

УДК 678.6

А.А. Беляев¹, Е.Е. Беспалова¹**ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ СУШКИ ВОЛОКНИСТЫХ ПЕНОМАТЕРИАЛОВ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-8-8

Развитие технического прогресса в авиационно-космической, транспортной, энергетической и других отраслях промышленности неразрывно связано с созданием новых материалов и совершенствованием традиционных [1–4]. Широкое применение радиотехнических и электротехнических средств определяет потребность в разработке радиопоглощающих материалов (РПМ) с заданными техническими характеристиками.

Представлены результаты обработки технологических режимов сушки волокнистых пеноматериалов, применяемых для изготовления широкополосных радиопоглощающих материалов. Показано влияние режимов термообработки для получения стабильных и однородных волокнистых материалов.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 15.3. «Материалы и покрытия для защиты от ЭМИ, ударных, вибрационных, акустических и электрических воздействий» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: радиопоглощающий материал, пеноматериал, неорганические волокна, электромагнитная волна, электромагнитное излучение.

Development of technical progress in aerospace, transport, power and other industries is inseparably linked with creation of new and improvement traditional materials [1–4]. Broad application of radio engineering and electrotechnical means defines need for development of radio absorbing materials (RAM) with the set technical characteristics.

In this article results of working off of technological modes of drying fibrous foam materials, broadband radio absorbing materials applied to manufacturing are provided. Influence of modes of heat treatment for receiving stable and uniform fibrous materials is shown.

Work is executed within implementation of the complex scientific direction 15.3. «Materials and coverings for protection against EMR, shock, vibrating, acoustic and electric influences» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: radio absorbing material, foam material, inorganic fibers, electromagnetic wave, electromagnetic radiation.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Основным требованием для создания радиопоглощающих материалов (РПМ), эффективных в широком диапазоне длин волн и в широком секторе углов падения электромагнитной волны, например материалов для безэховых камер, является малый уровень отражения падающих радиоволн от передней стенки материала. Для решения этой задачи можно применить два варианта: создание градиентной структуры материала с плавным переходом диэлектрической проницаемости по толщине материала, т. е. внешние слои структуры должны быть практически радиопрозрачными, а последующие слои по мере удаления должны иметь нарастающий потенциал поглощения; либо

создание материала с объемными поверхностными структурами (ребра, конусы, пирамиды) – где будет реализовываться принцип усреднения проницаемости среды между объемными структурами материала и воздушными зазорами. Кроме того, при создании РПМ с объемными поверхностными структурами электромагнитная волна многократно переотражается в пространстве между этими структурами и постепенно затухает [5–8]. Объемные РПМ работают в широком частотном диапазоне – от миллиметровых до дециметровых волн. Коэффициент отражения материала с объемными поверхностными структурами возрастает с увеличением длины волны, поэтому для получения низкого коэффициента отражения порядка -50 дБ высота структур (например, конусов и пирамид) должна быть не менее $(7...10)\lambda$.

Для достижения малого значения коэффициента отражения в широком секторе углов падения радиоволн на материал (от 0 до 75 град), в достаточно широком диапазоне длин волн рассмотрен вариант создания немагнитного радиопоглощающего материала градиентного типа – многослойной структуры с заданным изменением диэлектрической проницаемости в толще материала. Регулировать диэлектрическую проницаемость материала можно различными способами: меняя концентрацию электропроводящего наполнителя, плотность, вводя регулярные структуры и др. Поверхностные слои многослойной структуры материала должны иметь согласованный со свободным пространством вход, т. е. относительная диэлектрическая проницаемость РПМ на входе должна быть близкой окружающей среде – например, воздуху. Плотность таких РПМ вблизи его поверхности должна быть небольшой (желательно не более 100 кг/м^3), а содержание радиопоглощающего наполнителя в поверхностных слоях незначительным и по мере удаления от входа структуры возрастать. Плотность материала и концентрация поглотителя возрастают в направлении от входной плоскости РПМ для того, чтобы проникающие в него радиоволны поглощались с минимальными отражениями внутри материала. Закон распределения количества наполнителя можно оптимизировать с помощью специально разработанных программ оптимизации многослойных структур. Описанная структура способствует минимальному отражению радиоволн от поверхности и увеличению их поглощения по мере проникновения вглубь материала [9–18]. При проведении оптимизации находят параметры, при которых коэффициенты отражения многослойной структуры РПМ будут минимальны.

Материалы и методы

Пеноматериалы на основе неорганических волокон получают из сырьевой смеси, включающей штапельное волокно, тонкомолотый неорганический наполнитель, смачиватель, гидрофобизирующий компонент, связующий компонент и жидкую дисперсионную среду (обычно, это вода). В качестве волокнистого материала можно использовать асбест (или смесь асбеста и кремнеземного волокна), базальтовое волокно (или базальтовое волокно и полиарамидное волокно), диспергированные до получения волокон диаметром не более $0,01 \text{ мкм}$ и длиной менее 2 мм . В качестве тонкомолотого наполнителя используют графит, волластонит или слюду (в виде чешуек размером менее 5 мкм). Выбирая технологию формования волокнистого материала (прессование, вакуумное формование, вспенивание и др.), можно регулировать плотность материала и другие характеристики.

В качестве матрицы для создания РПМ особый интерес представляют теплозащитные и теплоизоляционные материалы. В своем большинстве такие материалы имеют низкие диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь.

Для решения задачи создания гибкого РПМ из неорганических волокон в виде листового материала можно рассматривать формы типа войлока. Такой материал может удовлетворить требованиям заполнения больших объемов при малой массе. Войлоки

могут быть изготовлены путем наслаивания штапельного волокна в мат и его уплотнения. Штапельные волокна, используемые для изготовления войлока – термостойкие неорганические волокна, такие как стеклянные или керамические. При операции наслаивания штапельные волокна беспорядочно ориентируются, а при уплотнении взаимосвязываются в листовую форму, имеющую две главные поверхности. Эти войлоки используют в качестве теплозащиты, однако у них есть и другое применение – например, высокотемпературные фильтры, подложки катализаторов и др.

Использование определенных видов волокнистых наполнителей позволяет частично или полностью отказаться от применения органических связующих компонентов, что дает предпосылки для создания пожаробезопасных материалов [16, 19, 20]. Например, для получения волокнистых материалов на основе оксидных волокон мат приобретает жесткость при образовании керамических мостиков между волокнами в процессе термообработки [21].

Волокна асбеста и некоторые производные целлюлозы, благодаря особому строению структуры (не гладкий цилиндр, а разветвленная структура), после набухания в водной среде фибриллируют, что позволяет волокнам сцепляться друг с другом без органического связующего.

Радиотехнические характеристики (коэффициент отражения в диапазоне частот) многослойной градиентной структуры существенно зависят от общей толщины материала, числа слоев, толщины отдельных слоев, характеристик радиопоглощающего наполнителя. Наполнитель характеризуется геометрической формой и электродинамическими характеристиками (для резистивного волокна – диаметр, длина и удельное сопротивление) [19, 22–24].

Для изготовления панелей РПМ на основе неорганических волокон рассмотрена возможность применения «бумажной» технологии. Особенностью способов изготовления бумагоподобных композитов из минеральных волокон является специальное оборудование; бумагоделательные машины и их аппаратное оформление определяются свойствами и размерами самих волокон. Необходимы гидроразбиватели и бассейны с мешалками специальной конструкции, специальные бумагоделательные машины с сеточным полотном и сушильной частью.

Самый распространенный способ сушки «бумажного» полотна – контактная сушка на бумагосушильных цилиндрах. Этот способ является относительно дорогостоящим, а сушильная часть современной бумагоделательной машины занимает много места, потребляет много электроэнергии и требует сравнительно больших капитальных затрат. Тем не менее существующий способ сушки бумагоподобных композитов остается наиболее эффективным по сравнению с другими известными способами сушки материалов.

Для сокращения размеров сушильной части бумагоделательной машины используют метод сушки под вакуумом. Иногда применяют сушку лучистым теплом (радиационную сушку). Этот способ используют для сушки тонких покровных слоев на материале, лака и других покрытий.

Сушка в поле высокой частоты также обладает рядом существенных недостатков: высокая стоимость и большая потребляемая мощность генератора.

Достаточно эффективным и производительным способом является тепломеханический способ сушки материала продуванием его насквозь горячим воздухом. Этот способ наиболее подходит для композиционных материалов с открытой пористостью, но недопустим в случаях подвижности и уноса мелких фракций наполнителя.

На скорость сушки бумагоподобных композитов оказывают влияние также их структура и состав. Тонкие материалы сохнут быстрее, чем толстые. Наблюдения показали, что с увеличением толщины полотна (с 30 до 50 мм) при прочих равных условиях

скорость сушки замедляется на 20–50%. На качество сушки также существенно влияет степень гомогенизации и образование ячеистой структуры материала.

Для изготовления РПМ на основе минеральных волокон по «бумажной» технологии, в ВИАМ организован производственный участок с производительностью до 2000 м²/год. На участке реализуется вся технологическая цепочка изготовления РПМ: от изготовления радиопоглощающих компонентов до выпуска готового материала с контролем радиотехнических параметров.

Изготовление волокнистых композиционных материалов с радиотехническими свойствами начинают с приготовления волокнистой пульпы в водной среде, в качестве связующего вещества выбирают водорастворимые полимерные связующие. На последних стадиях перемешивания вводят науглероженное волокно.

Процесс подготовки пульпы состоит из дробления минерального волокна и смешивания его с водой. Оборудование, необходимое на данном этапе: роторные дробилки (до 3000 об/мин), мельницы или роллы, в зависимости от вида волокна и упаковки. Волокно, которое поступает в виде листов и матов, вручную нарезают на куски, которые помещаются в приемную воронку дробилки.

От массы навески волокна зависит плотность получаемых плит. Плотность плит можно варьировать (например, для пеноматериала на основе хризотилового асбеста можно задать плотность от 20 до 40 кг/м³).

Процесс вспенивания ведут при комнатной температуре, скорость вращения шнека регулируют.

Подготовленная в пеногенераторе (миксере) масса поступает на конвейерную сетку, где ровняется поверхность и задается толщина материала.

Общая влага в композиции, поступающей на сушку, делится на внешнюю влагу, находящуюся в пространствах между волокнами и на их поверхности; внутреннюю свободную влагу, находящуюся в полостях волокнистых клеток, и связанную влагу, заключенную в стенке волокна. Около 90–98% от общего количества воды обычно удаляется в первой части конвейера самосливом, в зоне сушки – приблизительно 2–10%. После слива основной массы воды, композиция поступает в зону сушки. Сушильная камера разбита на шесть температурных зон, обеспечивающих поддержание температуры – от 30±5 до 150±5°С. Скорость продвижения пеномассы в зоне сушки выбирают исходя из условия, что на выходе должна получаться полностью обезвоженная равномерно просушенная пеномасса.

В начале процесса сушки из-за испарения влаги с поверхности создается разность концентраций между поверхностным и следующим за ним слоем. Вследствие этого возникает диффузия влаги из толщи материала к его поверхности. Этот процесс носит название внутренней диффузии влаги в отличие от внешней диффузии влаги – процесса, при котором влага перемещается с поверхности материала в окружающую среду. В первом периоде процесса сушки убыль влаги с наружной поверхности пеномассы компенсируется внутренней диффузией. Таким образом, на всем протяжении первого периода наружная поверхность пеномассы остается водонасыщенной и поэтому в условиях сушки при постоянной температуре сушка осуществляется с постоянной скоростью. На следующих стадиях сушки из-за недостатка воды в пеномассе внутренняя диффузия не может уже восполнить убыль влаги на наружной поверхности высушиваемого материала. Эта поверхность перестает быть водонасыщенной, и скорость сушки замедляется.

С началом удаления связанной влаги происходят уже необратимые изменения свойств волокон. При этом следует иметь в виду, что сушка пеномассы носит

гетерогенный характер: в то время как поверхностный ее слой уже высушен, внутренние слои могут при этом содержать еще свободную влагу. Эта гетерогенность выражается тем ярче, чем толще пеномасса. Неравномерность сушки волокнистой пеномассы приводит к короблению, образованию раковин, неравномерной усадке, потере товарного вида панелей.

Окончательная термообработка материала происходит в камере обжига с температурой от 140 до 280°C (при наличии не менее четырех зон) с градацией через 10°C и точностью поддержания температуры $\pm 5^\circ\text{C}$.

Для выбора режимов сушки проведены практические работы по исследованию зависимости остаточного содержания влаги от температуры и продолжительности сушки (табл. 1–5).

Таблица 1

Сушка двух образцов при температуре 50°C

Время сушки	Масса образца 1 толщиной 100 мм, г	Масса образца 2 толщиной 34 мм, г
0:00	219,1	123,7
0:30	194,7	98,2
1:00	169,7	75,7
2:00	128,6	44,1
2:30	112,9	34,4
3:00	102,3	28,3
4:05	79,7	16,9
4:43	68,9	14,2
5:05	63,4	14,0
5:30	56,4	13,8
6:30	45,1	13,7
10:30	27,6	16,4
12:30	25,1	15,8

При температуре 50°C остаточная влага приходит в равновесие после 4 ч сушки – для образца с толщиной 34 мм и 10–12 ч – для образца с толщиной 100 мм (см. рисунок, а).

Таблица 2

Сушка двух образцов при температуре 70°C

Время сушки	Масса образца 1 толщиной 80 мм, г	Масса образца 2 толщиной 32 мм, г
0:00	256,9	145,4
0:35	205,9	102,2
1:00	176,8	75,1
1:30	152,7	53,2
2:00	123,1	33,8
2:30	108	25,4
3:00	93,3	18,7
4:00	66,5	15,4
4:30	58,1	15
5:15	46,8	14,5
5:35	42,4	14,3
6:15	35,1	13,9
6:45	30,9	13,8
7:15	27,1	13,5
8:15	22,5	13,1
9:35	21,8	12,8

При температуре 70°C остаточная влага приходит в равновесие после 4 ч сушки – для образца с толщиной 32 мм и 9–10 ч – для образца с толщиной 100 мм (см. рисунок, б).

Таблица 3

Сушка двух образцов при температуре 90°C

Время сушки	Масса образца 1 толщиной 80 мм, г	Масса образца 2 толщиной 30 мм, г
0:00	219,2	111,3
0:30	168,7	64,9
1:00	140,6	42,7
1:50	99,5	19,1
2:30	75,1	13,8
3:00	65,1	13,3
4:10	40,5	12,6
5:00	30,6	12,3
8:00	22,8	11,5
10:15	22,2	11,1
11:00	22,1	11,1

При температуре 90°C остаточная влага приходит в равновесие через 2,5 ч сушки – для образца с толщиной 30 мм и 8 ч – для образца с толщиной 80 мм (см. рисунок, в).

Таблица 4

Сушка двух образцов при температуре 110°C

Время сушки	Масса образца 1 толщиной 90 мм, г	Масса образца 2 толщиной 32 мм, г
0:00	236,7	115,8
0:25	195,5	82,8
0:40	172,5	60,3
0:55	153,0	44,3
1:10	130,3	29,6
1:25	115,0	21,4
1:40	98,9	15,3
1:55	89,8	14,1
2:10	79,5	13,9
2:40	59,1	13,4
3:10	41,6	13,0
3:40	32,2	12,9
4:15	26,7	12,6
4:45	26,6	12,5
5:10	26,1	12,4
5:40	25,8	12,3
6:10	25,7	12,2
6:40	25,6	12,1

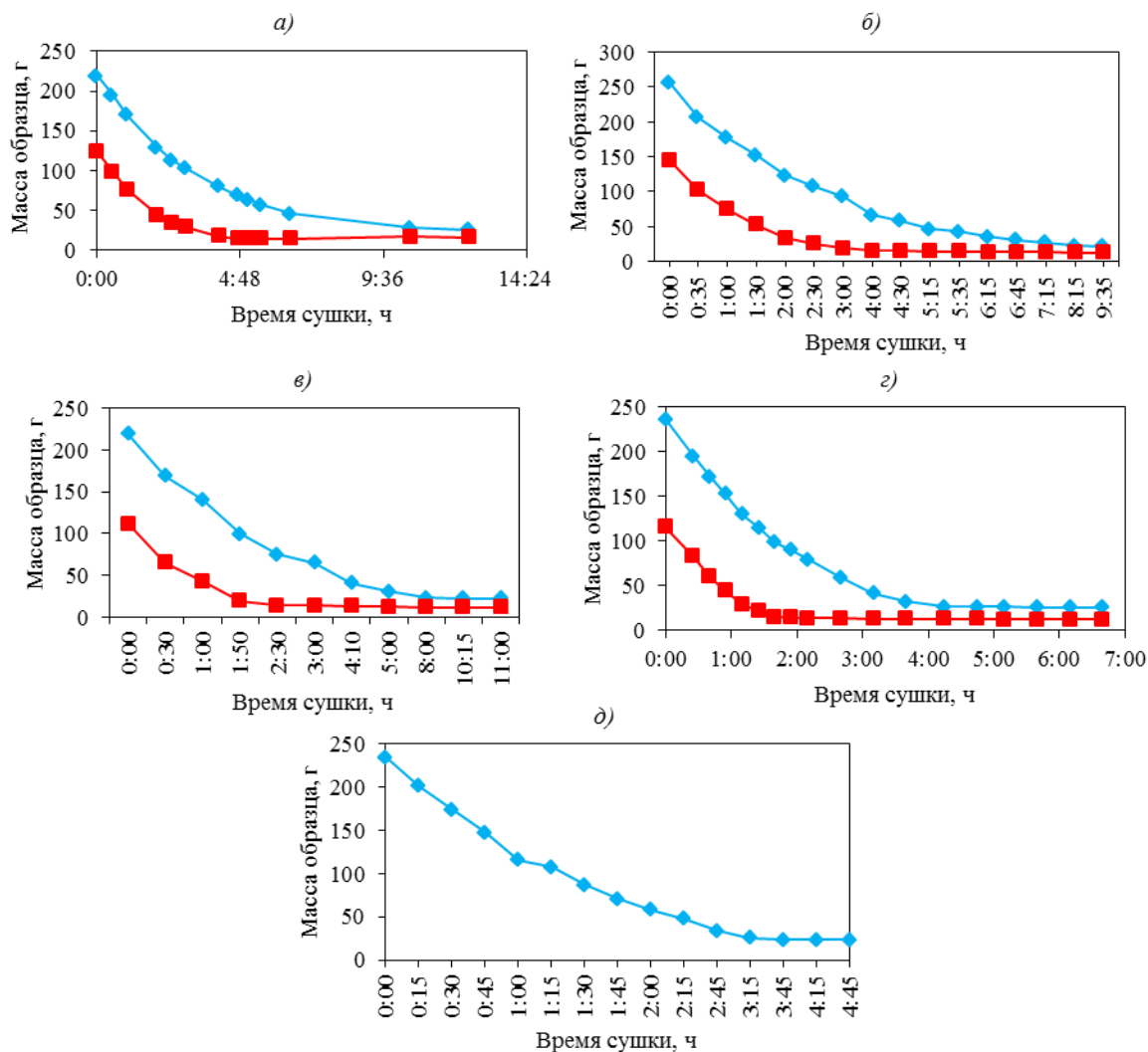
При температуре 110°C остаточная влага приходит в равновесие после 2 ч сушки – для образца с толщиной 32 мм и 4 ч – для образца с толщиной 90 мм (см. рисунок, г).

Таблица 5

Сушка образца при температуре 130°C

Время сушки	Масса образца толщиной 90 мм, г
0:00	235,10
0:15	201,21
0:30	174,00
0:45	147,90
1:00	115,60
1:15	108,06
1:30	87,27
1:45	70,54
2:00	58,57
2:15	48,00
2:45	33,66
3:15	25,88
3:45	23,87
4:15	23,57
4:45	23,36

При температуре 130°C остаточная влага приходит в равновесие после 3,5 ч сушки – для образца с толщиной 90 мм (см. рисунок, *д*).



Зависимости остаточного содержания влаги от времени сушки при температурах 50 (*а*), 70 (*б*), 90 (*в*), 110 (*г*) и 130°C (*д*) для образцов 1 (♦) и 2 (■)

При температуре сушки 90°C и более, вследствие неравномерного прогрева наружных и внутренних слоев материала, наблюдалась неоднородность уплотнения волокна по толщине материала: образование корки, пузырей и раковин.

На основе проведенных исследований установлено, что при данном способе сушки пеноматериала оптимальные толщины волокнистых панелей составляют от 20 до 50 мм, режим сушки – ступенчатый подъем температуры от 30±5 до 150±5°C.

Раскрой готового материала на плиты заданного размера проводят циркулярными пилами продольного и поперечного направления. Продольной пилой отрезается кромка, поперечной – материал нарезается на плиты определенного размера.

Полученный материал легко обрабатывается практически любым режущим инструментом, пропитывается связующим, формируется и т. д. Для получения градиентной структуры РПМ плиты пеноматериала с различным содержанием электропроводящего наполнителя склеиваются между собой. Слои плит склеивают между собой клеем ПВА.

В зависимости от требуемых радиотехнических характеристик и требований по пожаробезопасности поверхность волокнистых пеноматериалов для упрочнения и предохранения от деформации можно покрывать водоразбавляемой эмалью, например ВЭ-67 или другой аналогичной радиопрозрачной эмалью.

К преимуществам данных материалов относится низкая плотность, соответственно низкие диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь, низкая теплопроводность, стойкость к окислению, возможность использования для защиты поверхности сложной конфигурации.

Результаты

В рамках оптимизации технологического процесса изготовления пеноматериала для РПМ и для улучшения пенообразования проведены мероприятия по настройке системы подготовки воды, настройке шнеков в пеногенераторах в пользу уменьшения количества лопастей и увеличения количества режущих поверхностей шнека. Выбраны параметры вспенивания пульпы (скорость вращения двигателя) и температурные режимы сушки (от 60 до 120°C – в основной камере сушки и от 140 до 200°C – в камере обжига).

Установлено, что регулярные радиотехнические свойства панелей достигаются при скорости конвейера не более 12 м/ч и толщинах панелей от 20 до 50 мм; при толщине >50 мм происходит неравномерная сушка панели, приводящая к ее короблению.

По результатам опробованных температурных режимов сушки панелей выбран режим, обеспечивающий отсутствие образования корочки на панелях.

Обсуждение и заключения

Примеры успешного применения композиционных пеноматериалов на основе минеральных волокон можно найти в самых различных областях науки и техники – это авиакосмическая техника, двигатели различного назначения, биотехнология, медицина, строительство и многое другое. Подобные материалы могут совмещать сразу несколько функциональных нагрузок: отвечать требованиям по теплозащите, радио-, шумопоглощению и др.

Организованный в филиале ФГУП «ВИАМ» участок по изготовлению и контролю РПМ на основе пеноматериала из неорганических волокон позволяет выпускать широкий ассортимент материалов специального назначения. Успешность реализации данного проекта подтверждается крупными договорами поставки материала (более 1800 м³ волокнистого пеноматериала).

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
3. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
4. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия–Буран» / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука и жизнь, 2013. 128 с.
5. Бибиков С.Б., Прокофьев М.В., Куликовский К.Э., Журавлев В.А. Разработка материалов и покрытий, используемых для проведения радиотехнических испытаний и обеспечения электромагнитной совместимости // Вопросы оборонной техники. Сер.: Технические средства противодействия терроризму. 2013. №5–6. С. 56–64.

6. Бибииков С.Б., Титов А.Н., Черепанов А.К. Синтез материала с заданным коэффициентом отражения в широком диапазоне частот и углов падения // Сб. трудов XV Междунар. науч.-технич. конф. «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 2009. С. 1578–1584.
7. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2014. 664 с.
8. Латыпова А.Ф., Калинин Ю.Е. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов // Вестник Воронежского гос. тех. ун-та. 2012. Т. 8. №6. С. 70–76.
9. Беляев А.А., Кондрашов С.В., Лепешкин В.В., Романов А.М. Радиопоглощающие материалы // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 348–352.
10. Беляев А.А., Беспалова Е.Е., Романов А.М. Пожаробезопасные радиопоглощающие материалы для безэховых камер // Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 53–55.
11. Лушина М.В., Паршин С.Г., Ржевский А.А. Современные экранирующие и радиопоглощающие материалы // Системы управления и обработка информации. 2011. №22. С. 208–223.
12. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: URSS, 2012. С. 163–164.
13. Широков В.В., Романов А.М. Исследование диэлектрических характеристик стеклосотопласта волноводным методом // Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 62–68.
14. Беляев А.А., Агафонова А.С., Антипова Е.А., Ботаногова Е.Д. Конструкционный радиопоглощающий материал трехслойной структуры с согласующим слоем // Труды ВИАМ: электрон. науч. технич. журн. 2013. №7. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.05.2017).
15. Агафонова А.С., Беляев А.А., Кондрашов Э.К., Романов А.М. Особенности формирования монолитных конструкционных радиопоглощающих материалов на основе композитов, наполненных резистивным волокном // Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 56–59.
16. Беспалова Е.Е., Кондрашов Э.К. Особенности корректировки рецептуры пожаробезопасного материала для безэховых камер при изменении параметров радиопоглощающего наполнителя // Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 48–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-48-52.
17. Романов А.М., Беляев А.А., Широков В.В. Особенности оптимизации резонансных радиопоглощающих материалов немагнитного типа // Труды ВИАМ: электрон. науч. технич. журн. 2014. №11. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.05.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-11-5-5.
18. Бибииков С.Б., Засовин Э.А., Черепанов А.К., Хмельник Г.И. Математическое моделирование параметров многослойных радиопоглощающих покрытий // Сб. трудов XV Междунар. науч.-технич. конф. «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 2009. С. 1585–1595.
19. Волков В.П., Зеленецкий А.Н. и др. Получение радиозащитных полимерных материалов с пониженной горючести // Пластические массы. 2008. №6. С. 42–46.
20. Дьяченко П.Б., Рыбалко В.П., Никитюк А.И., Писаренко Е.И., Киреев В.В. Пожаробезопасные термостойкие полимерные композиционные материалы с пониженной плотностью // Успехи в химии и химической технологии. Т. XXV. 2011. №2 (118). С. 94–99.
21. Гращенков Д.В., Щетанов Б.В., Тинякова Е.В., Щеглова Т.М. О возможности использования кварцевого волокна в качестве связующего при получении легковесного теплозащитного материала на основе волокон Al_2O_3 // Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 8–14.
22. Мицмахер М.Ю., Торгованов В.А. Безэховые камеры СВЧ. М.: Радио и связь, 1982. 129 с.
23. Маслов М.Ю., Семаков Л.М., Скачков Д.В. Испытательная безэховая камера диапазона 1200 МГц // Телекоммуникации и транспорт. 2009. Спец. вып.: Технологии информационного общества. С. 123–125.
24. Радиопоглощающий материал: пат. 2417491 Рос. Федерация; опубл. 27.04.11.