

**ТРАДИЦИОННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ
ЭЛЕКТРОКЕРАМИКИ****В.А. Белов**

belov_v_a@bk.ru

SPIN-код: 2482-0097

В.Д. Радаева

valrad97@ya.ru

SPIN-код: 1606-4156

К.А. Терновских

karina2899@mail.ru

SPIN-код: 9481-1413

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация**Аннотация**

Широкое применение керамических изоляторов в электроэнергетике обусловлено их высокой диэлектрической проницаемостью, относительно низкой ценой и высокими прочностными характеристиками. Однако керамические материалы являются хрупкими и склонны к разрушению под действием динамических нагрузок. В настоящее время не существует широко распространенных методов, позволяющих оценить прочностные характеристики керамических материалов под воздействием динамических нагрузок без подготовки специальных образцов. В статье рассмотрена возможность применения метода ультразвуковой диагностики, который позволяет по результатам воздействия высокоскоростной струи воды оценить динамические прочностные характеристики материала. На примере технологического процесса рассмотрено производство образцов методом статического прессования и его основные этапы с введенными контрольными операциями.

Ключевые слова

Электроизоляторы, ультразвуковая диагностика, корундовая композиционная керамика, электрофарфор, прочностные характеристики, контроль качества, тепловой неразрушающий контроль, метод статического прессования

Поступила в редакцию 21.05.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

В современной отечественной промышленности существует огромный выбор различных видов электроизоляторов, к ним относятся кварцевая, стеатитовая, титановая, пьезоэлектрическая, брокеритовая, цельзиановая керамика, радиофарфор и другие виды керамики. Основными производителями на рынке электроизоляционной керамики являются такие предприятия, как «Промышленные керамические изделия», «Завод технической керамики», ЗАО «Электрокерамика» и ООО «Электро». Традиционно электроизоляторами являются вещества, служащие для изоляции токоведущих частей электрических устройств, например, обмоток машин и аппаратов, проводов, линий электропередачи и т. п. [1].

К электроизоляционной керамике предъявляют множество требований, связанных с электрическими характеристиками материала. В первую очередь, керамика должна обладать большим удельным электрическим сопротивлением (объем-

ным и поверхностным), высокой электрической прочностью, небольшими значениями тангенса угла диэлектрических потерь [2]. Помимо этого керамика должна отвечать требованиям высокой механической прочности. Все эти требования во многом зависят от этапов технологического процесса производства.

Данная статья посвящена исследованию прочностных характеристик корундовой керамикой. Корундовой называют керамику, которая содержит 95 % и более оксида алюминия Al_2O_3 . Удельная теплопроводность алюминоксида в 10–20 раз выше, чем изоляторного фарфора (см. таблицу). В зависимости от того, в какой отрасли техники используется корундовая керамика, выделяют разные виды керамики: алюмоксид, корундиз, синоксаль, миналунд, стоал, 22ХС (ВК-94-1), микролит, М-7 (ВК-94-2), поликор (ВК-100-1) и др. Эти разновидности корундовой керамики различаются типом, количеством введенной добавки и некоторым отличием технологии изготовления и, соответственно, свойствами [3].

Физико-механические свойства корундовой керамики и электрофарфора

Материал	Химический состав, % масс.	Плотность, г/см ³	Коэффициент температурного линейного расширения $\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$, при температуре 20...900 °С	Теплопроводность, Вт/(м · К)	Электрическая прочность, кВ/мм, при 20 °С	Удельное объемное электрическое сопротивление 100 °С, Ом · см	Диэлектрическая проницаемость при частоте 10 ⁶ Гц при 20 °С
Фарфор	Al_2O_3 – 25 %, SiO_2 – 70 %	2,3 – 2,5	3 – 6	1,0 – 2,5	25 – 30	10^9 – 10^{10}	5 – 7
ВК-100-1	Al_2O_3 – 99 %, MgO – 0,3 %	3,95	8	25 – 30	30	10^{14}	10,7
ВК-100-2	Al_2O_3 – 99,7 %, SiO_2 – 0,3 %	3,95	8	25 – 30	30	10^{14}	10,7
22ХС	Al_2O_3 – 94,3 %, SiO_2 – 4,4 %	3,75	7,9	17 – 28	50	10^{13}	9,5

Благодаря малым диэлектрическим потерям при повышенной температуре корундовая керамика имеет широкое применение в промышленности, в частности, для производства электротехнических изделий. Она используется при изготовлении таких изделий, как изолирующие элементы электронных, вакуумных приборов (герметичные высоковольтные изоляторы электронно-лучевых пушек сварочных, плавильных и распылительных установок), герметичные высоковольтные изоляторы рентгеновских трубок, герметичные изоляторы нагревательных элементов с температурой эксплуатации до 1750 °С, герметичные тоководы, изолирующие элементы герметичных электрических проходок, применяемых для передачи электроэнергии через герметичные ограждения атомных станций, транспорта с ядерными реакторами, тоннелей метро и других деталях ответственного назначения [3]. Основные физико-механические характеристики корундовой керамики представлены ниже:

Традиционные и перспективные методы диагностики электрокерамики

Плотность, г/см ³	3,96
Температура плавления, °С	2050
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К)	30,14 (100 °С) 6,4 (1000 °С)
Удельное электрическое сопротивление, Ом · м	$3 \cdot 10^{12}$ (100 °С) $9 \cdot 10^{-2}$ (1300 °С)
Линейный коэффициент теплового расширения $\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$,	8 (20–1400 °С)
Модуль упругости, ГПа	374 (20 °С) 315 (1000 °С) 147 (1500 °С)
Предел прочности при изгибе, МПа	до 650 (20 °С) 50 (1500 °С)
Микротвердость, ГПа	до 26 (20 °С)

Благодаря своим свойствам корундовая композиционная керамика (ККК) получила широкое распространение в высокотемпературной технике в качестве изоляции и защитных чехлов для термодпар. Защитные чехлы являются деталями ответственного назначения. Следовательно, к материалам, из которых их изготавливают, предъявляются высокие эксплуатационные требования, такие как высокая механическая прочность, окислостойкость, термостойкость, газоплотность, малоинерционность, химическая инертность и др. [4].

Помимо высокотемпературной техники ККК также имеет широкое применение в медицине, поскольку не оказывает токсичного влияния на организм, имеет высокую механическую прочность. Благодаря этому она широко распространена в ортопедии, костной пластике, стоматологии и в других отраслях медицины.

Другим видом керамики, широко применяемым в ракетно-космической технике, является кварцевая керамика. Она представляет собой керамические материалы, вырабатываемые на основе кварцевого стекла, отличающиеся высокой химической и термической стойкостью. Такая керамика обладает многими ценными свойствами исходного материала: низким коэффициентом температурного расширения, хорошими электротехническими параметрами. В отличие от кварцевого стекла, теплопроводность которого увеличивается с ростом температуры, кварцевая керамика имеет довольно низкую теплопроводность, мало изменяющуюся вплоть до 1100 °С [5]. Благодаря вышеперечисленным свойствам кварцевая керамика применяется в ракетной технике для изготовления головных частей ракет, обтекателей антенн, сопел ракетных двигателей, а также для футеровки печей, теплообменников и др. тепловых агрегатов. Пенокварц является разновидностью кварцевой керамики и перспективен как материал для тепловой защиты в космической технике.

В настоящее время значительное внимание уделяется вопросам, связанным с контролем качества материалов и готовых изделий из ККК. Появился ряд патентов, посвященных решению этой задачи. Предложены способы определения дефектов ККК методом теплового неразрушающего контроля [6], а также по ее светопропусканию [7].

Первый способ определения дефектов методом теплового неразрушающего контроля предусматривает нагрев изделия, его последующее охлаждение, измерение температуры изделия и определение темпа охлаждения для каждой элементарной площадки поверхности изделия. Второй способ, основанный на взаимосвязи светопропускания керамики с ее структурой, предполагает обжиг образца, визуальную оценку с помощью микроскопа поверхности изделия, фотографирование в проходящем и отраженном свете и анализ структуры образца по интенсивности света, прошедшего через образец. Однако при известных достоинствах данных методов они имеют такие недостатки, как высокая стоимость и потенциальная радиационная опасность, которые не позволяют использовать их для оценивания керамических изделий в больших объемах и керамических элементов функционирующего оборудования.

В настоящее время число методов контроля ККК, использующихся на практике, ограничено, в то время как спрос на них возрастает. Поскольку традиционные лабораторные методы исключают возможность в полной мере имитировать эксплуатационные условия, исследуя образец, нельзя получить полную и достоверную информацию о качестве ККК. Однако хотя информация, полученная в ходе самой эксплуатации, и дает объективную картину качества материала, но требует больших затрат времени и обработки большого объема статистических данных.

Помимо методов оценки качества выходной продукции из ККК особое значение имеют методы, связанные с контролем продукции на каждом этапе производства, а именно на этапах технологической подготовки производства при выборе рациональных технологических режимов, обеспечения их стабильности и состава ККК.

Существует противоречие в том, что происходит интенсивное развитие ККК, появление новых групп данных материалов, например, со сложными добавками [8, 9], но одновременно с этим развитие новых методов диагностики заметно отстает от развития данной группы композиционных материалов.

В настоящее время в условиях производства инженерам-технологам необходим целый комплекс методов контроля, которые смогли бы сопроводить все этапы технологического процесса производства ККК, в том числе и выходной контроль готовой продукции. Такой подход позволит обеспечить высокий уровень надежности готового изделия из ККК.

В качестве примера рассмотрим технологический процесс производства образцов из ККК методом статического прессования и его основные этапы с введенными контрольными операциями.

В первую очередь необходимо выбрать методы контроля ККК, которые можно было бы включить в производственный процесс с целью улучшения качества изделия.

Основной проблемой обеспечения качества на производственном этапе создания деталей из ККК является экономически обоснованный выбор метода или выбор рациональной комбинации способов контроля, диагностики, которые позволят минимизировать себестоимость, временные затраты, трудоемкость, достоверность получаемых результатов, точность измерений и др. (рис. 1).

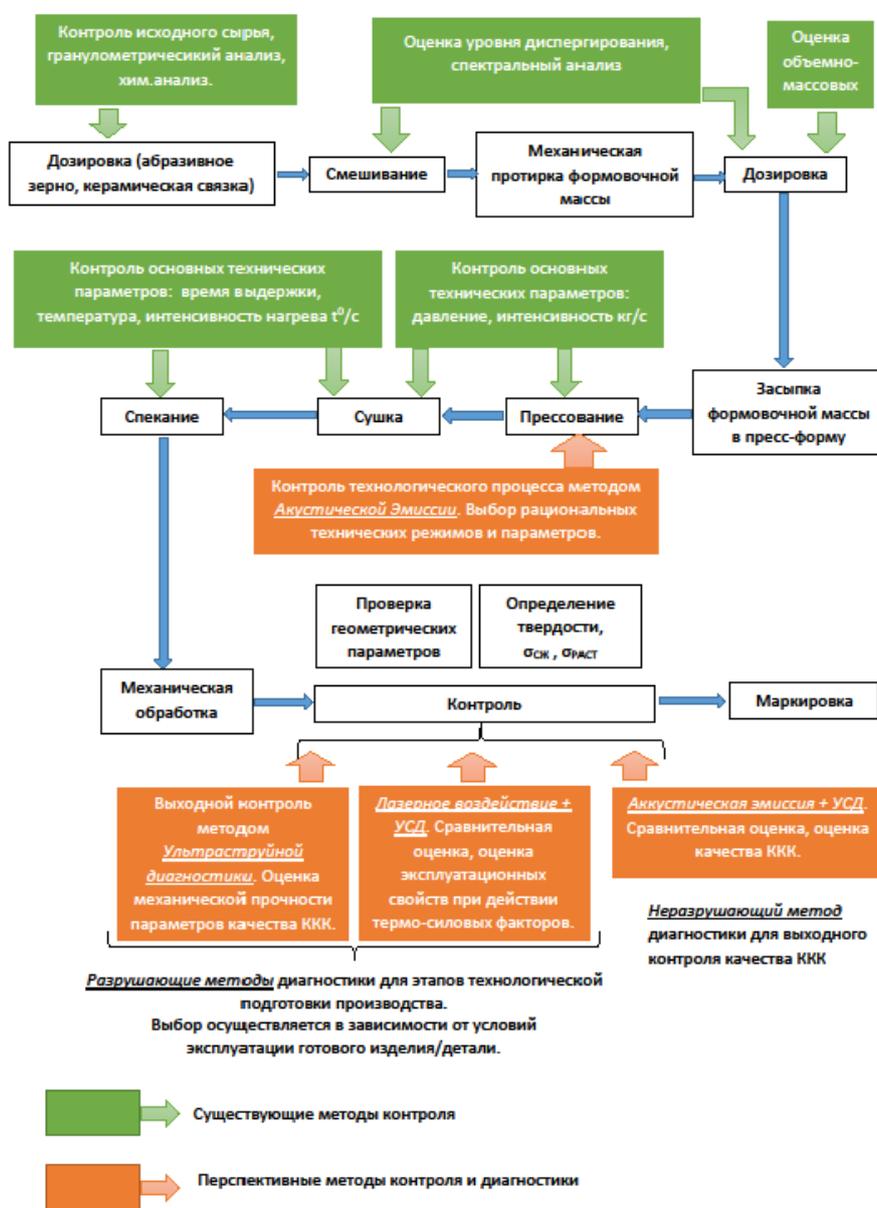


Рис. 1. Процесс изготовления изделий из корундовой керамики (УС — ультразвуковая диагностика)

В качестве рассматриваемых вариантов методов диагностики технологического процесса производства можно рассматривать целый спектр новых и перспективных методов разрушающего и неразрушающего контроля: акустической эмиссии (для контроля технологического процесса прессования детали/заготовки и выбора рациональных технологических режимов), акустической эмиссии с генератором ультразвуковых колебаний посредством лазерного излучения (выходной контроль ККК), ультразвуковой диагностики (оценка механи-

ческой прочности ККК), гибридный метод последовательного воздействия лазерного излучения и ультразвуку жидкости (для деталей подверженных температурно-силовому воздействию).

В ряде работ [10, 11] было показано, что метод ультразвуковой диагностики (УСД) может быть эффективно использован на этапе технологической подготовки производства. В данной работе опыты были произведены в Центре гидрофизических исследований Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова на станке для гидроабразивной резки *Flow System* производства США.

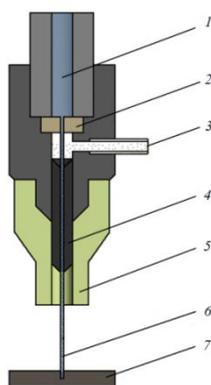


Рис. 2. Схема ультразвуковой диагностики керамической пластины:

1 — струя воды, подводимая под высоким давлением; 2 — сопло; 3 — подача абразива; 4 — смеситель; 5 — кожух; 6 — режущая струя воды с абразивом; 7 — опытный образец из керамики

Схема, описывающая механизм действия станка для анализа контроля качества изделия, изображена на рис. 2.

Метод УСД позволяет определить такие информативные критерии, как параметры гидрокаверны, количество сколов, унос массы материала для оценки состава керамики.

При воздействии на керамические образцы ультразвуком с постоянными параметрами в образцах образуются гидрокаверны, размер и формы которых взаимосвязаны с физико-химическими свойствами материала (например, в материалах с большим количеством внутренних дефектов образуются крупные сколы материала). Количественным параметром, который поддается измерению, является потеря массы керамики на единицу длины реза. Чем выше этот показатель, тем менее качественной является керамика.

Выводы. Метод УСД может быть эффективно использован на этапе технологической подготовки производства изделий из ККК, применяемых для производства электротехнических изделий. Достоинством рассматриваемого метода диагностики является возможность использования стандартного технологического оборудования для гидроабразивной резки материалов.

Исследования выполнены в рамках гранта Президента Российской для государственной поддержки ведущих научных школ (НШ-3778.2018.8) и гранта РФФИ 18-29-18081.

Литература

- [1] Электроизолятор. *ngpedia.ru: веб-сайт*. URL: <https://www.ngpedia.ru/id612833p1.html> (дата обращения: 20.11.2018).
- [2] Анисимов А.Г., Бардаханов С.П., Завьялов А.П. и др. Влияние условий спекания на структуру и свойства керамики из наноразмерных порошков оксида кремния. *Вестник НГУ. Серия: Физика*, 2013, т. 8, № 1, с. 107–114.

- [3] Корундовая керамика и ее свойства. *allceramic.ru: веб-сайт*. URL: <http://www.allceramic.ru/materials/korund.html> (дата обращения: 27.11.2018).
- [4] Абашин М.И., Галиновский А.Л., Бочкарев С.В. и др. Моделирование ультразвукового воздействия для контроля качества покрытий. *Физическая мезомеханика*, 2015, № 1, с. 84–89.
- [5] Браутман Л., Крок Р.М, ред. Современные композиционные материалы. М., Мир, 1970.
- [6] Курбатов А.В., Лазарев П.И. Способ получения проекции объекта с помощью проникающего излучения и устройство для его осуществления. Патент 2098797 РФ. Заявл. 30.11.1994, опубл. 10.12.1997.
- [7] Барзов А.А., Галиновский А.Л., Абашин М.И. Анализ физико-технологических особенностей процесса ультразвуковой диагностики. *Инженерный журнал: Наука и инновации*, 2012, № 11. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-11-421 URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/technic/421.html>
- [8] Братухина А.С., Петюкевич М.С., Качаев А.А. Исследование микроструктуры керамики из карбида бора, полученной из порошков карбида бора с нанодобавками. *Перспективы развития фундаментальных наук. Сб. науч. тр. XI Межд. конф. студентов и молодых ученых*. Томск, Изд-во ТПУ, 2014, с. 918–920.
- [9] Плетнев П.М., Непочатов Ю.К., Маликова Е.В. и др. Технология получения корундовой бронекерамики, модифицированной сложными добавками. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 2015, № 3, с. 40–49.
- [10] Бочкарев С.В., Цаплин А.И., Галиновский А.Л. и др. Способ диагностики качества конструкционных материалов. Патент 2518590 РФ. Заявл. 22.01.2013, опубл. 10.06.2014.
- [11] Галиновский А.Л., Муляр С.Г., Хафизов М.В. Применение гибридной диагностики для оценки эксплуатационных свойств композиционной керамики. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2012, № 9, с. 65–69.
- [12] termokeramika: веб-сайт компании. URL: <https://termokeramika.com> (дата обращения: 23.05.2019).

Белов Владимир Андреевич — студент кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Радаева Валентина Дмитриевна — студентка магистратуры кафедры «Технология ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Терновских Карина Андреевна — студентка кафедры «Технология ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Галиновский Андрей Леонидович, профессор, доктор педагогических наук, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

TRADITIONAL AND PROMISING DIAGNOSTIC METHODS FOR ELECTROCERAMICS

V.A. Belov

belov_v_a@bk.ru

SPIN-code: 2482-0097

V.D. Radaeva

valrad97@ya.ru

SPIN-code: 1606-4156

K.A. Ternovskikh

karina2899@mail.ru

SPIN-code: 9481-1413

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The widespread use of ceramic insulators in the electric power industry is due to their high dielectric constant, relatively low price and high strength characteristics. However, ceramic materials are brittle and prone to fracture under dynamic loads. Currently, there are no widespread methods for assessing the strength characteristics of ceramic materials under the influence of dynamic loads without the preparation of special samples. The article discusses the possibility of applying the method of ultra-jet diagnostics, which allows one to evaluate the dynamic strength characteristics of the material based on the results of exposure to a high-speed water jet. On the example of the technological process, the production of samples by static pressing method and its main stages with the introduced control operations are considered.

Keywords

Electrical insulators, ultra-jet diagnostics, corundum composite ceramics, electrical porcelain, strength characteristics, quality control, thermal non-destructive testing, static pressing method

Received 21.05.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

References

- [1] Elektroizolyator [Electric insulator]. *ngpedia.ru: website* (in Russ.). URL: <https://www.ngpedia.ru/id612833p1.html> (accessed: 20.11.2018).
- [2] Anisimov A.G., Bardakhanov S.P., Zav'yalov A.P., et al. Influence of sintering on the structure and properties of ceramics from silica nanopowders. *Vestnik NGU. Seriya: Fizika* [Vestnik NSU. Series: Physics], 2013, vol. 8, no. 1, pp. 107–114 (in Russ.).
- [3] Korundovaya keramika i ee svoystva [Alumina ceramic and its properties]. *allceramic.ru: website* (in Russ.). URL: <http://www.allceramic.ru/materials/korund.html> (accessed: 27.11.2018).
- [4] Abashin M.I., Galinovskiy A.L., Bochkarev S.V., et al. Modelling of ultra-jet influence for coating quality control. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2015, no. 1, pp. 84–89 (in Russ.).
- [5] Brautman L., Krok R.M, eds. *Sovremennye kompozitsionnye materialy* [Modern composite materials]. Moscow, Mir Publ., 1970 (in Russ.).
- [6] Kurbatov A.V., Lazarev P.I. Sposob polucheniya proektsii ob"ekta s pomoshch'yu pronikayushchego izlucheniya i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya [Method for achieving object projection by means of penetrating radiation and device for its realization]. Patent 2098797 RF. Appl. 30.11.1994, publ. 10.12.1997 (in Russ.).

- [7] Barzov A.A., Galinovskiy A.L., Abashin M.I. Physical processing features analysis of ultrajet diagnostics. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2012, no. 11. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-11-421 URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/technic/421.html> (in Russ.).
- [8] Bratukhina A.C., Petyukevich M.S., Kachaev A.A. [Study on borium ceramics microstructure obtained from borium with nano-additives]. *Perspektivy razvitiya fundamental'nykh nauk. Sb. nauch. tr. XI Mezhd. Konf. studentov i molodykh uchenykh* [Development prospects of fundamental sciences. Proc. XI conf. of students and young scientists]. Tomsk, Izd-vo TPU, 2014, pp. 918–920 (in Russ.).
- [9] Pletnev P.M., Nepochatov Yu.K., Malikova E.V., et al. Technology of producing corundum armor ceramics modified with complex additives. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2015, no. 3, pp. 40–49 (in Russ.).
- [10] Bochkarev S.V., Tsaplin A.I., Galinovskiy A.L., et al. Sposob diagnostiki kachestva konstruksionnykh materialov [Diagnostics method for quality of construction materials]. Patent 2518590 RF. Appl. 22.01.2013, publ. 10.06.2014 (in Russ.).
- [11] Galinovskiy A.L., Mulyar S.G., Khafizov M.V. Application of hybrid diagnostics to assess performance properties of structural ceramics. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2012, no. 9, pp. 65–69 (in Russ.).
- [12] termokeramika: company website. URL: <https://termokeramika.com> (accessed: 23.05.2019) (in Russ.).

Belov V.A. — Student, Department of Spacecraft and Launch Vehicles, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Radaeva V.D. — M. Sc. Student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Ternovskikh K.A. — Student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Galinovskiy A.L., Professor, Dr. Sc. (Pedag.), Dr. Sc. (Tech.), Head of Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.