

**Для цитирования:** Бекренев Н.В., Луков Д.Ю. Ультразвуковой многочастотный генератор для обеспечения ультразвукового формирования композиционных материалов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (4):49-57. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-49-57

**For citation:** Bekrenev N.V., Lukov D. Yu. Ultrasonic multifrequency generator for ensuring ultrasonic formation of composite materials. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44 (4):49-57. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-49-57

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.9.047/048

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-4-49-57

## УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МНОГОЧАСТОТНЫЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Бекренев Н.В.<sup>1</sup>, Луков Д.Ю.<sup>2</sup>**

<sup>1-2</sup>Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,

<sup>1-2</sup>410054, г. Саратов, ул. Политехническая 77, Россия,

<sup>1</sup>e-mail: nikolaj.bekrenev@yandex.ru, <sup>2</sup>e-mail: lukov-d@yandex.ru

**Резюме: Цель.** Целью исследования явилась разработка ультразвукового генератора технологического назначения с широким диапазоном частоты выходного напряжения. **Метод.** Выполнены макетно-экспериментальные работы и разработана функциональная схема многочастотного ультразвукового генератора, реализованная в экспериментальном образце, а также конструкция ультразвуковой пьезокерамической системы, способная работать на двух резонансных частотах 22 и 44 кГц. **Результат.** На основе анализа особенностей структуры современных композиционных материалов и технологий формования изделий из них выявлена целесообразность введения в технологический процесс операции ультразвуковой пропитки, что может обеспечить повышенную равномерность заполнения структуры связующим и однородность физико-механических характеристик. Разработана схема ультразвукового генератора, встраиваемого в технологическое оборудование, обеспечивающая формирование гармонических сигналов с изменяемой в пределах 20-60 кГц частотой и мощностью, регулируемой от 100 до 500 Вт, что позволит реализовать высокоэффективные ультразвуковые технологии обработки материалов с неоднородной формируемой в процессе изготовления изделия структурой. Проведены исследования по параметрической оптимизации преобразователя с учетом конкретных видов нагрузок. Особенностью источника питания генератора является его универсальность с точки зрения диапазонов частот и напряжения, а также требуемых показателей качества генерируемой им энергии. Генератор позволяет программировать опорную частоту с ноутбука и затем осуществлять тонкую ее настройку в резонанс с излучателем с дискретностью 10 Гц непосредственно с панели управления. Встроенный микропроцессор позволяет запоминать введенную с ноутбука опорную частоту. **Вывод.** Применение многочастотных источников ультразвука позволит оптимизировать параметры воздействия при ультразвуковой пропитке армированных волокнами композиционных материалов и их финишной размерной обработке в зависимости от плотности структуры и примененной схемы армирования.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 17-03-00720 «Методология оптимизационного микроконструирования композиционных материалов для объектов сложной формы повышенной динамической прочности, послойно формируемых электротехнологическими методами».

**Ключевые слова:** ультразвук, производительность, пропитка, композиционные материалы, генератор, функциональная схема, резонансный инвертор, программируемая частота

TECHNICAL SCIENCE  
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

ENERGY EFFICIENT DESALINATOR

*Nikolaj V. Bekrenev*<sup>1</sup>, *Dmitriy Yu. Lukov*<sup>2</sup>

<sup>1-2</sup>Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,

<sup>1-2</sup>77 Politehnicheskaya Str., Saratov 410054, Russia,

<sup>1</sup>e-mail: [nikolaj.bekrenev@yandex.ru](mailto:nikolaj.bekrenev@yandex.ru), <sup>2</sup>e-mail: [lukov-d@yandex.ru](mailto:lukov-d@yandex.ru)

**Abstract. Objectives** The aim of the research was the development of an ultrasonic generator of technological design with a wide frequency range of output voltage. **Methods** The prototype works were performed and the functional scheme of the multifrequency ultrasonic generator realised in the experimental sample was developed, as well as the design of an ultrasonic piezoceramic system capable of operating at two resonant frequencies of 22 and 44 kHz. **Results** Based on the feature analysis of the modern composite material structure and technologies for moulding products, it was found to be expedient to introduce ultrasonic impregnation into the technological process, which can ensure increased uniformity in filling the structure with a binder as well as greater homogeneity of physico-mechanical characteristics. A schema for the ultrasonic generator built into the technological equipment is developed, providing the formation of harmonic signals with a frequency alternating from 20 to 60 kHz, and power adjustable from 100 to 500 W, which will allow the implementation of high-performance ultrasonic technologies for processing materials with a heterogeneous structure formed during the manufacturing process. The studies were carried out according to parametric optimisation of the converter taking into account the specific load types. A special feature of the generator's power supply is its versatility in terms of frequency and voltage ranges, as well as the required quality indicators of the energy generated. The generator allows the reference frequency to be programmed using a laptop and then fine-tuned from the control panel in resonance with the radiator with a resolution of 10 Hz directly. The built-in microprocessor allows the reference frequency entered from the laptop to be stored in the memory. **Conclusion** The use of multifrequency ultrasonic sources allows the acting parameters to be optimised for ultrasonic impregnation of fibre-reinforced composite materials as well as their finishing dimensional processing, depending on the density of the structure and the reinforcement scheme used.

**Acknowledgment** The research was supported by RFBR grant No. 17-03-00720 «Methodology of optimising microconstruction of composite materials for complex shape objects with increased dynamic strength, formed layer-by-layer by electrotechnological methods».

**Keywords:** ultrasonic, performance, impregnation, composite materials, generator, functional scheme, resonant inverter, programmed frequency

**Введение.** Разработка и внедрение перспективных транспортных систем, в частности летательных аппаратов, требуют опережающего создания новых высокопрочных и легких материалов и совершенствования технологий формообразования конструктивных элементов из них. Анализ научно-технической литературы, материалов конференций и выставок свидетельствует об интенсивном развитии производства композиционных материалов на основе углеродных волокон и стеклотканей и их широком применении в авиационной, автомобильной, судостроительной промышленности, ракетостроении и космической технике [1-10].

В настоящее время на долю углепластиков приходится до половины веса современного самолета как боевого, так и гражданского и до 70 % их поверхности [1-4]. Внедрение композиционных материалов позволяет снижать вес летательных аппаратов на тонны [1]. Авиационные полимерные композиты в настоящее время условно разделяют на 4 группы: конструкционные пластики для слабо- и средненагруженных конструкций; баллистически-стойкие пластики для защитных конструкций; антифрикционные пластики для тяжело нагруженных узлов трения, звукопоглощающие пластики для снижения шума самолетов на местности. Особенностью во-

локнистых полимерных композиционных материалов является влияние на физико-механические свойства технологии изготовления и существование материала только в виде изделия, например, кожух звукопоглощающего контура авиационного двигателя [5].

Поэтому именно технология создания материала является определяющим фактором обеспечения требуемого качества изделий. Типовая технология формирования армированных композиционных материалов заключается в послойной выкладке пропитанных связующим волокнистых структур с последующим прессованием и отверждением [6-7].

Особенности данной технологии приводят к различным дефектам [8-10], к которым относятся: расслоение; трещины в связующем, складки, подмятие слоев, царапины, риски, забоины, отрыв поверхностных слоев, коробление, поводки и прогибы готового изделия, неправильная укладка наполнителя, оголение основы, нахлесты препрега, срезы препрега, зоны с повышенным содержанием пор и пузырьков и т.п. Особенно важна для надежного функционирования изделия в условиях динамических нагрузок качественная равномерная пропитка армирующих слоев связующим, что весьма затруднено вследствие его высокой вязкости. Как правило, надежный контакт и адгезия обеспечиваются на межслойном уровне, а внутрислойное взаимодействие оказывается сниженным из-за меньшего проникновения связующего в поры и межволоконные зазоры вследствие относительно плохой смачиваемости волокон и большого поверхностного натяжения связующего, находящегося в вязко-текучем состоянии.

Известно, что мощные ультразвуковые поля способствуют активизации не только кавитационных, но и капиллярных процессов в жидких средах, способствуя резкому повышению проникновения жидкости по капилляру [11-13].

Применение ультразвука позволяет существенно повысить качество и эксплуатационные показатели изделий из реактопластов путем их комбинированной термической обработки и сварки или опрессовки [14].

Экспериментальные исследования ультразвуковых процессов свидетельствуют о сложном взаимовлиянии структуры обрабатываемого материала, частоты и амплитуды ультразвука на характер воздействия на поверхностный слой и его качество [15]. Поэтому для повышения качества и однородности структуры изделий из композиционных материалов можно предложить включение в технологический цикл операции ультразвуковой пропитки с одновременной опрессовкой. При этом вследствие того, что связующее представляет собой относительно вязкую субстанцию с низкой текучестью, необходимо обеспечивать достаточно высокую интенсивность ультразвука в материале для формирования капиллярных эффектов и акустических течений.

С другой стороны, чрезмерно высокая интенсивность ультразвука может привести к превышению кавитационного порога, в связующем, возникновению мощной кавитации и местной деструкции твердых армирующих волокон. Поэтому при выборе акустических режимов следует расчетным путем определять амплитуду и частоту ультразвука в каждом конкретном случае применительно к данному материалу, используя зависимости и справочные данные, приведенные в [11, 16].

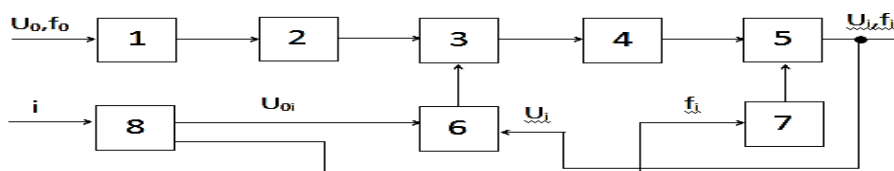
В этой связи с учетом существенного различия в структуре и свойствах композиционных материалов, определяемых применением различных армирующих волокон (углеродных, стеклотканых, арамидных), а также разных видов связующего необходимо применение ультразвукового воздействия различного частотного диапазона, гибко подбираемого к конкретному материалу, в том числе с учетом и упомянутых выше технологических неоднородностей.

Практически реализовать предлагаемую технологию в настоящий момент представляется затруднительным, поскольку не решенными остаются два вопроса: создание многочастотных ультразвуковых генераторов не лабораторного, а промышленного назначения и разработка ультразвуковой колебательной системы, рассчитанной на две и более резонансные частоты. Передача же ультразвуковой энергии в материал бесконтактным методом при помощи широкодиапазонных антенн не эффективна, вследствие больших потерь ультразвуковой энергии из-за отражения волны на границе раздела воздуха и композиционного материала, который вследствие высокого процентного содержания твердых армирующих волокон можно считать твердым. В частности коэффициент отражения на границе «воздух-твердое тело» по данным [17-18] превышает 0,9.

**Постановка задачи.** Целью исследования является разработка ультразвукового генератора технологического назначения с широким диапазоном частоты выходного напряжения.

**Методы исследования.** Нами выполнены исследования [19] и разработана функциональная схема многочастотного ультразвукового генератора (рис. 1), реализованная в экспериментальном образце, а также конструкция ультразвуковой пьезокерамической колебательной системы, способная работать на двух резонансных частотах 22 и 44 кГц [20].

Ультразвуковой генератор имеет следующие особенности. Источник питания выполняется как универсальный, поскольку должен обеспечивать четыре режима, соответствующие четырем видам нагрузки. Каждый режим характеризуется частотой  $f_i$  и действующим значением напряжения  $U_i$  выходной сети и задается оператором вручную с помощью блока 8 – «Задатчик режима». Этот блок задает частоту  $f_i$  для системы управления 7 резонансным инвертором 5 и уставку напряжения  $U_{i0}$  для системы управления 6 импульсным преобразователем 3. Трансформатор 1 служит для гальванической развязки входной и выходной сетей и согласования напряжений этих сетей. Изменение режимов может потребовать изменения структуры и параметров силовых элементов резонансного инвертора, которые могут выполняться как вручную, так и автоматически.

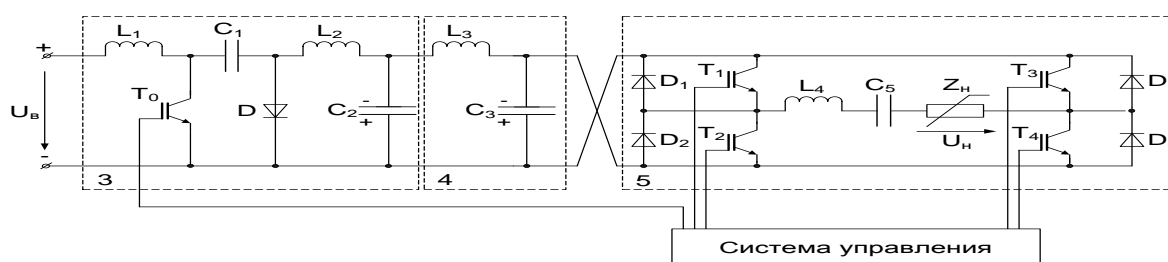


**Рис. 1 Функциональная схема источника питания ультразвукового генератора**  
 1 – входной трансформатор, 2 – выпрямитель, 3 – импульсный преобразователь постоянно-го тока, 4 – фильтр, 5 – резонансный инвертор, 6 – система управления импульсным преобразователем постоянного тока, 7 – система управления инвертором, 8 – задатчик режима

**Fig. 1. Functional diagram of power supply of ultrasonic generator**  
 1 - input transformer, 2 - rectifier, 3 - impulse converter for constant current, 4 - filter, 5 - resonant inverter, 6 - control system for pulsed DC converter, 7 - inverter control system, 8 - mode dial

Особенностью источника питания, необходимого для решения обозначенных выше задач, является его универсальность с точки зрения диапазонов частот и напряжения, а также требуемых показателей качества генерируемой им энергии.

При этом важнейшим требованием является надежность источника и, как следствие, максимальная простота силовой схемы. Упрощенная схема источника питания, предложенная к применению в генераторе, приведена на рис. 2.



**Рис. 2. Силовая схема источника питания**  
 $U_B$  – напряжение на выходе выпрямителя 2;  $U_n$  – напряжение на нагрузке  
**Fig. 2. Power circuit power supply**  
 $U_B$  - voltage at the output of the rectifier 2;  $U_n$  - voltage on the load

Здесь конкретизированы блоки 3, 4, 5 функциональной схемы рис. 1.

В виду необходимости изменения напряжения в достаточно широких пределах и его стабилизации в качестве регулируемого звена постоянного тока выбрана схема импульсного преобразователя Кука. Ее преимущество состоит в возможности получения величины выходного

напряжения (среднее значение напряжения на конденсаторе  $C_2$ ) как ниже, так и выше напряжения на входе.

Инверторная часть преобразователя выполнена по схеме резонансного инвертора тока [21]. Это определяется, как диапазоном рабочих частот, так и требованием обеспечить наилучшую форму кривой напряжения, достигаемую без применения сложных многоуровневых схем.

**Обсуждение результатов.** Проведенные исследования математической модели преобразователя по схемам рис.1 и 2 позволяют сделать вывод о его работоспособности. Известно, что резонансные инверторы достаточно чувствительны к характеру нелинейной нагрузки. Поэтому были проведены исследования, связанные с необходимостью параметрической оптимизации преобразователя с учетом конкретных видов нагрузок.

Исследования выполнялись на макете электрической схемы генератора, подключаемой на пьезокерамический стержневой преобразователь в качестве активной нагрузки (рис. 3).



**Рис. 3 Макет схемы многочастотного генератора**  
**Fig. 3 The layout of the circuit of the multifrequency generator**

По результатам макетно-экспериментальных работ конкретизированы технические требования, по которым спроектирован и изготовлен экспериментальный образец многочастотного ультразвукового генератора технологического назначения с регулируемой выходной мощностью 100-500 Вт. (рис. 4).



**Рис. 4 Экспериментальный образец генератора, подключенного к ноутбуку для программирования опорной частоты**  
**Fig. 4 Experimental sample of the generator connected to the laptop for programming the reference frequency**

Особенностью генератора является программирование при помощи ноутбука опорной частоты выходного напряжения в диапазоне 20 – 60 кГц, что сделано впервые для подобных отечественных изделий технологического назначения. Тонкая подстройка частоты в резонанс с колебательной системой осуществляется с панели управления кнопками с дискретностью 10 Гц, что обеспечивает достаточную точность настройки с колебательной системой даже высокой

добротности. Это позволяет просто реализовать экспериментально устанавливаемые закономерности корреляции частоты ультразвукового воздействия и физико-механических характеристик армирующего материала и матрицы изделия.

Генератор имеет встроенный микропроцессор TMDS-CN-CD-28035 V1.2, позволяющий запоминать введенную с ноутбука опорную частоту.

В дальнейшем, при повторном включении с той же колебательной системой использование ноутбука не требуется. Возможна только тонкая корректировка частоты выходного напряжения применительно к конкретному обрабатываемому материалу.

При смене объекта воздействия (другой исходный материал, иная сьемка укладки армирующих волокон) потребуется вновь подключение ноутбука. Структурные схемы генератора в наладочном и рабочем режимах показаны на рис. 5.

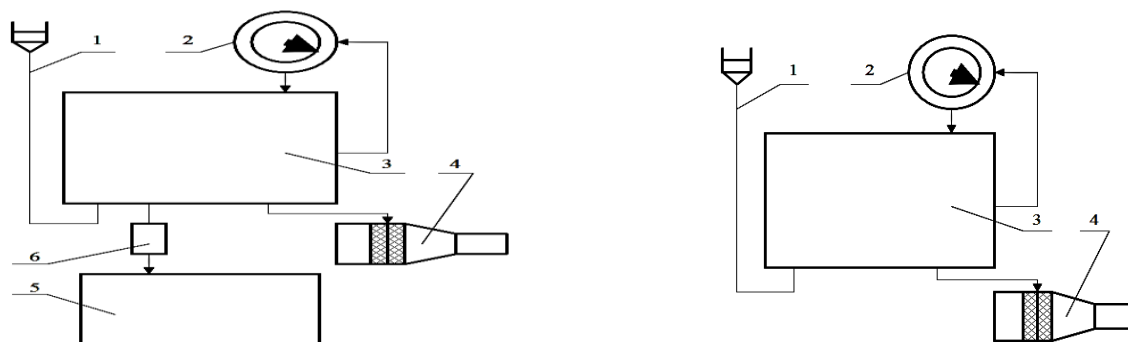


Рис. 5. Структурная схема генератора в конфигурации наладочного (а) и рабочего (б) режимов  
 1 – сетевой кабель; 2 – регулятор питающего напряжения; 3 – генератор; 4 – ультразвуковой преобразователь; 5 – ноутбук; 6 – интерфейс генератора и ноутбука

Fig. 5 Block diagram of the generator in the configuration of the adjustment (a) and operating (b) modes  
 1 - the network cable; 2 - supply voltage regulator; 3 - generator; 4 - ultrasonic transducer; 5 - laptop; 6 - generator and laptop interface

В электрической схеме генератора авторами применены: варистор S20K-275 и трансформатор высокочастотный Е-51. Для связи с ноутбуком используется интерфейс ConverterUSB.TORS232 HXSP-2108D. Габаритные размеры генератора без регулятора выходного напряжения составляют 500x400x150 мм, вес не более 3 кг, максимальная величина выходного напряжения – 200 В. Режимы работы генератора отлажены при подключении к пьезокерамическим стержневым преобразователям продольных и продольно-крутильных колебаний с резонансной частотой 23450 и 38300 Гц. Внешний вид диалогового окна ноутбука при работе с генератором представлен на рис. 6.

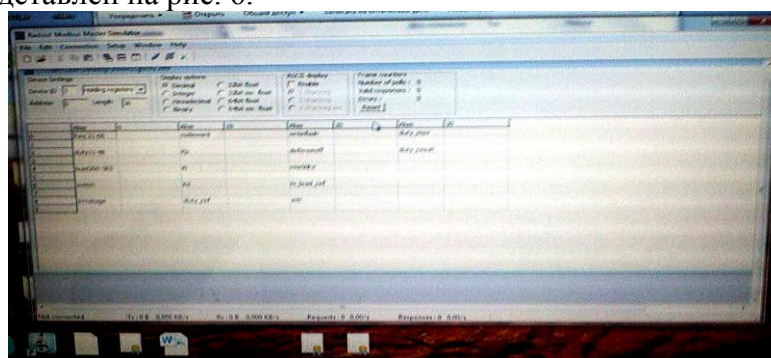


Рис. 6. Диалоговое окно задания опорной частоты выходного напряжения  
 Fig. 6 Dialog box for setting the reference frequency of the output voltage

**Вывод.** Использование технологии ультразвуковой пропитки с оптимизацией воздействия путем применения многочастотных источников ультразвука представляется особенно целесообразным при формировании топологических армирующих структур в термопластичных изделиях сложной формы, полученных при помощи аддитивных технологий, поскольку в дан-

ном случае проявляется резкое различие в свойствах основной и армирующей структуры, обладающей весьма сложной формой.

В данном направлении необходимы дополнительные технологические и материаловедческие исследования с использованием в качестве инструмента описанного выше образца генератора. Многочастотный ультразвуковой генератор также может найти применение в технологиях размерной малодефектной обработки изделий приборостроения из твердых хрупких материалов [21-23], поскольку обеспечит оптимальный подбор частот и интенсивности воздействия, формирующих минимальный трещиноватый слой при сохранении высокой производительности.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-03-00720 «Методология оптимизационного микроконструирования композиционных материалов для объектов сложной формы повышенной динамической прочности, послойно формируемых электротехнологическими методами».

#### Библиографический список:

1. Кошкин Р.П. Основные направления развития и совершенствования беспилотных авиационных систем: <http://spmagazine.ru/420>, дата последнего обращения 28.01.2017 г.
2. Rand, B. Appleyard, S. Yardim, M., 1998 Proceedings of the NATO advanced Study Institute on Design and Control of Structure of Advanced Carbon Materials for Enhanced Performance, pp.177-193.
3. Thomas, G 2007, 'Composites come of age on 787', The Australian, 18 May, p. 2830.
4. Werfelman, L 2007, 'The Composite Evolution', AeroSafety World, March 2007, p. 17-21.
5. 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.
6. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
7. Krishnamurthy, S 2006, 'Prestressed Advanced Fibre Reinforced Composites: Fabrication and Mechanical Performance', PhD thesis, Defence College of Management and Technology, Cranfield University, Beds., p. 49-56.
8. Лобанов Д. С. Экспериментальные исследования деформационных и прочностных свойств полимерных композиционных материалов и панелей с наполнителем: дис. канд. техн. наук: Пермь, 2015. 130 с.
9. Гареев А. Р. Разработка и исследование трехмерно-армированных углепластиков на основе стержневых структур наполнителя: дис. канд. техн. наук: Москва, 2015. 113 с.
10. Гусева Р. И. Особенности изготовления тонкостенных обшивок из углепластика в самолетостроении. Изменение технологических параметров в процессе формования / Гусева Р. И., ШаМингун // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, № II-1 (18), 2014. С. 4-12.
11. Розенберг Д. Физика и техника мощного ультразвука. Том 3. Физические основы ультразвуковой технологии / Розенберг Д. – М.: Книга по Требованию, 2012. – 689 с.
12. Приходько, В.М. Формирование эксплуатационных свойств деталей машин ультразвуковыми методами: монография / В.М. Приходько, И.А. Медеяев, Д.С. Фатюхин. – М.: МАДИ, 2015. – 264 с.
13. Ультразвуковая пропитка [http://u-sonic.com/tech/obrabotka-zhidkikh-i-zhidkodispersnykh-sred/propitka\\_02/](http://u-sonic.com/tech/obrabotka-zhidkikh-i-zhidkodispersnykh-sred/propitka_02/)
14. Бекренев Н.В. Разработка ультразвуковых технологий обработки пластическим деформированием неоднородных композиционных материалов в Саратове / Н.В. Бекренев, И.В. Злобина // Вопросы электротехнологии. - № 2(7), 2015. С.28-35.
15. Бекренев Н.В. Влияние структуры конструкционных материалов на характер ультразвукового воздействия при их поверхностной обработке / Н.В. Бекренев, А.П. Петровский // Технология металлов. - 2011.- № 5.- С.35-39.
16. Злобина И.В. Обоснование разработки ультразвукового многочастотного генератора для оснащения технологического оборудования / И.В. Злобина, Н.В. Бекренев, Н.Н. Максимова и др. // Вопросы электротехнологии. - № 2 (3), 2014. – С. 53-59.
17. Хмелев В.Н. Повышение эффективности ультразвуковой кавитационной обработки вязких и дисперсных жидких сред / В.Н. Хмелев, С.С. Хмелев, Р.Н. Голых и др. // Ползуновский вестник. №3, 2010. – С. 321-325.
18. Бржозовский Б.М. Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении: учеб. пособие / Б.М.Бржозовский, Н.В. Бекренев. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2009. -348 с.
19. Бекренев Н.В. Устройство для ультразвуковой обработки / Н.В. Бекренев, Б.М. Бржозовский, В.М. Фирсов и др. // патент RU № 2548344, опубл. 20.04.2015 г.
20. Ягудин А.Ф. О параметрической стабилизации автономного резонансного инвертора с помощью нагрузочного контура третьего порядка / Н.А. Фролов, А.Ф. Ягудин // М.: Электричество. –2009. – № 7. – С. 68-69.

21. Злобина И.В. Малодефектная ультразвуковая обработка деталей навигационных приборов из неоднородных по структуре твердых, хрупких материалов / И.В. Злобина, Н.В. Бекренев, А.П. Петровский // Вестник СГТУ. - № 4 (77), 2014. - С. 97-103.
22. Zlobina I.V. Increasing of topography homogeneity of the construction materials surface during final ultrasound processing / I.V. Zlobina, A. P. Petrovsky, N.V. Bekrenev and oth. // 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS).- 1-4 Dec. 2015. - Tomsk. - P. 1-4.
23. Бекренев Н.В. Модель воздействия энергии ультразвуковых колебаний на структуру твердых хрупких материалов / Н.В. Бекренев, И.В. Злобина, А.П. Петровский // Вопросы электротехнологии. - № 2 (7), 2015. - С. 35-41.

#### References:

1. Koshkin R.P. Osnovnye napravleniya razvitiya i sovershenstvovaniya bespilotnykh aviatsionnykh sistem: <http://spmagazine.ru/420>, data obrashcheniya 28.01.2017 g. [Koshkin R.P. The main directions of development and improvement of unmanned aerial systems: <http://spmagazine.ru/420>, access date January 28, 2017. (In Russ.)]
2. Rand B., Appleyard S., Yardim M. Proceedings of the NATO advanced Study Institute on Design and Control of Structure of Advanced Carbon Materials for Enhanced Performance. 1998. pp.177-193.
3. Thomas G. Composites come of age on 787. The Australian, 18 May 2007. P. 2830.
4. Werfelman L. The Composite Evolution. AeroSafetyWorld. March 2007. pp. 17-21.
5. Kablov E.N. Innovatsionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNTs RF porealizatsii —Strategicheskikh napravlenii razvitiya materialov i tekhnologii ikh pererabotkina period do 2030 goda". Aviatsionnye materialy i tekhnologii. 2015;1(34):3–33. [Kablov E.N. Innovative developments FGUP «VIAM» GNTs RF on the implementation of "Strategic directions of materials development and processing technologies for the period until 2030". Aviation materials and technologies 2015;1(34):3–33. (In Russ.)]
6. Kablov E.N. Materialy ikh himicheskie tekhnologii dlya aviatsionnoi tekhniki. Vestnik Rossiiskoi akademii nauk. 2012; 82(6):520–530. [Kablov E.N. Materials and chemical technologies for aviation equipment. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2012; 82(6):520–530. (In Russ.)]
7. Krishnamurthy S. Prestressed Advanced Fibre Reinforced Composites: Fabrication and Mechanical Performance. PhD thesis, Defence College of Management and Technology, Cranfield University, Beds. 2006. P. 49-56.
8. Lobanov D.S. Eksperimental'nye issledovaniya deformatsionnykh i prochnostnykh svoystv polimernykh kompozitsionnykh materialov i panelei s zapolnitelem: dis. kand. tekhn. nauk: Perm', 2015. 130 s. [Lobanov D.S. Experimental studies of the deformation and strength properties of polymeric composite materials and panels with filler. Published summary of the candidate of technical sciences dissertation: Perm', 2015. 130 p. (In Russ.)]
9. Gareev A. R. Razrabotka i issledovanie trekhmerno-armirovannykh ugleplastikov na osnove sterzhnevnykh struktur na polnatelya: dis. kand. tekhn. nauk: Moskva, 2015. 113 s. [Gareev A. R. Development and investigation of three-dimensional reinforced carbon plastics on the basis of core filler structures. The Candidate of technical sciences dissertation. Moscow, 2015. 113 p. (In Russ.)]
10. Guseva R.I., ShaMingun. Osobennost i zgotovleniya tonkostennykh obshivok iz ugleplastika v samoletostroenii. Izmenenie tekhnologicheskikh parametrov v protsesse formovaniya. Uchenyey zapiski Komsomol'skogo-na-Amuregosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2014; II-1(18):4-12. [Guseva R.I., ShaMingun. Features of manufacturing thin-walled plating of carbon fiber in aircraft construction. Change of technological parameters in the process of moulding. Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University. 2014; II-1(18):4-12. (In Russ.)]
11. Rozenberg D. Fizika i tekhnika moshchnogul'trazvuka. Tom 3. Fizicheskie osnovy ul'trazvukovoitekhnologii. M.: KnigapoTrebovaniyu; 2012. 689 p. [Rozenberg D. Physics and technology of powerful ultrasound. Volume 3. Physical fundamentals of ultrasonic technology. M.: KnigapoTrebovaniyu; 2012. 689 p. (in Russ.)]
12. Prikhod'ko V.M., Medelyaev I.A., Fatyukhin D.S. Formirovanie ekspluatatsionnykh svoystv detalei mashinul'trazvukovymi metodami. Monografiya. M.: MADI; 2015. 264 p. [Prikhod'ko V.M., Medelyaev I.A., Fatyukhin D.S. Formation of operational properties of machine parts by ultrasonic methods. Monograph. M.: MADI; 2015. 264 p. (In Russ.)]
13. Ul'trazvukovaya propitka. [http://u-sonic.com/tech/obrabotka-zhidkikh-i-zhidkodispersnykh-sred/propitka\\_02/](http://u-sonic.com/tech/obrabotka-zhidkikh-i-zhidkodispersnykh-sred/propitka_02/) [Ultrasonic Impregnation [http://u-sonic.com/tech/obrabotka-zhidkikh-i-zhidkodispersnykh-sred/propitka\\_02/](http://u-sonic.com/tech/obrabotka-zhidkikh-i-zhidkodispersnykh-sred/propitka_02/) (In Russ.)]
14. Bekrenev N.V., Zlobina I.V. Razrabotka ul'trazvukovykh tekhnologii obrabotki plasticheskimi deformirovaniem neodnorodnykh kompozitsionnykh materialov v Saratove. Voprosy elektrotekhnologii. 2015; 2(7):28-35. [Bekrenev N.V., Zlobina I.V. Development of ultrasonic technologies for processing plastic deformation of inhomogeneous composite materials in Saratov. Voprosy elektrotekhnologii. 2015;2(7):28-35. (In Russ.)]
15. Bekrenev N.V., Petrovskii A.P. Vliyanie struktury konstruksionnykh materialov na kharakterul'trazvukovogo vozdeistviya pri ikh poverkhnostnoi obrabotke. Tekhnologiyametallor. 2011;5:35-39. [Bekrenev N.V., Petrovskii A.P. Influence of the structure of structural materials on the nature of the ultrasonic action during their surface treatment. Technology of metals. 2011;5:35-39. (In Russ.)]
16. Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Maksimova N.N. i dr. Obosnovanie razrabotki ul'trazvukovogo mnogochastotnogo generatora dlya osnashcheniya tekhnologicheskogo oborudovaniya. Voprosy elektrotekhnologii. 2014;2(3):53-59.



- [Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Maksimova N.N. et al. The rationale for developing an ultrasonic multifrequency generator for equipping technological instrumentation. *Voprosyelektrotekhnologii*. 2014;2(3):53-59. (In Russ.)]
17. Khmelev V.N., Khmelev S.S., Golykh R.N. i dr. Povyshenieeffektivnostiul'trazvukovoikavitatsionnoiobrabotkivyazkikh i dispersnykhzhidkikh sred. *Polzunovskii vestnik*. 2010;3:321-325. [Khmelev V.N., Khmelev S.S., Golykh R.N. i dr. Increase of efficiency of ultrasonic cavitation processing of viscous and disperse liquid media. *Polzunovskiy vestnik*. 2010;3:321-325. (In Russ.)]
  18. Brzhozovskii B.M., Bekrenev N.V. Ul'trazvukovyetekhnologicheskie protsessy i oborudovanie v mashino- i priborostroenii: ucheb. posobie. Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t; 2009. 348 s. [Brzhozovskii B.M., Bekrenev N.V. Ultrasonic technological processes and equipment in machine and instrument engineering: Textbook. Saratov: Saratov state technical university; 2009. 348 p. (In Russ.)]
  19. Bekrenev N.V., Brzhozovskii B.M., Firsov V.M. i dr. Ustroistvodlya ul'trazvukovoio obrabotki. Patent RU № 2548344, opubl. 20.04.2015 g. [Bekrenev N.V., Brzhozovskii B.M., Firsov V.M. et al. The device for ultrasonic treatment. Patent RU № 2548344, publ. 20.04.2015 (in Russ.)]
  20. Frolov N.A., Yagudin A.F. O parametriceskoi stabilizatsii avtonomnogo rezonansnogo invertora s pomoshch'yunagruzochnogo konturatret'egoporyadka. *Elektrichestvo*. 2009;7:68-69. [Frolov N.A., Yagudin A.F. On the parametric stabilization of an autonomous resonant inverter using a third-order loading circuit. *Elektrichestvo*. 2009; 7: 68-69. (In Russ.)]
  21. Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Petrovskii A.P. Malodefektnaya ul'trazvukovaya obrabotka detalei na vigatsionnykh priborov iz neodnorodnykh po strukture tverdyykh, khrupkikh materialov. *Vestnik SGTU*. 2014; 4(77):97-103. [Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Petrovskii A.P. Low-defect ultrasonic treatment of navigational instruments from heterogeneous structures of hard, brittle materials. *Vestnik Saratov State Technical University*. 2014;4(77):97-103. (In Russ.)]
  22. Zlobina I.V., Petrovskiy A.P., Bekrenev N.V. et al. Increasing of topography homogeneity of the construction materials surface during final ultrasound processing. *Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. Tomsk, 2015. P. 1-4.
  23. Bekrenev N.V., Zlobina I.V., Petrovskii A.P. Model' vozdeistviya energii ul'trazvukovykh kolebaniy na strukturu tverdyykh khrupkikh materialov. *Voprosy elektrotekhnologii*. 2015;2(7):35-41. [Bekrenev N.V., Zlobina I.V., Petrovskii A.P. Model of the impact of ultrasonic vibration energy on the structure of hard brittle materials. *Voprosy elektrotekhnologii*. 2015; 2(7):35-41. (In Russ.)]

#### **Сведения об авторах.**

**Бекренев Николай Валерьевич** - доктор технических наук, профессор, кафедра «Техническая механика и детали машин».

**Луков Дмитрий Юрьевич** – аспирант, кафедра «Системотехника».

#### **Information about the authors.**

**Nikolaj V. Bekrenev** - Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Technical mechanics and machine parts.

**Dmitriy Yu. Lukov** – Graduate student, Department of System engineering.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

**Поступила в редакцию** 28.09.2017.

**Received** 28.09.2017.

**Принята в печать** 10.11.2017.

**Accepted for publication** 10.11.2017.