**, к.т.н., доцент, МИЭМ НИУ ВШЭ, [igortaz@mail.ru](mailto:igortaz@mail.ru).

**Нефедов Владимир Николаевич**, д.т.н., проф. МИЭМ НИУ ВШЭ, [nefedov\\_vn@mail.ru](mailto:nefedov_vn@mail.ru).

**Парфенов Юрий Вячеславович**, главный научный сотрудник, д.т.н., Учреждение Российской академии наук Объединённый институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН). Тел.: (495) 484-44-38, [parfenov.home@gmail.com](mailto:parfenov.home@gmail.com).

**Потапова Татьяна Александровна**, к.т.н., доцент МИЭМ НИУ ВШЭ, [lmis.potapova@gmail.com](mailto:lmis.potapova@gmail.com).

**Саенко Владимир Степанович**, д.т.н., проф. МИЭМ НИУ ВШЭ, [saenko19@gmail.com](mailto:saenko19@gmail.com)

**Сахаров Константин Юрьевич**, начальник лаборатории, д.т.н., ФГУП ВНИИОФИ. Тел. (факс): (495) 437-28-47, 437-55-66, [sax-m12@vniiofi.ru](mailto:sax-m12@vniiofi.ru).

**Сухов Александр Витальевич**, инженер, ФГУП ВНИИОФИ, тел. (факс): (495) 437-28-47, 437-55-66, [sukhov@vniiofi.ru](mailto:sukhov@vniiofi.ru).

**Титов Борис Анатольевич**, ведущий инженер, Учреждение Российской академии наук Объединённый институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН). Тел.: (495) 484-44-38, [tba\\_2004@mail.ru](mailto:tba_2004@mail.ru).

**Туркин Владимир Анатольевич**, зам. начальника лаборатории, к.т.н., ФГУП ВНИИОФИ. Тел. (факс): (495) 437-28-47, 437-55-66, [turkin@vniiofi.ru](mailto:turkin@vniiofi.ru).

## ВНИМАНИЕ! ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

«ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ»

Объединенный каталог «Пресса России» агентства «Книга-Сервис»

10362 – полугодовой индекс. Через редакцию – (на любой срок) по тел.: 8-985-134-4367.