



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

Труды
юбилейной конференции,
посвященной 70-летию
ФГУП «НПП «Исток»
Часть II

ВЫПУСК 4 (519)

2013

МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ДЕПАРТАМЕНТ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 4(519)

2013

Издается с 1950 г.

Главный редактор

д.т.н., профессор **А.Н. Королев**

Редакционная коллегия:

к.т.н. **С.А. Зайцев** (*зам. главного редактора*),
д.т.н. **Б.Н. Авдонин** (*зам. главного редактора, ОАО ЦНИИ «Электроника»*),
Ю.А. Будзинский, к.ф.-м.н. **А.В. Галдецкий**, **Б.Ф. Горбик**,
С.И. Гришин, д.т.н. **А.Д. Закурдаев**, д.т.н. **С.С. Зырин**,
к.т.н. **А.С. Котов**, д.т.н. **П.В. Куприянов**, к.т.н. **В.В. Лисс**,
д.т.н. **М.И. Лопин**, **В.М. Малыщик**, к.т.н. **П.М. Мелешкевич**,
к.т.н. **В.Ю. Мякинков**, д.ф.-м.н. **А.Б. Пашковский**,
Е.Н. Покровский, к.т.н. **А.В. Потапов**,
д.т.н. **К.Г. Симонов**, **В.П. Стебунов** (*ответственный секретарь*),
к.т.н. **А.М. Темнов**, д.т.н. **Н.Д. Урсуляк**,
д.т.н. **М.М. Трифонов** (ЗАО НПП «Исток-Система»),
О.А. Морозов (ЗАО «НПП «Магратеп»),
к.т.н. **А.Г. Михальченко** (МБУ «Дирекция Наугограда»),
д.ф.-м.н. **А.И. Панас** (ИРЭ РАН),
к.т.н. **В.В. Абрамов** (ФГУП СКБ ИРЭ РАН),
А.А. Туркевич (ФГУП «НПП «Циклон-Тест»)

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС 77-24651 от 6 июня 2006 г.) и включен в перечень ВАК (перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук)

© Федеральное государственное унитарное предприятие «НПП «Исток», 2013 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Выпуск 4(519)

2013

ЮБИЛЕЙНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 70-ЛЕТИЮ ФГУП «НПП «ИСТОК»
«СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА. 70 ЛЕТ РАЗВИТИЯ»
(15–16 мая 2013 года, г. Фрязино)

Часть II

Секция 1. Твердотельная СВЧ-электроника

- Баров А.А., Кондратенко А.В., Хохол Д.С., Шишкин Д.А.* – GaAs СВЧ монолитные интегральные схемы для приёмопередающих модулей АФАР 6
- Райкунов Г.Г., Данилин Н.С., Белов Д.А.* – Развитие электронной компонентной базы СВЧ-диапазона малых спутников для целей обнаружения метеоритной угрозы 13
- Бычков М.С., Шебардин Р.С., Ионов Л.П.* – Результаты ОКР по созданию МИС разного назначения в базисе SiGe БиКМОП-технологии 17
- Платонов В.Э.* – Использование твердотельных СВЧ-приборов в разработках ООО «СВЧ-Радиосистемы» в диапазоне частот до 40 ГГц..... 21

Секция 2. Электрорадиотехнические приборы СВЧ

- Борисов А.А., Галдецкий А.В., Королев А.Н., Мамонтов А.В., Рыжов В.А., Симонов К.Г., Морозов О.А.* – Сверхмощные импульсные клистроны и многочастотные СВЧ электрорадиотехнические приборы. Достигнутые характеристики, перспективы разработок..... 26
- Востров М.С., Закурдаев А.Д., Макаров А.П.* – О возможности реализации малогабаритных многолучевых клистронов в 8-мм диапазоне длин волн с высокой средней мощностью (до 100 Вт) 37
- Скрипкин Н.И., Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г., Слинко В.Н., Пересыпкин А.С.* – Резонансная СВЧ-компрессия выходных импульсов магнетронов миллиметрового диапазона длин волн 44
- Минц С.В., Панченко Л.В., Сафронов А.С., Скрипкин Н.И.* – Результаты исследования спектра побочных колебаний импульсных магнетронов..... 47

<i>Жарый Е.В.</i> – Широкополосные многолучевые клистроны средней мощности. Достигнутые результаты, перспективы развития	52
<i>Евсеев С.В., Пугнин В.И.</i> – Мощный широкополосный импульсный клистрон с равномерной амплитудно-частотной характеристикой	59
<i>Юнаков А.Н., Пугнин В.И.</i> – Проблемы и пути создания мощных широкополосных многолучевых клистронов в средней части сантиметрового диапазона длин волн	64
<i>Муллин В.В., Крылов Г.В.</i> – Вакуумные коммутационные аппараты, серийно выпускаемые ОАО «НПП «Контакт», и новые разработки	68
<i>Подвигалкин В.Я., Жуков В.В., Жаворонков И.А., Куканов А.М., Искандеров Ф.Г.</i> – Миниатюризация замедляющих систем вакуумных приборов X- и K-диапазонов.....	75
<i>Журавлева В.Д., Конторин Ю.Ф., Петросян А.И., Роговин В.И., Роговин И.В., Семенов С.О., Юдин Г.Ю.</i> – Автоматизированное проектирование современных ЛБВ О-типа.....	79
<i>Данилов А.Б., Ильина Е.М., Рафалович А.Д., Штерн Л.А.</i> – Улучшение характеристик мощных широкополосных ЛБВ.....	83
<i>Лопин М.И., Рыжов В.А., Галдецкий А.В., Мишкин Т.А., Грищук Р.В., Голенецкий И.И.</i> – Клистроды для телевидения и РЛС	87
<i>Царев В.А., Шалаев П.Д., Симонов Д.Л., Молчанов Я.Т., Щеголева Л.М., Кузнецова Л.В., Николаев А.А., Манжосин М.А.</i> – Исследование и оптимизация параметров резонаторной системы многолучевого малогабаритного клистрона Ki-диапазона длин волн	93

Секция 3. Комплексируемые изделия и аппаратура

<i>Зубов С.В., Климачев И.И., Тюков А.В.</i> – Эволюция медтехники и технологии ее производства на примере ОАО «Исток-Аудио-Интернэшнл»	101
<i>Хромов А.В., Котов А.С., Ештокин В.Н., Левашов Н.И., Дюльгер В.Б., Кулачек Е.А., Захаров С.М., Плешанов С.А., Чугунов В.В.</i> – Результаты разработки радиоэлектронного блока для измерения частотных параметров атомно-лучевых трубок	107
<i>Леценко М.П., Плешанов С.А., Самарцев И.И., Турутин Ю.А., Чугунов В.В.</i> – Цезиевые атомно-лучевые трубки с магнитной селекцией и лазерной накачкой	114
<i>Любченко В.Е., Юневич Е.О., Калинин В.И., Котов В.Д., Радченко Д.Е., Телегин С.А.</i> – Генерация микроволнового излучения активными антеннами на полевых транзисторах в квазиоптическом резонаторе	120
<i>Любченко В.Е., Юневич Е.О., Калинин В.И., Котов В.Д., Радченко Д.Е., Телегин С.А.</i> – Генерация микроволнового излучения активными антеннами на полевых транзисторах в условиях синхронизации внешним сигналом.....	124

Секция 4. Технология и материаловедение

<i>Арыков В.С., Великовский Л.Э., Ишуткин С.В., Романенко С.В., Шестериков Е.В., Юнусов И.В.</i> – Технологии мелкосерийного производства GaAs СВЧ монолитных интегральных схем.....	130
--	-----

<i>Филатов М.Ю., Абдуллаев О.Р., Дренин А.С., Роговский Е.С.</i> – Новая технология создания ограничительных кремниевых диодов с интегральным теплоотводом ...	135
<i>Желаннов А.В., Падорин А.В., Удальцов В.Е.</i> – Разработка технологии реактивно-ионного травления слоев нитрида галлия в хлорсодержащей среде	139
<i>Ануфриев А.Н., Васильев В.Т., Капитанова Э.А., Федотова Н.П.</i> – Технология создания элементов и модулей технологических цепочек разработки и производства мощных твердотельных СВЧ-устройств	143
<i>Зубков Н.П., Лебедева Е.Н., Литвиненко Н.П., Налогин А.Е., Серова О.Г., Трубачева Г.А.</i> – Разработка технологии нанесения никелевых и золотых гальванических покрытий на композиционный материал AlSiC–	145
<i>Каневский Е.И., Колпакова Н.Ф.</i> – Магнитные материалы и магнитные системы, используемые в СВЧ-электронике, и требования к ним	149
<i>Зубков Н.П., Пелипец О.В., Бобырь Н.П., Спицын А.В., Касимцев А.В.</i> – Сорбционные и механические характеристики титан-ванадиевых геттеров	153
<i>Навроцкий И.А., Бурцев А.А., Денисов Д.С.</i> – Технология получения микроразмерных замедляющих структур для вакуумных терагерцовых усилителей с ленточным электронным потоком	160
<i>Калашников Ю.Н., Бейль В.И., Литвиненко Н.П., Лебедева О.В., Ранжин Ю.С.</i> – Современное состояние технологии сборки многофункциональных твердотельных модулей СВЧ на «НПП «Исток»	163
<i>Дармаев А.Н., Комаров Д.А., Макеев А.Э., Морев С.П., Абаньшин Н.П., Горфинкель Б.И., Якунин А.Н.</i> – О возможности применения автоэмиссионных катодных матриц планарного типа для ЭОС мощных СВЧ-приборов	167
<i>Ли И.П., Поляков В.С., Силаев А.Д., Минин А.А., Харитонов Н.Е.</i> – Прессованный металлосплавной палладий-бариевый катод для магнетронов с безнакальным запуском ...	170
<i>Бушуев Н.А., Шестеркин В.И., Бурцев А.А., Григорьев Ю.А., Кудряшов В.П., Шалаев П.Д.</i> – Матричные автоэмиссионные катоды из стеклоуглерода: современное состояние и перспективы использования в СВЧ-приборах	175
<i>Бурцев А.А., Григорьев Ю.А., Денисов Д.С., Петросян А.И., Шалаев П.Д., Шестеркин В.И.</i> – Расчетно-экспериментальная оценка углов наклона электронных траекторий матричных автоэмиссионных катодов из стеклоуглерода	183
<i>Дюбуа Б.Ч., Поливникова О.В.</i> – О некоторых особенностях и проблемах современных эффективных катодов	187
<i>Соколов А.М.</i> – Опыт применения прессованных металлооксидных катодов при разработке и реставрации вакуумных приборов	191
<i>Дюбуа Б.Ч., Земчихин Е.М., Култашев О.К., Макаров А.П., Негирев А.А., Поливникова О.В., Рожков С.Е.</i> – Металлосплавные катоды для применения в СВЧ-приборах с высокой плотностью тока	194
<i>Ишуткин С.В., Анищенко Е.В., Ерофеев Е.В., Кагадей В.А.</i> – Оптимизация процесса «взрыва» фоторезистивной маски при формировании межэлементной металлизации на основе меди в GaAs СВЧ МИС	198

<i>Ишуткин С.В., Анищенко Е.В., Ерофеев Е.В., Кагадей В.А.</i> – Формирование межэлементной металлизации на основе меди в GaAs СВЧ МИС	201
<i>Журавлев К.С., Торопов А.И., Бакаров А.К., Малин Т.В., Мансуров В.Г., Гилинский А.М., Протасов Д.Ю.</i> – Разработка МЛЭ-технологии гетероструктур для мощных арсенид- и нитридгаллиевых СВЧ-транзисторов.....	204
<i>Мамонтов А.В., Нефедов В.Н.</i> – СВЧ-устройства для термообработки листовых материалов.....	209
<i>Мамонтов А.В., Нефедов В.Н.</i> – Термообработка теплоизоляционного материала из базальтового волокна с использованием СВЧ-энергии	218
Тематический указатель	224
Алфавитный указатель	231

МАТЕРИАЛЫ ПУБЛИКУЮТСЯ В АВТОРСКОЙ РЕДАКЦИИ

ТЕРМООБРАБОТКА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ИЗ БАЗАЛЬТОВОГО ВОЛОКНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЧ-ЭНЕРГИИ

А. В. Мамонтов, В. Н. Нефёдов

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)
Московский институт электроники и математики Национального исследовательского
университета «Высшая школа экономики» (МИЭМ НИУ ВШЭ), г. Москва*

Представлены результаты экспериментальных исследований применения микроволновой энергии для термообработки базальта и изделий из базальтового волокна. Приведены численные результаты и график изменения температуры образца базальта. Показано, что СВЧ-нагрев имеет ряд преимуществ перед традиционными методами плавления базальта и термообработки изделий из базальтового волокна, использующими сжигаемое топливо. Представлены результаты экспериментального исследования термообработки базальтового картона с применением микроволнового излучения. Приведены зависимости изменения массы образцов картона в процессе его сушки.

КС: СВЧ-излучение, теплоизоляционный материал, распределение температуры, волновод, базальт, плавление, термообработка

1. ВВЕДЕНИЕ

Анализ научных публикаций отечественных и зарубежных изданий показывает, что в настоящее время особое внимание уделяется поиску принципиально новых технических решений для применения микроволновых технологий с целью замещения существующих малоэффективных традиционных технологий термообработки материалов, а также при производстве новых видов материалов.

Использование микроволновых технологий для термообработки материалов позволяет сократить продолжительность технологического процесса; повысить качество получаемых материалов; снизить удельный расход электроэнергии; уменьшить площади производственных помещений; сократить численность обслуживающего персонала; улучшить санитарно-гигиенические условия труда; уменьшить площадь, объем и массу промышленных установок; повысить управляемость технологическим процессом и создать условия для автоматизации производства.

В современном производстве всё больше внимания уделяется поиску новых технологических решений, отвечающих требованиям экологической чистоты, сбережения энергетических ресурсов с одновременным повышением эффективности технологических процессов. Разрабатываются новые материалы, отвечающие современным требованиям, производство которых требует внедрения новых технологических процессов, так как традиционно используемые технологии в этом случае либо оказываются малоэффективными, либо вовсе не способны привести к требуемому результату.

Примером практического исследования возможности применения современных технологий для обработки материалов может служить представленная работа.

Предпосылкой для проведения данного исследования явилась необходимость модернизации технологии производства базальтового утеплителя на одном из российских предприятий. Существующий технологический процесс производства базальтового утеплителя включает в себя плавление базальтового гравия, получение сверхтонкого штапельного волокна из расплава базальта с одновременной его пропиткой связующим веществом, формирование полотна утеплителя с последующим отверждением связующего.

В данном технологическом цикле наиболее затратным является процесс плавления базальта, обладающий рядом недостатков:

- 1) длительный этап запуска плавильной печи (несколько дней);

2) топливом для плавильной печи является кокс (в условиях данного технологического процесса);

3) необходимость использования для плавления щебня базальта только определённых фракций;

4) при технических сбоях на последующих после плавления технологических этапах (формование, отверждение) плавильная печь для поддержания температуры вынужденно работает вхолостую, продолжая потреблять топливо.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований по применению энергии электромагнитного поля сверхвысоких частот в процессе плавления базальтового сырья.

Выбор предлагаемого способа нагрева базальта обоснован рядом преимуществ использования СВЧ-энергии в качестве источника тепла перед способами, используемыми для этих целей сжигание различных видов топлива: равномерность прогрева значительных толщин материала вне зависимости от его теплопроводности, высокий коэффициент преобразования СВЧ-энергии в тепловую энергию (до 100 %), безынерционность, экологическая чистота процесса и ряд других.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальным исследованиям подвергся образец кондопожского базальта массой около 700 г при объёме в 400 см³. Образец нагревался в СВЧ-камере, питаемой одним источником СВЧ мощностью 600 Вт. С целью снижения теплоотдачи в окружающее пространство образец помещался в теплоизоляционную оболочку из радиопрозрачного материала с низкой теплопроводностью. Измерение температуры образца базальта проводилось термопарным датчиком до температуры 500 °С. После проведения последнего измерения образец базальта был помещён в камеру, где подвергся непрерывному нагреву до появления видимого, даже сквозь теплоизолятор, яркого свечения. Это время нагрева составило 20 мин. После этого образец был извлечён из камеры и освобождён от покрывавшего его теплоизолятора. Затем образец был разделен на две части по образовавшейся трещине, как это показано на рис. 1.

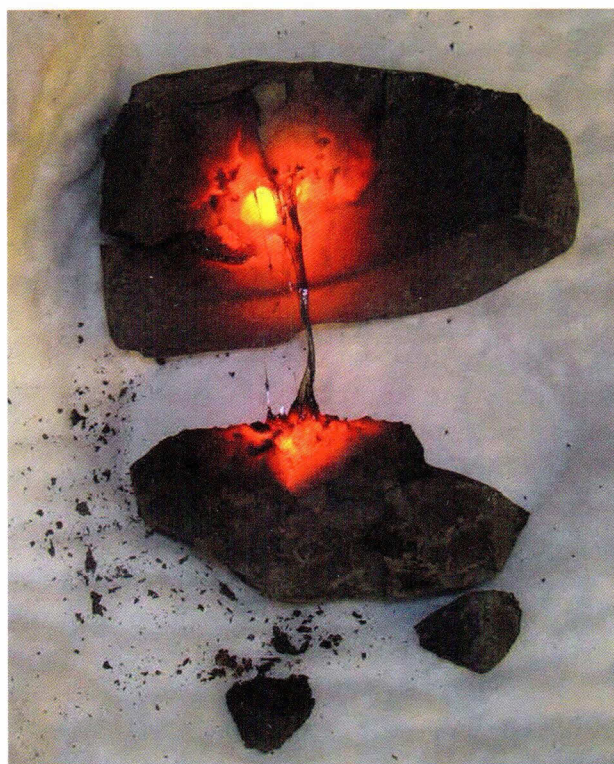


Рис. 1. Образец базальта после нагрева в СВЧ-камере

Образовавшаяся глубокая трещина, разделившая образец базальта на две части, явилась следствием сильного теплового расширения внутренней области образца по отношению к внешней области, что наглядно демонстрирует именно объёмный характер нагрева при СВЧ-термообработке.

После разделения двух частей расплавленная внутренняя область образца вытянулась в стекловидные нити разной толщины, что свидетельствует о достижении необходимой для этого температуры. Принимая во внимание текучесть расплава и его яркое свечение в первый момент времени после разделения, температуру внутренней области можно оценить приблизительно в $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты проведённых экспериментальных исследований в виде зависимости температуры нагрева от времени воздействия СВЧ-мощности графически представлены на рис. 2.

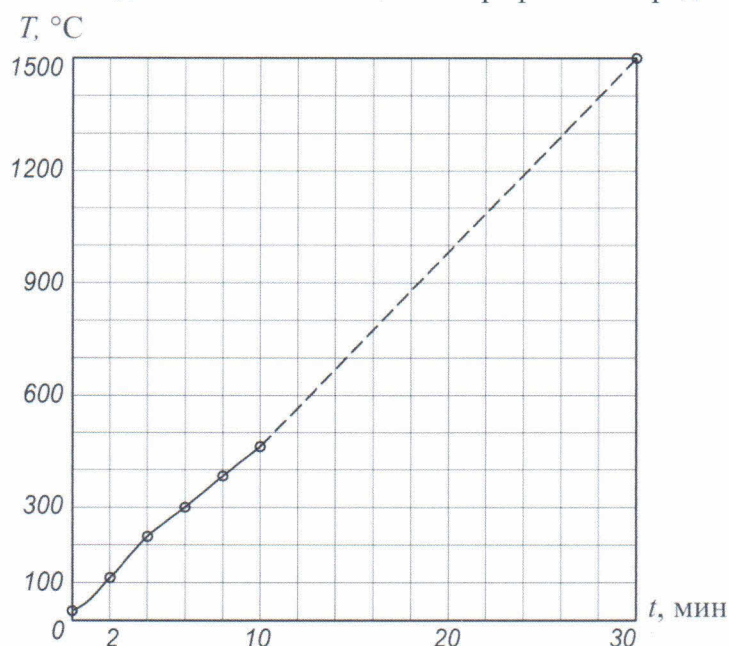


Рис. 2. Зависимость роста температуры внутри образца базальта от времени нагрева в СВЧ-камере

Сплошная линия, проведённая через экспериментально полученные точки, практически совпадает по своему характеру с экстраполированным участком, изображённым пунктиром. Общий вид графика демонстрирует практически линейную зависимость роста температуры внутри образца со временем нагрева в СВЧ-камере.

Кроме того, полученные данные (масса и объём образца, время нагрева до конечной температуры, мощность источника СВЧ камеры) позволили оценить энергетические затраты, приведённые как к объёму нагреваемого материала, которые составили $1,5\text{ МВт/м}^3$, так и к массе нагреваемого материала, которые составили $0,8\text{ (кВт}\cdot\text{ч)/кг}$.

Следует отметить, что лучшие зарубежные индукционные установки плавления базальта имеют средние энергетические затраты $2,2\text{ (кВт}\cdot\text{ч)/кг}$, а электродуговые печи – $7,08\text{ (кВт}\cdot\text{ч)/кг}$. Таким образом, энергетические затраты при микроволновых технологиях в несколько раз меньше, чем в традиционных технологиях плавления базальта.

Обобщая полученные данные измерений в ходе проведения экспериментальных исследований, можно вполне обоснованно сделать заключение о практической перспективе применения СВЧ-энергии в технологии плавления базальта. Предлагаемая технология плавления базальта будет обладать по сравнению с традиционно используемыми сегодня технологиями несомненными преимуществами: быстрый запуск процесса плавления; отсутствие сгораемого топлива и, как следствие, резкое снижение вредных выбросов в атмосферу; возможность плавления практически любых фракций базальтового щебня, от сопутствующих до свыше 150 мм ; возможность получения очень высокой температуры для обеспечения нужной

текучести расплава; выгодные энергетические характеристики, обусловленные "адресным" характером СВЧ-нагрева; отсутствие транспортов для топлива (к примеру, трубопроводов для газа) и затрат на их обслуживание и т. д.

Однако для реализации такого процесса на практике необходимо соответствующее метрологическое обеспечение, позволяющее контролировать температуру расплава в реальном времени. Используемые для этого при традиционном способе плавления термопары малоприменимы в случае СВЧ-нагрева. Наиболее удачным решением в этом случае могут стать пирометры, имеющие необходимый диапазон измеряемых температур. Конструктивно пирометр может быть размещён около открытого окошка на верхней стенке плавильной камеры, над расплавом. При этом для предотвращения возможных утечек СВЧ-мощности в окружающее пространство окошко может быть выполнено в виде запердельного волновода, имеющего форму трубы круглого сечения. Длина трубки и её внутренний диаметр рассчитываются исходя из требуемого затухания для СВЧ-волны и показателя визирования пирометра.

Существующий технологический процесс производства базальтового картона включает в себя формование полотна картона из базальтовых волокон, пропитку сформованного полотна связующим веществом с помощью водной эмульсии и последующее удаление влаги из полотна. Сушка базальтового картона традиционно производится потоком горячих газов, получаемых от газовой горелки высокой производительности. Такой способ сушки, приемлемый для толщины картона в пределах 4...6 мм, оказался совершенно неприменим для сушки толщин от 15 мм и выше. В связи с этим был предложен способ сушки базальтового картона с использованием СВЧ-энергии.

Экспериментальные исследования по удалению влаги из базальтового картона, пропитанного водной эмульсией связующего вещества, проводились на образцах картона размерами 140×140 мм и толщиной 24 мм. Каждый из образцов был набран из шести отдельных листов картона толщиной 4 мм каждый. В среднем начальная масса каждого из образцов составляла немногим более 500 г, масса после сушки – около одной-двух десятых от начальной массы образца.

Экспериментальные испытания проводились на камерной СВЧ-установке лучевого типа мощностью 540 Вт при частоте колебаний электромагнитного поля 2450 МГц. Для равномерности нагрева образца использовался вращающийся стол с расположенной на нём подставкой из радиопрозрачного диэлектрика. Высота подставки выбиралась исходя из условия расположения нагреваемого материала напротив излучающего волновода камеры. Схематично установка представлена на рис. 3.

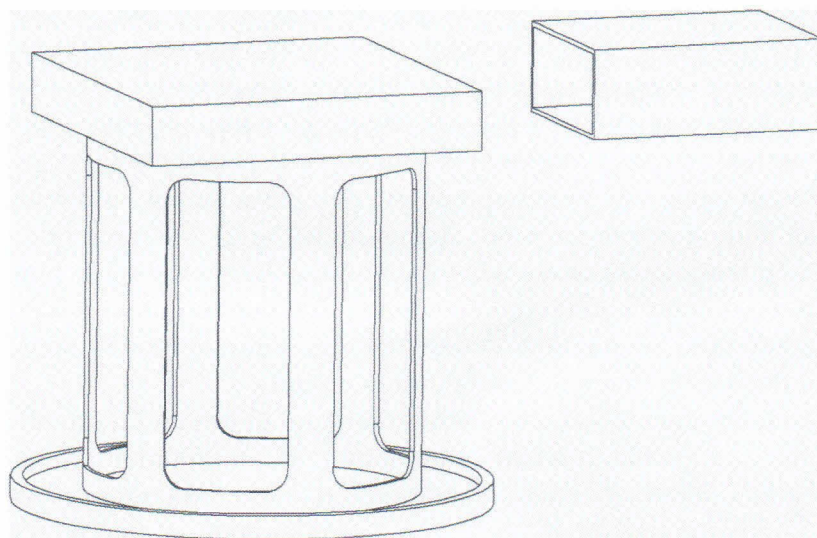


Рис. 3. Схема установки для экспериментального исследования процесса СВЧ-сушки базальтового теплоизолятора

Во время проведения эксперимента через равные промежутки времени фиксировались следующие параметры: масса образца, температура внутри и на поверхности образца. В связи с малым отклонением температуры от точки к точке на поверхности картона, в расчёт принималась температура в центре площади образца.

Следует отметить, что исследованиям подвергались образцы, пропитанные различными связующими веществами – на основе ПВА и глины.

На рис. 4 представлены результаты измерений для образца базальтового картона, пропитанного эмульсией связующего вещества на основе ПВА.

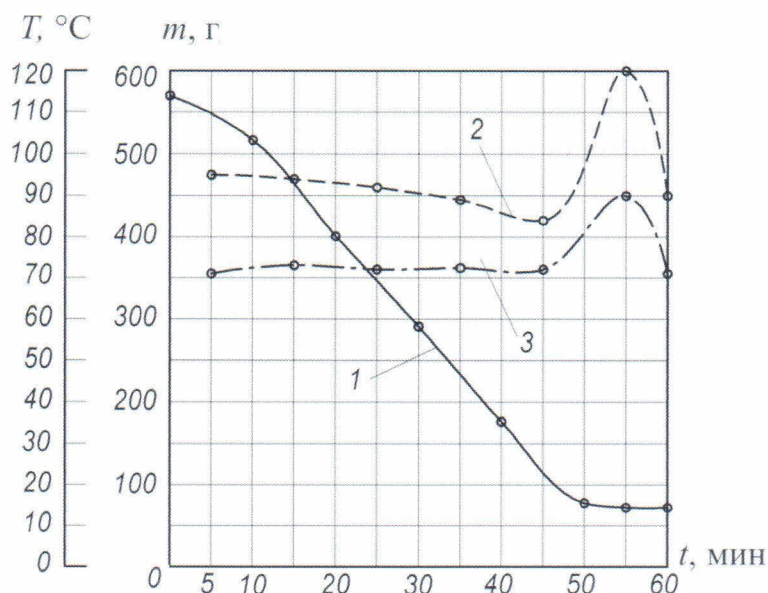


Рис. 4. Экспериментальные зависимости изменения температуры и массы образца от времени нагрева (связующее вещество – ПВА):

1 – кривая изменения массы; 2 – кривая температуры в объёме образца;
3 – кривая температуры на поверхности образца

Как видно из полученных графиков, образец картона полностью высушен за 55 мин, при этом он изменил свою массу с начальных 570 г до конечных 68 г. Поведение температуры образца до 45-й минуты нагрева приблизительно линейное, и её небольшой спад можно объяснить постепенным выходом воды из объёма, то есть снижением количества основного поглотителя СВЧ-энергии в мокром картоне, как раз ответственного за преобразование энергии СВЧ в тепло. Однако при практически полном обезвоживании образца можно предположить, что основным объектом нагрева становится именно связующее вещество картона, так как сами волокна базальта являются радиопрозрачными. Этим можно объяснить резкий скачок температуры после 50-й минуты нагрева. Дальнейший спад температуры материала может быть связан с преобразованиями связующего вещества, после которых оно перестаёт поглощать СВЧ-энергию.

На рис. 5 представлены результаты измерений для образца базальтового картона, пропитанного эмульсией связующего вещества на основе глины.

Полученные графики показывают изменение массы образца с 510 до 50 г за 40 мин. В отличие от предыдущего образца, поведение температуры в данном случае имеет отличный характер, что, очевидно, объясняется присутствием другого связующего вещества, а именно: на основе глины. Этим же можно объяснить и преобладание высокой температуры на поверхности картона по сравнению с температурой внутри объёма после получаса нагрева, то есть после почти полного ухода влаги из образца. Перераспределение максимальной темпе-

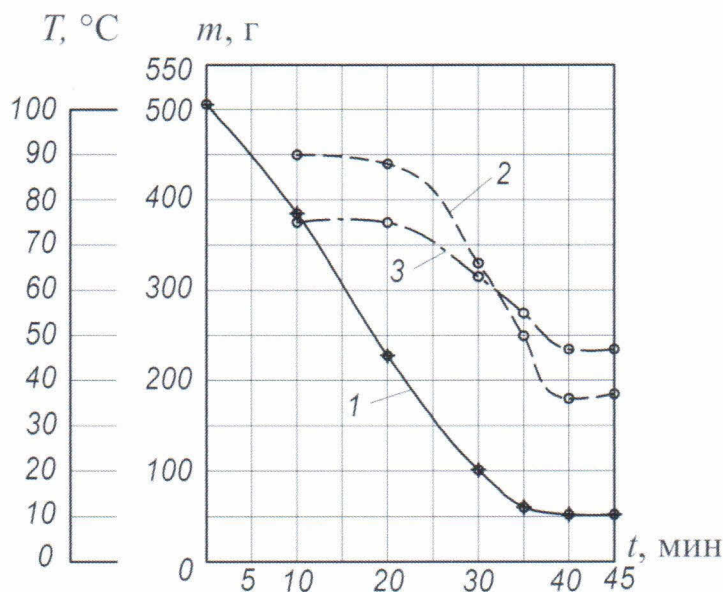


Рис. 5. Экспериментальные зависимости изменения температуры и массы образца от времени нагрева (связующее вещество – глина):

1 – кривая изменения массы; 2 – кривая температуры в объёме образца;

3 – кривая температуры на поверхности образца

ратуры из объёма на поверхность образца предположительно связано с преимущественным поглощением СВЧ-энергии приповерхностным слоем картона, пропитанного глиной. Скорее всего, это происходит из-за того, что поток СВЧ-энергии сначала встречает на своём пути именно поверхность образца, а уж затем в ослабленном виде проникает в объём. Обеднение образца водой, охлаждавшей поверхность при своём испарении, как раз и могло проявить такую ситуацию.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментальных исследований позволяют сделать заключение о практической перспективе применения СВЧ-энергии в технологии плавления базальта.

Серия проведённых экспериментов показала довольно высокую эффективность процесса сушки базальтового картона с применением нагрева в полях СВЧ. Кроме того, показана возможность сушки толстых образцов картона, что недостижимо при традиционной технологии с использованием горячих газов и воздуха. Однако в ходе проведения исследований было установлено, что скорость потока воздуха, обдувавшего поверхность высушиваемого образца, была явно недостаточной для наиболее эффективного отвода испаряющейся с поверхности воды.

Таким образом, существует возможность существенного улучшения показателей сушки, в частности сокращения времени обработки, что приведёт и к снижению энергетических затрат.

Исследование осуществлено в рамках Программы «Научный фонд НИУ ВШЭ» в 2013 – 2014 гг., проект № 12-01-0136.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уваров, А. С. Негорючий экологически чистый базальтоволокнистый утеплитель / А. С. Уваров // Строительные материалы. – 1997. – № 4. – С. 26–27.
2. Базальтовая вата: история и современность (сборник материалов). – Пермь, 2003. – 124 с.
3. Мамонтов, А. В. Микроволновые технологии / А. В. Мамонтов, И. В. Назаров, В. Н. Нефедов, Т. А. Потапова. – М.: ГНУ «НИИ ПМТ», 2008. – 308 с.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

«СВЧ-ТЕХНИКА»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Подписано к печати

08.11.2013 г.

Заказ № 293

Усл. п. л. 29,5

Уч.-изд. л. 30,0

Индекс 36292

Формат 60×88^{1/8}

Тираж 500 экз.

43 статьи

ФГУП «НПП «Исток» 141190, г.Фрязино, Московская обл., ул.Вокзальная, 2а

Тел.: (495) 465-86-12. Факс: (495) 465-86-12

E-mail: istok-info@flexuser.ru; istokstebunov@mail.ru; info@istokmw.ru; stebunov@istokmw.ru