

УДК 629.113.001

DOI: 10.18698/0536-1044-2018-4-28-34

Результаты испытания элементов крепления топливных коллекторов камеры сгорания газотурбинного двигателя НК-38СТ

А.В. Бакланов, С.П. Неумоин, А.Р. Вахитов

АО «Казанское моторостроительное производственное объединение», 420036, Казань, Российская Федерация, ул. Деметьева, д. 1

Trial Test Results on Intake Manifold Mounting Elements of the Combustion Chamber of the NK-38ST Gas Turbine Engine

A.V. Baklanov, S.P. Neumoin, A.R. Vakhitov

AO Kazan Motor-Building Production Association, 420036, Kazan, Russian Federation, Dementiev St., Bldg. 1



e-mail: andreybaklanov@bk.ru, sergei.neumoin@gmail.com, idar4v@gmail.com



Обеспечение надежной работы двигателей является актуальной задачей разработчиков. Описаны основные параметры и назначение газотурбинного двигателя НК-38СТ. Рассмотрен случай обрыва трубопроводов в системе крепления топливных коллекторов камеры сгорания двигателя НК-38СТ при проведении приемосдаточных испытаний. Представлена конструкция камеры сгорания с существующей системой крепления топливных коллекторов. По данным выполненного тензометрирования трубопроводов выявлены места возникновения повышенных механических напряжений. Установлено, что причиной повышенных напряжений в трубопроводах могла стать излишняя жесткость конструкции крепления топливных коллекторов к корпусу камеры сгорания, которая не позволяет компенсировать тепловые расширения газогенератора. Предложена новая конструкция системы крепления топливных коллекторов, в состав которой входят кронштейны со складными тягами. Приведены результаты испытаний новой системы, подтвердившие, что она является работоспособной и позволяет снизить уровень механических напряжений в трубопроводах в 1,6–13 раз.

Ключевые слова: топливный коллектор, система крепления, камера сгорания, газотурбинный двигатель, тензометрирование трубопроводов



Providing error-free performance is a pertinent issue to engine developers. The main parameters and application of the NK-38ST gas turbine engine are described in this article. A case of fuel pipe rupture in the intake manifold mounting system of the combustion chamber of the NK-38ST engine when conducting user acceptance testing is examined. The design of the combustion chamber with the existing intake manifold mounting system is presented. Using the strain-gage testing data, areas of increased mechanical stresses are identified. It is established that the reason for the occurrence of increased stresses in the fuel pipes can be excessive rigidity of the mounting structure that secures the intake manifold to the combustion chamber housing. This structure does not allow equilibrizing thermal expansion of the core engine. A new design for the intake manifold mounting system is proposed that comprises brackets with collapsible rods. Test results of the new system are

presented. The results confirm the efficiency of the new system and demonstrate a decrease in the level of mechanical stresses in the fuel pipes by 1.6–13 times.

Keywords: fuel manifold, mounting system, combustion chamber, gas turbine engine, fuel pipe strain-gaging

Современные тенденции развития газотурбинных двигателей (ГТД) и энергетических установок наземного применения, включая конвертируемые авиационные двигатели, обуславливают разработку тепловой машины с высокими параметрами термодинамического цикла, которая должна обеспечивать высокую надежность и большой ресурс в сочетании с эксплуатационной технологичностью и низкой себестоимостью [1]. К таким двигателям относится ГТД НК-38СТ, предназначенный для привода нагнетателей природного газа в составе газоперекачивающих агрегатов ГПА-Ц-16 НК-38, ГПА-16 «Волга» и имеющий высокие параметры термодинамического цикла [2].

Основные параметры ГТД НК-38СТ

Потребитель мощности	Нагнетатель
Мощность, МВт	16
Эффективный коэффициент полезного действия (ISO), %	38
Степень повышения давления	25,6
Расход топливного газа, кг/ч	3 420
Расход рабочего тела, кг/ч	187 200
Температура газа перед турбиной, °С	1 227
Частота вращения силовой турбины, мин ⁻¹	5 300
Температура газа на выходе из свободной турбины, °С	440

В процессе опытной эксплуатации ГТД НК-38СТ зафиксирован случай обрыва трубопроводов камеры сгорания (КС) (рис. 1), служащих для подачи топлива из коллекторов к горелкам, с последующей утечкой топлива из них в блок размещения двигателя, что могло привести

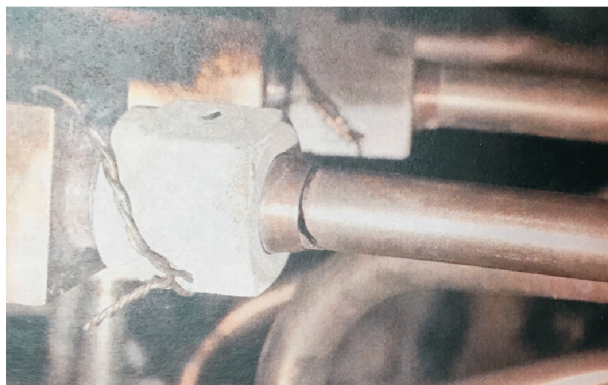


Рис. 1. Разрушение трубопроводов КС

к возникновению пожаро- и взрывоопасной ситуации на компрессорной станции. В связи с этим работы по обеспечению надежности топливной системы являются актуальными.

Цель работы — снижение напряжений в топливных коллекторах КС путем разработки новой системы их крепления.

Камера сгорания двигателя НК-38СТ имеет два топливных коллектора (рис. 2), прикрепленных к ее наружному корпусу с помощью кронштейнов, изготовленных из листа толщиной 4 мм. Коллекторы связаны с кронштейнами посредством бобышек, приваренных к трубе. Через штуцеры, расположенные на коллекторах, осуществляется раздача топлива по пристыкованным к ним трубопроводам. Последние в свою очередь соединены с горелками, к которым они подводят топливо от коллекторов [3, 4].

Для определения характера разрушения выполнено фрактографическое исследование, включавшее в себя визуальный осмотр под биноклем с многократным увеличением, фотографирование и анализ поверхности по месту разрушения.

Осмотр под биноклем (с 8–32-кратным увеличением) контактирующих поверхностей показал, что на наружной поверхности трубы в фокусе очага разрушения имеется механиче-

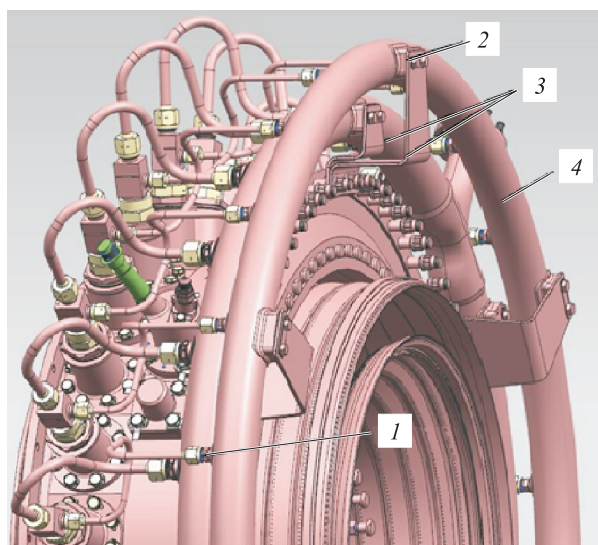
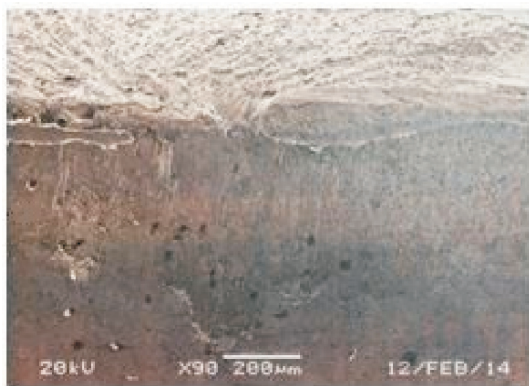
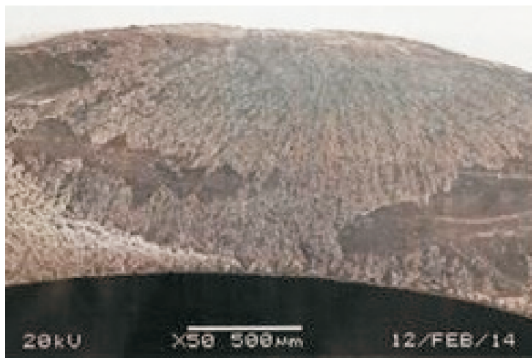


Рис. 2. Конструкция коллектора и его крепления для КС двигателя НК-38СТ: 1 — штуцер; 2 — бобышка; 3 — кронштейны; 4 — труба



а



б



в

Рис. 3. Вид излома (а), очага в изломе (б) и поверхности места разрушения (в)

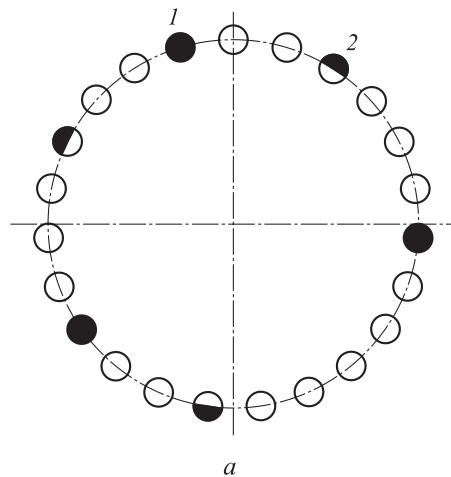
ское повреждение осевого направления в виде надиров (рис. 3).

Проведенная на растровом электронном микроскопе при 8–150-кратном увеличении оценка излома позволила установить, что излом по месту разрушения трубы усталостный, мел-

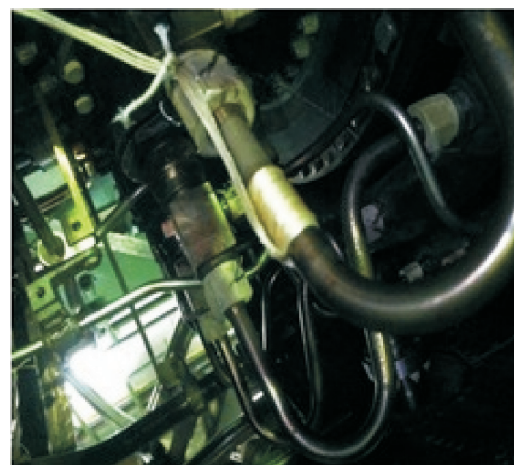
кокристаллический, с четко просматриваемым макроочагом на наружной поверхности. Далее разрушение идет в кольцевом направлении в обе стороны, зона дорыва расположена в диаметрально противоположной стороне от очага разрушения. Фокус в очаге разрушения имеет вид выступа на поверхности излома и находится на траектории надира.

Для определения причин обрыва трубопроводов в КС их препарировали тензодатчиками, схема размещения которых показана на рис. 4, после чего оценивали возникающие в трубопроводах механические напряжения при проведении приемосдаточных испытаний двигателя с существующей системой крепления коллекторов [5].

Для оценки механических напряжений в элементах конструкции КС использовали цифровой регистратор-анализатор динамических



а



б

Рис. 4. Размещение тензодатчиков на трубопроводах первого (1) и второго (2) контуров: а и б — схема и фрагмент ее воплощения в реальной конструкции

процессов МІС-300М, выпускаемый НПП «Ме-ра». Прибор предназначен для измерения и анализа сигналов тензодатчиков, устанавливаемых на элементы КС, а также для измерения других аналоговых сигналов в полосе частот до 28 000 Гц с амплитудой до 8,5 В [6].

В результате исследования установлено, что возникающие в процессе работы ГТД НК-38СТ механические напряжения в трубопроводах превышают предельно допустимое значение этого параметра ($\sigma_v = 195$ МПа) для стали 12Х18Н10Т, из которой они изготовлены [7]. Существующая конструкция коллекторов и их крепление не выполняют свои функции и не обеспечивают назначенный ресурс ГТД.

Причиной повышенных механических напряжений в трубопроводах могла стать излишняя жесткость конструкции крепления топливных коллекторов к корпусу КС, которая не позволяет компенсировать тепловые расширения газогенератора [8].

На основании изложенного разработана новая система крепления коллектора к наружному корпусу КС (рис. 5), где жесткие кронштейны заменены на кронштейны со складными тягами, у коллекторов убраны бобышки, а соединение коллектора с тягами выполнено посредством хомутов [9].

Отказ от использования бобышек также способствовал уменьшению коробления кол-

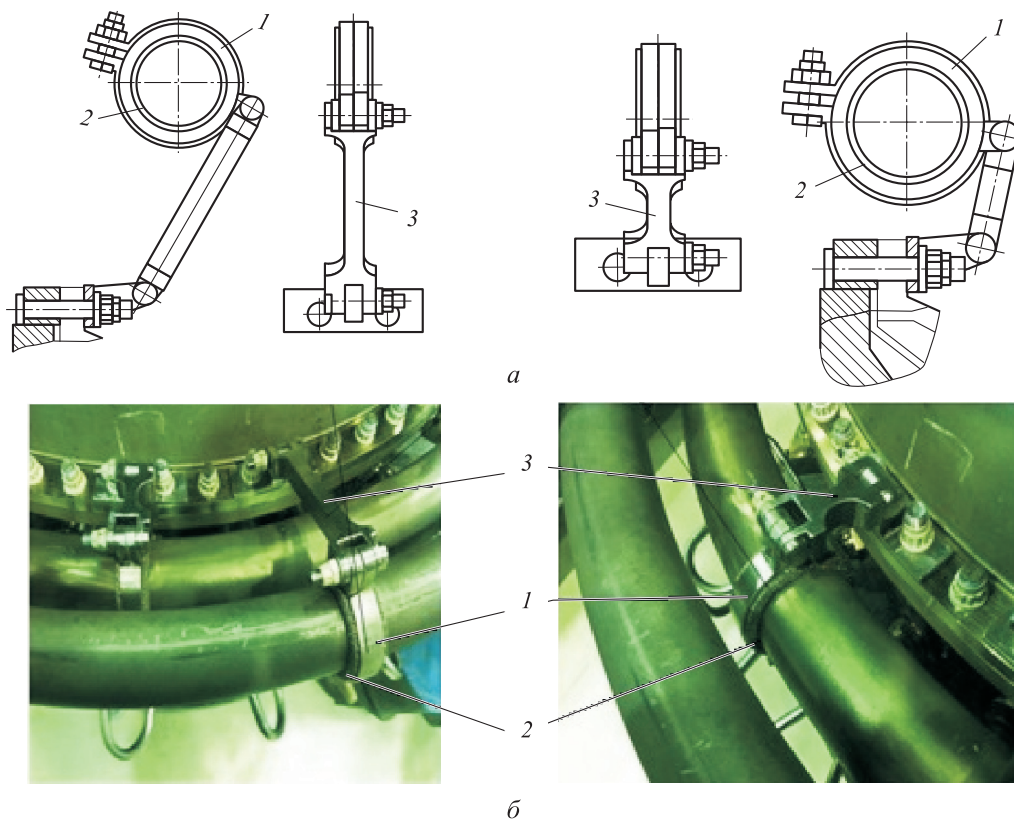


Рис. 5. Схемы (а) и внешний вид (б) новой системы крепления коллекторов к трубопроводам первого (слева) и второго (справа) контуров:

1 — хомуты; 2 — тяги; 3 — сойфериты из проволоки диаметром 0,09 мм из сплава ЭИ-708А-ВИ

Значения максимальных механических напряжений в трубопроводах для разных систем крепления коллекторов

Система крепления коллекторов	Напряжение $\sigma_{v,max}$, МПа, по номерам препарированных трубопроводов					
	первого контура			второго контура		
	16	23	7	3	13	20
Существующая	29,32	202,02	204,96	54,62	142,20	29,81
Новая	12,16	15,40	17,36	25,11	18,93	18,04

лекторов при сварке в процессе их изготовления. Вследствие коробления коллекторов приходилось выполнять индивидуальную подгонку каждого трубопровода, что является потенциальным источником возникновения монтажных напряжений.

Таким образом, применение подобной конструкции позволяет компенсировать тепловые расширения в процессе работы двигателя, а также уменьшить риск монтажа трубопровода с напряжением.

Для проверки эффективности внедренных конструктивных изменений по предотвращению обрыва трубопроводов в КС двигателя НК-38СТ их препарировали тензодатчиками, а затем оценивали напряжения, возникающие в трубопроводах при проведении приемосдаточных испытаний ГТД с новой системой крепления коллекторов [10].

Применение новой системы крепления коллекторов обеспечило снижение максимальных механических напряжений $\sigma_{v\max}$ в трубопроводах № 23 и 7 в 13 раз, № 16 и 3 в 2 раза, № 13 в 7 раз и № 20 в 1,6 раза (см. таблицу).

Выводы

1. Применение новой системы крепления коллекторов при проведении приемосдаточных испытаний ГТД НК-38СТ позволило снизить уровень механических напряжений в трубопроводах в 1,6...13 раз.

2. Предложенная система крепления коллекторов прошла проверку эксплуатационной наработкой, подтвердив назначенный ресурс и безопасность работы двигателя.

Литература

- [1] Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Малиновский К.А., Попов В.Г. *Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей*. Москва, Высшая школа, 2002. 355 с.
- [2] Гриценко Е.А., Данильченко В.П., Лукачев С.В., Резник В.Е., Цыбизов Ю.И. *Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения*. Самара, СНИЦ РАН, 2004. 266 с.
- [3] Маркушин А.Н., Бакланов А.В. Анализ применения различных концепций низкоэмиссионного горения на примере ГТД НК-38СТ. *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*, 2014, № 1, с. 16–22.
- [4] Бакланов А.В., Маркушин А.Н. К вопросу о горении и конструкции камер сгорания конвертированных газотурбинных двигателей. *Газотурбинные технологии*, 2015, № 4(131), с. 14–17.
- [5] Маркушин А.Н., Бакланов А.В. Испытательные стенды для исследования процессов и доводки низкоэмиссионных камер сгорания ГТД. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2013, № 3, с. 131–138.
- [6] MIC-300M. *Прибор для измерения, регистрации и анализа параметров вибрационных процессов. Руководство по эксплуатации*. URL: <http://www.nppmera.ru/assets/files/documentation/RE%20MIC-300M.pdf> (дата обращения 15 ноября 2017).
- [7] Рыжов С.Б., ред. *Стали и сплавы энергетического оборудования. Справочник*. Москва, Машиностроение, 2008. 960 с.
- [8] Маркушин А.Н., Бакланов А.В. Обеспечение надежности камеры сгорания на стадии проектирования и на всех этапах жизненного цикла ГТД. *Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики АНТЭ-2013. Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф.*, Казань, 19–21 ноября 2013 г., Казань, КГТУ им. А.Н. Туполева, 2013, с. 383–395.
- [9] Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. *Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. В 5 т. Т. 2. Общие сведения. Компрессоры. Камеры сгорания. Форсажные камеры. Турбины. Выходные устройства*. Москва, Машиностроение, 2008. 365 с.
- [10] Бакланов А.В., Маркушин А.Н. Исследование рабочего процесса камер сгорания в составе ГТД. *Вестник Самарского государственного технического университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2016, т. 15, № 3, с. 81–89.

References

- [1] Eliseev Iu.S., Krymor V.V., Malinovskii K.A., Popov V.G. *Tekhnologiya ekspluatatsii, diagnostiki i remonta gazoturbinykh dvigatelei* [Technology operation, diagnostics and repair of gas turbine engines]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 2002. 355 p.
- [2] Gritsenko E.A., Danil'chenko V.P., Lukachev S.V., Reznik V.E., Tsybizov Iu.I. *Konvertirovanie aviatsionnykh GTD v gazoturbinye ustanovki nazemnogo primeneniia* [Converting the aviation gas turbine engine in the gas turbine unit for terrestrial applications]. Samara, SNTs RAN publ., 2004. 266 p.
- [3] Markushin A.N., Baklanov A.V. Analiz primeneniia razlichnykh kontseptsii nizkoemissionnogo gorenii na primere GTD NK-38ST [Analysis of different low-emission burning concepts by way of example NK-38ST GAS turbine engine]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva* [Proceedings of Kazan Aviation Institute]. 2014, no. 1, pp. 16–22.
- [4] Baklanov A.V., Markushin A.N. K voprosu o gorenii i konstruktsii kamer sgoraniia konvertirovannykh gazoturbinykh dvigatelei [The issue of combustion and structure of combustion chambers of gas turbine engines converted]. *Gazoturbinye tekhnologii* [Gas turbine technology]. 2015, no. 4(131), pp. 14–17.
- [5] Markushin A.N., Baklanov A.V. Ispytatel'nye stendy dlia issledovaniia protsessov i dovodki nizkoemissionnykh kamer sgoraniia GTD [Test benches for researching the processes and operational development of low emission gas turbine engine combustion chambers]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaiia tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie* [Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering]. 2013, no. 3, pp. 131–138.
- [6] MIC-300M. *Pribor dlia izmereniia, registratsii i analiza parametrov vibratsionnykh protsessov. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [MIC-300M. The device for measuring, recording and analyzing the parameters of vibration processes. Manual]. Available at: <http://www.nppmera.ru/assets/files/documentation/RE%20MIC-300M.pdf> (accessed 15 November 2017).
- [7] *Stali i splavy energeticheskogo oborudovaniia. Spravochnik* [Steels and alloys of energy equipment. Reference]. Ed. Ryzhov S.B. Moscow, Mashinostroenie publ., 2008. 960 p.
- [8] Markushin A.N., Baklanov A.V. Obespechenie nadezhnosti kamery sgoraniia na stadii proektirovaniia i na vsekh etapakh zhiznennogo tsikla GTD [The reliability of the combustion chamber at design stage and at all stages of the life cycle of GTE]. *Problemy i perspektivy razvitiia aviatsii, nazemnogo transporta i energetiki ANTE-2013. Sb. dokl. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Problems and prospects of development of aviation, land transport and energy of the ANTE-2013. The collection of reports of International scientific-technical conference]. Kazan, 19–21 November 2013, Kazan, KSTU im. A.N. Tupoleva publ., 2013, pp. 383–395.
- [9] Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratskii V.L. *Osnovy konstruirovaniia aviatsionnykh dvigatelei i energeticheskikh ustanovok. V 5 t. T. 2. Obshchie svedeniia. Kompresory. Kamery sgoraniia. Forsazhnye kamery. Turbiny. Vykhodnye ustroistva* [Fundamentals of design of aircraft engines and power plants. In 5 vol. Vol. 2. General information. Compressors. Of the combustion chamber. The afterburner. Turbine. Output devices]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2008. 365 p.
- [10] Baklanov A.V., Markushin A.N. Issledovanie rabocheho protsessa kamer sgoraniia v sostave GTD [Study of the working process of the combustion chambers in the GTE]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaiia tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie* [Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering]. 2016, vol. 15, no. 3, pp. 81–89.

Статья поступила в редакцию 27.12.2017

Информация об авторах

БАКЛАНОВ Андрей Владимирович (Казань) — кандидат технических наук, начальник бюро камер сгорания. АО «Казанское моторостроительное производственное объединение» (420036, Казань, Российская Федерация, ул. Дементьева, д. 1, e-mail: andreybaklanov@bk.ru).

НЕУМОИН Сергей Петрович (Казань) — ведущий инженер-конструктор бюро камер сгорания. АО «Казанское моторостроительное производственное объединение» (420036, Казань, Российская Федерация, ул. Дементьева, д. 1, e-mail: sergei.neumoin@gmail.com).

ВАХИТОВ Айдар Рифович (Казань) — инженер-конструктор бюро камер сгорания. АО «Казанское моторостроительное производственное объединение» (420036, Казань, Российская Федерация, ул. Дементьева, д. 1, e-mail: idar4v@gmail.com).

Information about the authors

BAKLANOV Andrey Vladimirovich (Kazan) — Candidate of Science (Eng.), Head of Combustion Chamber Design Bureau. AO Kazan Motor-Building Production Association (420036, Kazan, Russian Federation, Dementiev St., Bldg. 1, e-mail: andreybaklanov@bk.ru).

NEUMOIN Sergey Petrovich (Kazan) — Principal Design Engineer, Combustion Chamber Design Bureau. AO Kazan Motor-Building Production Association (420036, Kazan, Russian Federation, Dementiev St., Bldg. 1, e-mail: sergei.neumoin@gmail.com).

VAKHITOV Aydar Rifovich (Kazan) — Design Engineer, Combustion Chamber Design Bureau. AO Kazan Motor-Building Production Association (420036, Kazan, Russian Federation, Dementiev St., Bldg. 1, e-mail: idar4v@gmail.com).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет 2-е издание монографии
под редакцией **А.С. Бугаева, С.И. Ивашова**

«Биорадиолокация»

Освещены вопросы радиолокации биологических объектов (биорадиолокации) — метода, который может быть использован для обнаружения живых людей, находящихся за преградами, и дистанционного определения параметров их дыхания и сердцебиения. Биорадиолокация может найти применение в различных областях: спасательных операциях, антитеррористической борьбе, медицине и др. Описаны физические основы процесса биорадиолокации, особенности биорадиолокаторов с непрерывным и импульсным зондирующими сигналами, а также методы расчета и моделирования процессов в биорадиолокации.

Для научных работников, аспирантов и студентов старших курсов.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru