

ISSN 0368-1025

ИТ

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА
2018
МАРТ №3

ИТ

СОДЕРЖАНИЕ

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

2018

№ 3 март

Ежемесячный
научно-технический
журнал
основан в 1939 г.

Издаётся
с приложением
«Метрология»

УЧРЕДИТЕЛИ

Федеральное агентство
по техническому регулированию
и метрологии

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологии
им. Д. И. Менделеева»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт оптико-физических
измерений»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт физико-технических и
радиотехнических измерений»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологической
службы»

ФГУП «Уральский
научно-исследовательский
институт метрологии»

ФГУП «Российский
научно-технический центр
информации по стандартизации,
метрологии и оценке соответствия»

Метрологическая академия

ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ЭТАЛОНЫ

Н. И. Рыбак, В. Я. Черепанов, Э. М. Шейнин, В. А. Ямшанов. Государственный
первичный эталон единицы поверхности плотности теплового потока
ГЭТ 172–2016..... 3

Е. А. Волегова, М. А. Малыгин, Т. И. Маслова, А. С. Волегов. Государственный
первичный эталон единиц мощности магнитных потерь, магнитной индукции
постоянного магнитного поля в диапазоне от 0,1 до 2,5 Тл и магнитного
потока в диапазоне от $1 \cdot 10^{-5}$ до $3 \cdot 10^{-2}$ Вб ГЭТ 198–2017..... 7

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

К. К. Семёнов, А. А. Целищева. Интервальный метод бисекции для метрологи-
чески обоснованного поиска корней уравнений с неточно заданными исходны-
ми данными..... 10

В. И. Кузнецов, С. С. Кукушкин. Фильтрация измерительных данных при струк-
турно-алгоритмических преобразованиях..... 15

ИЗМЕРЕНИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

С. В. Соколов, М. В. Полякова, П. А. Кучеренко. Аналитический синтез адаптив-
ного фильтра Калмана на основе нерегулярных точных измерений 19

ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

М. Ф. Данилов, А. П. Иванова, А. А. Савельева. Оценка погрешности координат-
ных измерений геометрических параметров деталей на основе априорных
данных..... 23

В. В. Порошин, Д. Ю. Богомолов, В. Г. Лысенко. Исследование погрешности
фильтрации неровностей поверхности сплайновым пространственным
фильтром..... 27

О. А. Ямникова, А. С. Ямников, И. А. Матвеев. Влияние овальности базовых по-
верхностей тонкостенных протяжённых осесимметричных полых деталей
на погрешности измерения радиального бienia в призмах 32

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

А. А. Недбайло, Е. В. Патокин, А. А. Гордеев. Косвенный метод измерения им-
пульсного давления, создаваемого установкой маятникового типа 37

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

В. Н. Нефёдов, А. В. Мамонтов, В. П. Симонов, И. В. Назаров. Измерение рас-
пределения температуры в полимерных композитных трубах при их термо-
обработке с использованием микроволнового излучения..... 42

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Г. В. Вавилова, А. Е. Гольдштейн. Прибор для технологического контроля по-
гонной ёмкости электрического провода 46

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

*И. Е. Арсаев, Ю. В. Векшин, А. И. Лапшин, В. В. Мардышкин, М. В. Саргсян,
Е. Ю. Хвостов, В. К. Чернов, Э. Ф. Юрчук.* Измерения шумовых темпера-
тур приёмной системы радиотелескопа двухэлементного радиоинтерферо-
метра со сверхдлинной базой..... 51

И. Е. Арсаев, А. И. Лапшин, М. В. Саргсян, Э. Ф. Юрчук. Широкоапertureные низ-
котемпературные генераторы шума для калибровки радиотелескопов двух-
элементного радиоинтерферометра со сверхдлинной базой 55

АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

*М. Я. Марусина, А. В. Фёдоров, В. Е. Прохорович, И. В. Беркутов, В. А. Быч-
енок, Н. В. Ткачёва, А. Л. Майоров.* Разработка акустических методов кон-
троля напряжённо-деформированного состояния резьбовых соединений 60

ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

И. В. Кувыкин, С. М.-Ш. Цуриев. Установка для измерения активности радио-
изотопов цифровым методом совпадений 65

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Ю. К. Тараненко, О. Ю. Олейник, Н. А. Минакова, Е. В. Титова. Теоретические
основы проектирования трубчатых проточных резонаторов из кварцевого
стекла..... 68

CONTENTS

Главный редактор
С. С. Голубев

Редакционная коллегия:

В. И. Белоцерковский
С. И. Донченко
И. В. Емельянова
(зам. гл. редактора)
Л. К. Исаев
А. Д. Козлов
Е. П. Кривцов
В. Н. Крутиков
А. Ю. Кузин
С. В. Медведевских
А. И. Механиков
В. В. Окрепилов
В. Н. Храменков
И. А. Шайко
В. В. Швыдун

Журнал переводится
на английский язык
под названием
«Measurement
Techniques»
издательством Springer
www.springer.com/11018

Корректор М. В. Бучная
Компьютерная вёрстка М. В. Фокина

Сдано в набор 21.02.2018.
Подписано в печать 02.04.2018.
Формат 60×90^{1/8}. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. п.л. 9,0. Уч.-изд. л. 11,5. Тир. 300 экз. Зак. 18-41и

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-21572
от 15.07.2005.
Адрес редакции: 119361 Москва, ул. Озёрная, 46,
ФГУП «ВНИИМС»
Тел.: 8 (495) 781-48-70
e-mail: izmt@vniims.ru
www.izmt.ru
Редакция не несёт ответственности за содержание рекламных материалов. Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов.

ООО «Типография Миттель Пресс»
www.mittelpress.ru, 8 (495) 647-01-89

© Измерительная техника, 2018

STATE STANDARDS

- N. I. Rybak, V. Ya. Cherepanov, E. M. Sheinin, V. A. Yamshanov. The State primary measurement standard GET 172-2016 of heat flux surface density unit 3
E. A. Volegova, M. A. Malygin, T. I. Maslova, A. S. Volegov. The State primary measurement standard of power magnetic losses, magnetic flux density of a constant magnetic field units in the range of 0,1 to 2,5 T and magnetic flux in the range of 1·10⁻⁵ to 3·10⁻² Wb GET 198-2017 7

GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT TECHNIQUES

- K. K. Semenov, A. A. Tzelischeva. The interval bisection for the metrologically valid solving of the equations with inaccurate initial data 10
V. I. Kuznetsov, S. S. Kukushkin. Filtration of measuring data at structural and algorithmic transformations 15

MEASUREMENTS IN INFORMATION TECHNOLOGIES

- S. V. Sokolov, M. V. Polyakova, P. A. Kucherenko. Analytical synthesis of adaptive Kallman filter on the basis of irregular accurate measurements 19

LINEAR AND ANGULAR MEASUREMENTS

- M. F. Danilov, A. P. Ivanova, A. A. Savelieva. Errors evaluation of coordinate measurements of parts geometrical parameters based on a priori data 23
V. V. Poroshin, D. Yu. Bogomolov, V. G. Lysenko. Investigation of surface texture filtering error using spline spatial filter 27
O. A. Yannikova, A. S. Yamnikov, I. A. Matveyev. Influence of ovality of the base surfaces of thin-walled extended axially symmetric hollow parts on measurement errors of radial runout in the prisms 32

MECHANICAL MEASUREMENTS

- A. A. Nedbaylo, E. V. Patokin, A. A. Gordeyev. An indirect measurement method of the impulse pressure generated by pendulum type test facility 37

TERMOPHYSICAL MEASUREMENTS

- V. N. Nefedov, A. V. Mamontov, V. P. Simonov, I. V. Nazarov. Measurement of temperature distribution in the heat treated by microwave radiation polymer composite pipes 42

ELECTROMAGNETIC MEASUREMENTS

- G. V. Vavilova, A. E. Goldshtein. Device for performing in-process control of the capacitance of an electric wire per length unit 46

RADIO MEASUREMENTS

- I. E. Arsaev, Yu. V. Vekshin, A. I. Lapshin, V. V. Mardyshkin, M. V. Sargsyan, E. Yu. Khvostov, V. K. Chernov, E. F. Yurchuk. Measurements of radio telescope receiving system noise temperatures of two-elements radio interferometer with very long baseline 51
I. E. Arsaev, A. I. Lapshin, M. V. Sargsyan, E. F. Yurchuk. Wide-aperture low-temperature noise generators for calibration radio telescope of two-elements radio interferometer with very long baseline 55

ACOUSTIC MEASUREMENTS

- M. Ya. Marusina, A. V. Fedorov, V. E. Prohorovich, I. V. Berkutov, V. A. Bychenok, N. V. Tkacheva, A. L. Mayorov. Development of acoustic control methods for controlling the stress-strain state of threaded connections 60

IONIZING RADIATION MEASUREMENTS

- I. V. Kuvykin, S. M.-Sh. Tsuriev. Development of the installation for radionuclide activity measurement by digital method of coincidences 65

PHYSICOCHEMICAL MEASUREMENTS

- Yu. K. Taranenko, O. Yu. Oliynyk, N. A. Minakova, E. V. Titova. Theoretical foundations for designing tubular flow resonators from quartz glass 68

Измерение распределения температуры в полимерных композитных трубах при их термообработке с использованием микроволнового излучения

В. Н. НЕФЁДОВ¹, А. В. МАМОНТОВ², В. П. СИМОНОВ¹, И. В. НАЗАРОВ¹

¹Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Москва, Россия, e-mail: 6034348@mail.ru

²Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий,
Москва, Россия, e-mail: niipmt@mail.ru

Предложен метод построения микроволновых установок лучевого типа, формирующих равномерное распределение температуры по объёму труб из полимерных композиционных материалов. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований распределения температуры по толщине материала трубы. Показаны преимущества микроволновых технологий отверждения полимерных композиционных материалов по сравнению с традиционными методами.

Ключевые слова: микроволновое устройство, микроволновая технология, электродинамическая система, источник микроволновой энергии, распределение температуры, композиционный материал.

The method of construction of the radial type microwave devices forming the uniform temperature distribution in the volume of polymer composite pipes is suggested. The results of theoretical and experimental studies of the temperature distribution along the thickness of the pipe material are presented. The advantages of microwave technology for the curing of polymeric composite materials compared to traditional methods are shown.

Key words: microwave device, microwave technology, electrodynamic system, microwave power source, temperature distribution, composite material.

В настоящее время в различных отраслях промышленности широко используют трубы из полимерных композиционных материалов на основе углеродных, базальтовых и стеклянных волокон. Такие материалы обладают высокой прочностью, низкой теплопроводностью, высокими электроизоляционными свойствами, малым удельным весом, стойкостью к химическим воздействиям, высоким уровнем эксплуатационных нагрузок, надёжностью и долговечностью. Затраты на монтажные работы полимерных композиционных материалов малы. В процессе производства труб применяют термоактивное эпоксидное связующее, которое обеспечивает высокий уровень гидравлической стойкости [1–3].

Традиционные технологии тепловой обработки труб из полимерных композиционных материалов основаны на конвективном, радиационном или контактном теплообмене между обрабатываемым материалом и теплоносителем. Однако полимерные композиционные материалы обладают низкой теплопроводностью, и возникающие градиенты температуры в обрабатываемом материале делают технологический процесс тепловой обработки длительным со значительными затратами электроэнергии. Это приводит к неоднородности структуры материала изделий, что отражается на их физико-механических характеристиках [4, 5].

Один из альтернативных методов тепловой обработки полимерных композиционных материалов связан с использованием в качестве источника тепловой энергии микроволнового излучения [6–8]. Микроволновый метод по сравнению с традиционными методами тепловой обработки

обладает рядом преимуществ как с точки зрения снижения затрат электроэнергии, улучшения экологии, повышения скорости технологических процессов отверждения полимерных связующих, так и повышения однородности структуры, плотности и прочности получаемых изделий [9–11].

Основное преимущество предлагаемого технологического процесса отверждения термореактивного полимерного связующего обусловлено тем, что энергия микроволнового излучения мгновенно проникает вглубь материала трубы независимо от его теплопроводности. Так как характер микроволнового нагрева – объёмный, то применение различных конструкций электродинамических систем позволяет сформировать в материале трубы равномерное распределение температуры и избавиться от градиентов температуры, имеющих место при традиционных методах нагрева [12–14].

Использование микроволнового излучения при термообработке труб из полимерных композиционных материалов не приводит к нагреву окружающего воздуха и металлических конструкций оборудования. Обрабатываемые трубы расположены в оправках из теплоизоляционного материала с малыми диэлектрическими потерями в течение времени, необходимого для нагрева и отверждения полимерного связующего. Такая методика позволяет снизить энергопотребление ввиду отсутствия теплоотдачи в окружающее пространство. К тому же микроволновый метод термообработки труб не обладает инерцией, что позволяет с необходимой точностью осуществлять контроль и автоматизировать технологический процесс отверждения полимерного композиционного материала [13, 14].

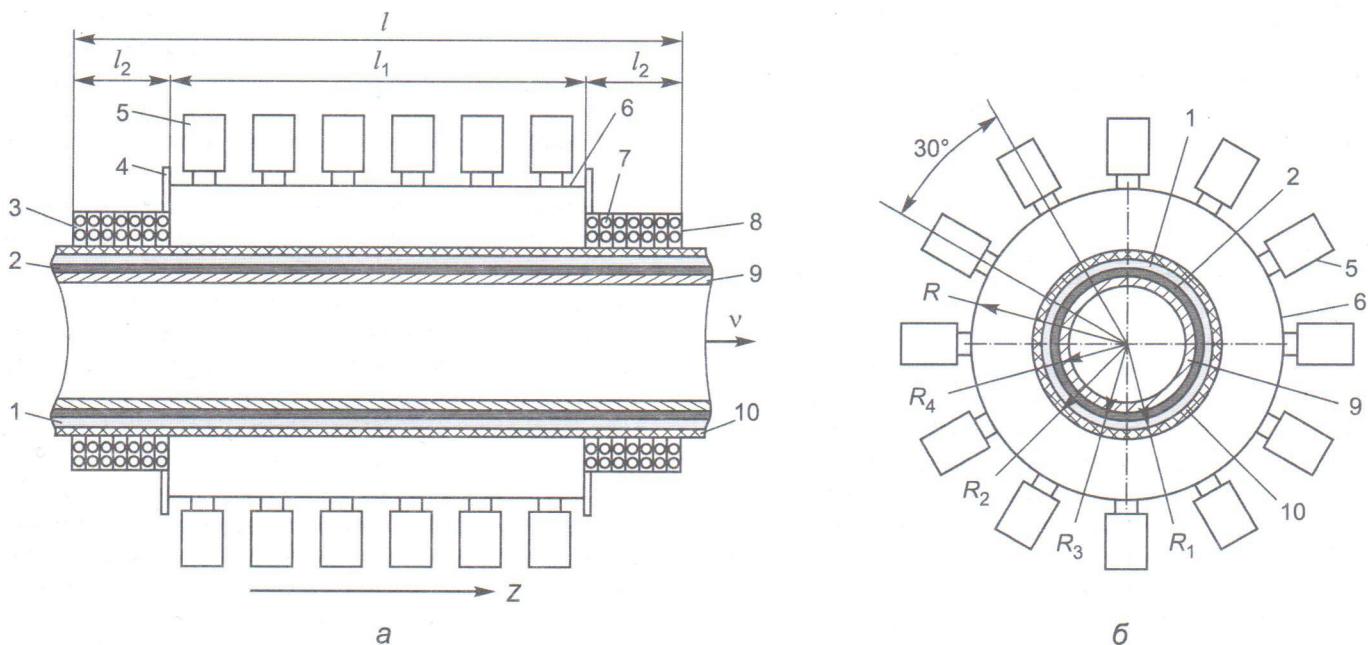


Рис. 1. Продольное сечение микроволновой установки лучевого типа непрерывного действия для отверждения трубы из полимерного композиционного материала (а) и поперечное сечение рабочей камеры этой установки (б):
1 – труба из полимерного композиционного материала; 2 – внутренняя труба из теплоизоляционного материала с малыми диэлектрическими потерями (например, фторопласта); 3 – шлюзовая камера; 4 – соединительные фланцы; 5 – источник микроволновой энергии; 6 – цилиндрическая рабочая камера; 7 – трубка с водой из материала с малыми диэлектрическими потерями (например, поливинилхлорида); 8 – контактные пластины; 9 – металлическая труба; 10 – внешняя труба из теплоизоляционного материала с малыми диэлектрическими потерями (например, фторопласта)

В научных публикациях [15–17] представлены результаты воздействия микроволнового излучения на изменение свойств термореактивных эпоксидных смол. Показано, что по сравнению с традиционными технологиями отверждения полимерных композиционных материалов в различных конструкциях электрических печей, микроволновая технология позволяет сократить время отверждения, уменьшить затраты электроэнергии, снизить пористость и повысить однородность структуры и прочностные характеристики материала [18].

В настоящей работе представлена конструкция микроволновой установки лучевого типа для непрерывного производства труб из композиционного полимерного материала на основе базальтовых волокон. Такие трубы имеют внешний диаметр 1000 мм и толщину 30 мм. Предложенная оригинальная установка работает на частоте колебаний электромагнитного поля 2450 МГц. Камера лучевого типа состоит из двух цилиндрических конструкций, выполненных из металла. На внешней трубе в определенной последовательности расположены источники микроволновой энергии, которые обеспечивают равномерное распределение температуры на внешней поверхности трубы из полимерного композиционного материала. Материал трубы расположен на внешней поверхности внутренней трубы между двумя трубами из фторопласта, чтобы исключить теплоотдачу в окружающее пространство, а отражённая от внутренней металлической трубы энергия микроволнового излучения вновь поглощается материалом трубы. Протяжённость внешней фторопластовой трубы соответствует времени, необходимому для её отверждения. Сложение пада-

ющей и отражённой мощности микроволнового излучения позволяет обеспечить равномерное распределение температуры по толщине материала трубы.

На рис. 1, а представлено продольное сечение микроволновой установки лучевого типа. Микроволновая установка длиной l состоит из рабочей камеры 6, имеющей длину l_1 и радиус R. На камере в определённом порядке расположены источники 5 микроволновой энергии для формирования равномерного нагрева материала трубы 1. Цилиндрическая рабочая камера 6, в которой нагревается труба из полимерного композиционного материала, расположена между двумя шлюзовыми камерами 3, каждый из которых имеет длину l_2 . Конструкция шлюзовых камер защищена патентом РФ [19].

Сформированная из полимерного композиционного материала труба движется со скоростью v вдоль оси Z микроволновой установки. Данная труба расположена между двумя трубами 2, 10, изготовленными из теплоизоляционного материала. Такие трубы имеют малые диэлектрические потери, что помогает не учитывать теплоотдачу в окружающее пространство и поддерживать заданную температуру в течение времени, необходимого для полного отверждения материала. Труба 2 имеет контакт с металлической трубой 9. Масса трубы 1 из полимерного композиционного материала в рабочей камере составляет 532 кг. Микроволновая мощность, необходимая для нагрева трубы из полимерного композиционного материала от 20 до 200 °C, соответствует 57,6 кВт за время воздействия микроволнового излучения в течение 22 мин при скорости движения трубы 8 м/ч.

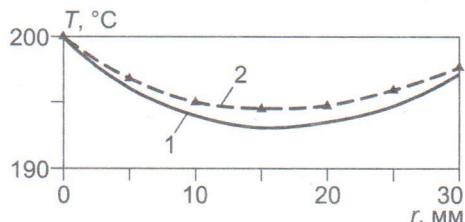


Рис. 2. Рассчитанная (1) и экспериментальная (2) зависимости распределения температуры по толщине материала трубы

На рис. 1, б показано поперечное сечение рабочей камеры нагрева микроволновой установки лучевого типа для отверждения трубы из полимерного композиционного материала. Для равномерного нагрева трубы из полимерного композиционного материала на рабочей камере в определённой последовательности расположены 72 источника микроволновой энергии. Максимальная выходная мощность каждого источника составляет 0,8 кВт. Источники микроволновой энергии имеют массу 10 кг и габаритные размеры 400×200×200 мм. Вывод микроволновой энергии из источников осуществляется с помощью волновода, поперечное сечение которого 72×34 мм, на основном типе волны H_{10} . Раскрытие волновода используется в качестве излучающей антенны.

Для формирования равномерного распределения температуры на поверхности трубы, расположенной на расстоянии 400 мм от цилиндрической поверхности рабочей камеры, было выбрано шесть поперечных сечений, в каждом из которых по окружности располагалось 12 источников микроволновой энергии под углом 30° относительно друг друга. Расстояние между соседними рядами источников микроволнового излучения вдоль оси рабочей камеры составляло 500 мм. Отклонение рассчитанного значения температуры от её номинального значения на внешней поверхности рассматриваемой трубы после прохождения микроволнового устройства отсутствовало.

Для предотвращения выхода микроволнового излучения из работающей микроволновой установки и обеспечения безопасной работы обслуживающего персонала предусмотрены шлюзовые камеры 3. Шлюзовые камеры 3 соединены с рабочей камерой с помощью специальных фланцев 4 для предотвращения микроволнового излучения в окружающее пространство. Над поверхностью трубы 10 в шлюзовой камере расположена трубка из материала с малыми диэлектрическими потерями (поливинилхлорида) 7, заполненная водой. Между трубками с водой 6 и внешней поверхностью шлюзовой камеры 3, выполненной в виде цилиндра из металла, в периодической последовательности расположены металлические пластины 8, которые имеют электрический контакт с внешней цилиндрической поверхностью шлюзовой камеры. Микроволновое излучение, попадая между этими пластинами, многократно отражается от них и поглощается циркулирующей водой в трубках 7.

Микроволновая установка работает следующим образом. Труба из полимерного композиционного материала, имеющая внешний радиус R_1 , помещается на трубу радиусом R_3 , выполненную из теплоизоляционного материала (например, фторопласта) с малыми диэлектрическими потерями. Материал трубы движется через микроволновую установку со скоростью v между двух труб в виде трубок из фторопласта. Материал трубы проходит через шлюзовую камеру и поступает в рабочую камеру нагрева. В этой камере с помощью источников микроволнового излучения формируется равномерное распределение температуры по объёму обрабатываемого материала трубы. Затем труба проходит через шлюзовую камеру, поглощающую микроволновое излучение. Экспериментальными исследованиями установлено, что уровень побочных излучений от микроволновой установки не превышал 10 мкВт/см², что отвечает принятым нормам безопасности для обслуживающего персонала. Предлагаемая конструкция микроволновой установки позволяет существенно сократить энергетические затраты на технологический процесс отверждения трубы из полимерного композиционного материала, увеличить производительность, а также реализовать равномерный нагрев трубы по всему объёму в соответствии с требованиями, предъявляемыми к технологическому процессу.

При расчёте диаграммы микроволнового излучения из раскрытия прямоугольного волновода источника микроволновой энергии использован метод Гюйгенса–Кирхгофа [20]. Распределение температуры по толщине материала трубы из полимерного композиционного материала можно рассчитать по формуле

$$T(R) = T(0)e^{-2\alpha R},$$

где $T(R)$ – температура материала трубы на расстоянии R от её внешней поверхности; $T(0)=200$ °C – температура на внешней поверхности трубы; α – постоянная затухания амплитуды напряжённости электрического поля в полимерном композиционном материале.

В первом приближении постоянная затухания амплитуды напряжённости электрического поля определяется выражением

$$\alpha = \pi \epsilon'' / (\lambda \sqrt{\epsilon'}),$$

где λ – длина волны источника микроволнового излучения; ϵ'' – мнимая часть относительной диэлектрической проницаемости материала трубы; ϵ' – действительная часть относительной диэлектрической проницаемости материала трубы.

На рис. 2 показаны рассчитанная и экспериментальная зависимости распределения температуры по толщине материала трубы. Экспериментальные исследования по измерению температуры полимерного композиционного материала трубы проводили после отключения микроволнового излучения на выходе из микроволновой установки. Температуру измеряли по толщине материала трубы через каждые 5 мм с учётом отражения микро-

Теплофизические измерения

волнового излучения от металлической трубы 9. Температура на внутренней поверхности материала трубы составляла 197 °C, а на её внешней поверхности –200 °C. Расхождение рассчитанных и измеренных характеристик распределения температуры не превышало 3 °C. С учётом отражённой мощности от внутренней поверхности металлической трубы отклонение температуры по всей толщине трубы от номинального значения не превышало 7 °C.

Основные параметры микроволновой установки и обрабатываемого материала трубы

Рабочая частота колебаний электромагнитного поля ..	2450 МГц
Выходная мощность источника микроволновой энергии..	0,8 кВт
Микроволновая мощность установки	57,6 кВт
Количество источников микроволновой энергии	72
Общая длина микроволновой установки, l	6000 мм
Длина рабочей камеры нагрева, l_1	3000 мм
Длина шлюзовой камеры, l_2	1500 мм
Радиус рабочей камеры нагрева, R	900 мм
Радиус трубы:	
внешний, R_1	500 мм
внутренний, R_2	470 мм
Скорость движения материала трубы	
в микроволновой установке, v	8 м/ч
Температура материала трубы:	
начальная	20 °C
конечная.....	200 °C
Теплоёмкость материала трубы	0,84 Дж/(г·°C)
Плотность материала трубы.....	1,9 г/см³
Относительная диэлектрическая проницаемость материала трубы:	
мнимая часть, ϵ''	0,13
действительная часть, ϵ'	4,5
Коэффициент теплопроводности материала трубы ...	0,46 Вт/(м·°K)

Заключение. Предложена эквивалентная модель микроволновой установки лучевого типа непрерывного действия для отверждения трубы из полимерного композиционного материала, представлены основные параметры этой установки. Микроволновая установка позволяет существенно сократить энергетические затраты на технологический процесс отверждения трубы из полимерного композиционного материала, увеличить производительность. Уровень побочных излучений от микроволновой установки не превышает 10 мкВт/см², что отвечает необходимым нормам безопасности для работы обслуживающего персонала и не нарушает работу рядом стоящей радиотехнической аппаратуры. Авторами статьи показано, что результирующее распределение температуры по поверхности и по поперечному сечению диэлектрической трубы в предложенной конструкции микроволновой установки лучевого типа удовлетворяет требованиям технологического процесса.

Новизна предложенного метода расчёта распределения температуры материала трубы состоит в том, что учитывается зависимость диэлектрических параметров обрабатываемого материала от изменения температуры.

Публикация подготовлена в результате проведения работ (№ проекта 18-01-0024) в рамках Программы «Научный фонд Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)» в 2018–2020 гг. и в рамках государственной поддержки ведущих университетов Российской Федерации «5–100».

Л и т е р а т у р а

1. Берлин А. А. Современные полимерные композиционные материалы // Соросовский образовательный журнал. 1995. № 1. С. 57–65.
2. Кербер М. Л., Виноградов В. М., Головкин Г. С. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: Учебное пособие / Под ред. А. А Берлина. СПб.: Профессия, 2008.
3. Михайлин Ю. А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006.
4. Перепёлкин К. Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. М.: Научные основы и технологии, 2009.
5. Михайлин Ю. А. Специальные полимерные композиционные материалы М.: Научные основы и технологии, 2009.
6. Кубракова И. В. Микроволновое излучение в аналитической химии. Возможности и перспективы использования // Успехи химии. 2002. Т. 71. № 4. С. 327–340.
7. Шахова Ф. А., Масленников С. И., Киреева М. С., Шавшукова С. Ю., Зорин В. В., Мусавиров Р. С., Рахманкулов Д. Л. Применение микроволнового излучения в органических реакциях // Материалы IV Международной конференции «Наукоемкие химические технологии». Волгоград, 1996. С. 95.
8. Рахманкулов Д. Л., Бикбулатов И. Х., Шулаев Н. С., Шавшукова С. Ю. Микроволновое излучение и интенсификация химических процессов. М.: Химия, 2003.
9. Bolasodun B., Nesbitt A., Wilkinson A., Day R. Effect of curing method on physical and mechanical properties of araldite DLS 772/4 4 DDs epoxy system // International journal of scientific & Technology research. 2013. V. 2. No. 2. P. 12–18.
10. Hill D. J. T., George G. A., Rogers D. G. A systematic study of the microwave and thermal cure kinetics of the DGEBA/DDS and DGEBA/DDM epoxy-amine resin systems. Polymers for Advanced Technologies. 2002. No. 13(5). P. 353–362.
11. Jianghua Wei, Martin C. Hawley, John D. Delong, Mark Demeuse. Comparison of microwave and thermal cure of epoxy resins // Polymer Engineering and Science. 1993. No. 33(17). P. 1132–1140.
12. Окress Э. СВЧ энергетика. М.: Мир, 1971.
13. Мамонтов А. В., Нефёдов В. Н., Назаров И. В., Потапова Т. А. Микроволновые технологии. Монография. М.: Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий Московского института электроники и математики (технического университета), 2008.
14. Nefedov V. N. Modern technologies of composite

- materials heat treatment // Life Science Journal. 2014. V. 11. No. 8. P. 512–515.
15. Лаврентьев В. А., Калганова С. Г. Применение энергии СВЧ электромагнитных колебаний для воздействия на процесс отверждения эпоксидных смол. // Электро- и теплотехнологические процессы и установки: Сб. научных трудов. Саратов: СГТУ, 2005. Т.2. С.67–70.
16. Лаврентьев В.А., Калганова С. Г. Влияние режимов СВЧ – отверждения на прочностные свойства эпоксидного компаунда. // Проблемы электроэнергетики: Сб. научных трудов. Саратов: СГТУ, 2008. С. 133–136.
17. Navabpour P., Nesbit A., Degamber B., Fernando G., Vann T., Day R. Comparison of the curing kinetics of a DGEBA/acid anhydride epoxy resin system using differential scanning calorimetry and a microwave-heated calorimeter // Journal of Applied Polymer Science. 2007. No. 104(3). P. 2054–2063.
18. Гузева Т. А. Совершенствование технологических режимов отверждения заготовок деталей из органопластиков под действием СВЧ излучения // Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, 2014.
19. Пат. 2060600 РФ. СВЧ-печь конвейерного типа (варианты) / В.Н. Нефёдов, Г. Г. Валеев, С. В. Корнеев, Ю. В. Карпенко // Изобретения. 1996. № 5.
20. Фрадин А. З. Антенно-фидерные устройства. М.: Связь, 1977.

Дата принятия: 16.11.2017.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.3.082

Прибор для технологического контроля погонной ёмкости электрического провода

Г. В. ВАВИЛОВА, А. Е. ГОЛЬДШТЕЙН

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, Россия, e-mail: wgw@tpu.ru

Приведены теоретическое описание и практическая реализация метода технологического контроля ёмкости одножильного провода. Представлены нормативные документы, регламентирующие измерение ёмкости провода, отмечена ограниченность их применения для технологического контроля. Разработаны минимизирующие погрешность измерения методики первичной и рабочей настроек измерителя ёмкости. Рассмотрена проблема определения действительного значения ёмкости образцов провода. Описаны конструкция, принцип действия и результаты заводских испытаний измерителя ёмкости CAP-10.

Ключевые слова: одножильный провод, погонная ёмкость, электропроводность воды, диэлектрическая проницаемость, действительное значение ёмкости, настройка.

The theoretical description and practical realization of a method for in-process control of the capacitance per length unit of a single-core electric wire are presented. The normative documents regulating measurement of the electric wire capacitance are considered. The limitations of these documents for in-process control of the electric wire quality are stated. The techniques of initial and operating adjustment of the device for measuring the capacitance per length unit have been elaborated to minimize the measurement error. The problem of determining the actual value of the wire sample capacitance is considered. The operating principle and design of the device CAP-10 are described. The results of its in-plant testing are provided.

Key words: single-core wire, capacitance per length unit, water conductivity, permittivity, actual capacitance value, adjustment.

Для ряда кабельных изделий (кабели связи, телефонные провода и др.) ёмкость является важным параметром, определяющим качество передачи информации. К другим нормирующими характеристикам кабельных изделий относятся геометрические параметры (диаметры жилы и изоляции, толщина изоляции, эксцентрисичность и т. д.) и связанные с

ними электрические параметры (активное сопротивление, погонная ёмкость, волновое сопротивление и т. д.) [1, 2]. Таким образом, результат измерения ёмкости может быть использован для контроля геометрических параметров кабельных изделий.

Контроль ёмкости провода важен при изготовлении ка-