

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВПРЫСКА ВОДЫ НА ПАРАМЕТРЫ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Г.Н. Бурцев¹

В.В. Рунько¹

v_runko@bk.ru

Н.В. Шлейников¹

Д.В. Шевелев²

denis.v.shevelev@gmail.com

Н.В. Гридчин²

¹ Калужское опытное бюро моторостроения, г. Калуга, Российская Федерация

² Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Калуга, Российская Федерация

Аннотация

Приведены результаты экспериментального исследования влияния впрыска воды на параметры одновальной газотурбинной установки простого цикла. Впрыск осуществлен за компрессором — перед камерой сгорания на режимах холостого хода, 50 и 90 % нагрузки. В ходе эксперимента в зависимости от количества впрыскиваемой воды определены расход топлива, температура газа за турбиной, вибрационные и эмиссионные характеристики двигателя. Система автоматического управления двигателем поддерживала постоянную мощность и обороты двигателя. Установлено, что впрыск воды уменьшает потребную начальную температуру газа перед турбиной на 1,5...2 % на один процент (от расхода воздуха) впрыскиваемой воды; увеличивает удельный расход топлива на 1,5...2 % на один процент впрыскиваемой воды. Заметного влияния на вибрационные и эмиссионные характеристики двигателя не выявлено. При условии поддержания постоянной начальной температуры газа перед турбиной следует ожидать увеличения мощности газотурбинной установки на 5...5,8 % на один процент впрыскиваемой воды

Ключевые слова

Микрогазотурбинная установка, впрыск воды, простой цикл, мощность, экспериментальное исследование

Поступила в редакцию 16.11.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Введение. К категории газотурбинных установок малой мощности (микроГТУ) относят установки мощностью от 20 до 350 кВт. Благодаря малым размерам и массе, быстрому запуску, простоте эксплуатации, возможности параллельной выработки электроэнергии и теплоты микроГТУ имеют широкую область применения: резервные и пиковые источники электрической энергии, механический привод, автономные когенерационные установки.

К числу возможных требований, предъявляемых к микроГТУ, относится возможность форсирования — кратковременного увеличения мощности [1].

Это бывает необходимо для поддержания номинальной мощности при высоких температурах окружающей среды, для компенсации пиковых нагрузок.

Одним из возможных способов форсирования ГТУ является впрыск воды в проточную часть двигателя [2–4]. Известны энергетические установки с впрыском воды на входе и между каскадами компрессора, где с его помощью осуществляется испарительное охлаждение рабочего тела [5]. Уменьшение температуры воздуха перед компрессором или между его каскадами снижает мощность, необходимую для его привода, что увеличивает полезную мощность всей установки.

В случае микроГТУ осуществлять испарительное охлаждение рабочего тела затруднительно ввиду конструктивных особенностей. Газотурбинные установки малой мощности, как правило, выполняются по одновальной схеме и включают в себя одноступенчатый центробежный компрессор, кольцевую или индивидуальную камеру сгорания и одноступенчатую осевую или центростремительную турбину. Полезная нагрузка — электрогенератор — находится на одном валу с компрессором. Испарительное охлаждение воздуха на входе в компрессор микроГТУ возможно, однако требует протяженной проточной части входного устройства для обеспечения полного испарения впрыскиваемой воды перед рабочим колесом компрессора. Это увеличивает размеры и массу всей установки, что нивелирует одно из ключевых достоинств микроГТУ.

Альтернативой впрыску воды на входе в ГТУ является впрыск воды за компрессором — перед камерой сгорания. В этом случае впрыскиваемая вода, испаряясь, играет роль добавочного рабочего тела — пара. Увеличение массового расхода и изменение теплофизических свойств рабочего тела, проходящего через турбину, увеличивают мощность газотурбинной установки.

Объект исследования. В Калужском опытном бюро моторостроения создан экспериментальный стенд по исследованию влияния впрыска воды на параметры микроГТУ. Цель испытаний — определение характеристик двигателя, соответствия его мощностных и энергетических параметров расчетным.

Объектом исследования являлся серийный двигатель 9И56 одновальной конструкции, включающий в себя одноступенчатый центробежный компрессор, индивидуальную выносную камеру сгорания с тангенциальным расположением жаровой трубы, одноступенчатую осевую турбину. Полезная нагрузка — электрогенератор (устанавливается через понижающий редуктор).

Номинальные параметры двигателя без впрыска воды приведены в табл. 1.

Таблица 1

Номинальные параметры газотурбинного двигателя 9И56

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Номинальная мощность	N_e	кВт	100
Расход воздуха	$G_{\text{возд}}$	кг/с	1,5
Степень повышения давления в компрессоре	π_k^*	–	3,3

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Адиабатный КПД компрессора	η_k^*	–	0,77
Коэффициент восстановления полного давления в камере сгорания	σ_{kc}	–	0,95
Температура газа перед турбиной	T_3^*	К	905
Адиабатный КПД турбины	η_T^*	–	0,84
Частота вращения вала двигателя	n	об/мин	8000
Удельный максимальный расход топлива	$c_{уд}$	кг/(кВт·ч)	0,843
Топливо	–	–	Дизельное, ГОСТ 305–82

Для проведения исследований влияния впрыска воды на параметры двигателя, он был оборудован системой впрыска воды, включающей в себя три распыливающие форсунки, установленные в переходном патрубке между компрессором и камерой сгорания на расстоянии 250 мм от входа в камеру сгорания, трубопроводами с запорной и измерительной аппаратурой и системой водоподготовки. Измерение температуры паровоздушной смеси на входе в камеру сго-

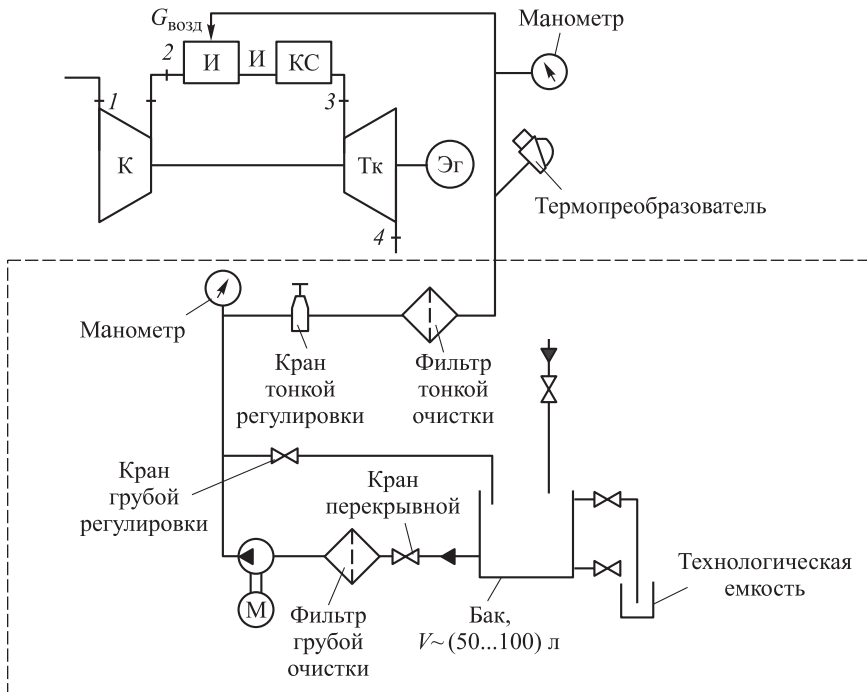


Рис. 1. Схема микроГТУ с впрыском воды за компрессором (К) и система водоподготовки:

И — измерительная аппаратура; КС — камера сгорания; Тк — турбина; Эг — электрогенератор;
1–4 — точки измерения

рания производилось термopарами, установленными на расстоянии 200 мм от распыливающих форсунок.

Схема установки представлена на рис. 1.

Экспериментальный стенд был оснащен комплектом контрольно-измерительного оборудования, список основных регистрируемых параметров приведен в табл. 2.

Таблица 2

Перечень основных регистрируемых параметров

Измеряемый параметр	Условное обозначение	Число точек измерения	Пределы измерения	Погрешность измерения
Барометрическое давление, мм рт. ст.	B_0	1	700–780	$\pm 0,5$
Температура воздуха на входе в компрессор (под маслорадиатором), °С	t_1^*	6	-50...+50	± 1
Давление воздуха на выходе из компрессора, кг/см ²	p_2^*	2	0–4	$\pm 0,3$ % ВП
Температура воздуха на выходе из компрессора, °С	t_2^*	4	0–400	$\pm 0,3$ % ВП
Температура на выходе из турбины, °С	t_4^*	4	0–900	$\pm 0,3$ % ВП
Давление воздуха на входе в КС, кг/см ²	$p_{и}^*$	1	0–4	$\pm 0,3$ % ВП
Температура воздуха на входе в КС, °С	$t_{и}^*$	1	0–700	$\pm 0,3$ % ВП
Частота вращения ротора турбокомпрессора, % $n_{ном}$	$n_{ш}$	1	0...–44000	$\pm 0,5$ %
Активная мощность на клеммах двух приводных генераторов С-75 по каждой из трех фаз, кВт	N_e , фаза А	2	0–20	$\pm 0,5$
	N_e , фаза В	2		
	N_e , фаза С	2		
Эмиссия NO _x , CO, мг/м ³	CI(NO _x)	1	–	20 %
	EI(CO)	1	–	20 %
Концентрация O ₂ в выхлопных газах, %	C(O ₂)	1	–	5 %
Уровень вибраций на корпусе компрессора, g	g	1	0–4	± 15 % ВП
Время измерения расхода топлива, с	τ_p	1	200–300	$\pm 0,2$
Масса израсходованного топлива за время измерения, г	G_T	1	4000–5000	± 10

Методика проведения и результаты испытаний. Испытания проводились по разработанной методике в четыре этапа.

Этап 1. Определение базовых параметров ГТД на режимах холостого хода, 50 и 90 % нагрузки.

Этапы 2–4. Определение параметров ГТД при впрыске воды с массовым содержанием $g_{\text{вод}} = 1, 2$ и 3 % расхода воздуха через двигатель соответственно.

Особенностью штатной системы управления двигателем 9И56 является поддержание постоянных оборотов и мощности двигателя на каждом из рабочих режимов путем изменения расхода топлива. Таким образом, исследование влияния впрыска воды на параметры двигателя было возможно только за счет анализа изменения температуры газа на выходе из турбины T_4^* .

Результаты измерений приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерений параметров двигателя на режиме $N_e = 90$ кВт

Параметр	Условное обозначение	Количество впрыскиваемой воды, г/с			
Степень повышения давления в компрессоре	π_k	3,06	3,06	3,06	3,06
Температура воздуха на входе в компрессор, К	T_1^*	299	299	300	300
Температура воздуха на выходе из компрессора, К	T_2^*	475	475	464	465
Температура воздуха на входе в камеру сгорания, К	$T_{И}^*$	475	460	456	420
Температура на выходе из турбины, К	T_4^*	913	883	883	873
Частота вращения ротора турбокомпрессора, % $n_{\text{ном}}$	$n_{\text{ном}}$	100	100	100	100
Эмиссия NO_x , CO , мг/м ³	$\text{CI}(\text{NO}_x)$	27	29	32	33
	$\text{EI}(\text{CO})$	45	32	30	26
Концентрация O_2 в выхлопных газах, %	$\text{C}(\text{O}_2)$	19,3	19,4	19,3	19,3
Уровень вибраций на корпусе компрессора, g	g	1,5	1,5	1,5	1,5
Удельный расход топлива, кг/(кВт·ч)	τ_p	0,91950	0,9302	0,9756	1,0526

Впрыск воды за компрессором приводит к уменьшению температуры воздуха перед камерой сгорания. Зависимость снижения температуры воздуха перед камерой сгорания от относительного количества впрыскиваемой воды приведена на рис. 2. Расчетная зависимость (сплошная линия) построена, исходя из условия полного испарения впрыскиваемой воды. Экспериментально полученная величина охлаждения воздуха, как видно на рисунке, меньше расчетной.

Это объясняется, по-видимому, тем, что впрыскиваемая вода не успевает полностью испариться в переходном патрубке до места установки термопар измерения температуры парогазовой смеси на входе в камеру сгорания.

Экспериментальная зависимость температуры газа за турбиной от относительного количества впрыскиваемой воды приведена на рис. 3.

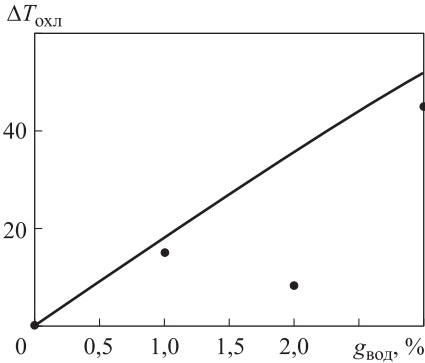


Рис. 2. Зависимость величины охлаждения воздуха перед камерой сгорания от количества впрыскиваемой воды (• — эксперимент, — — теория)

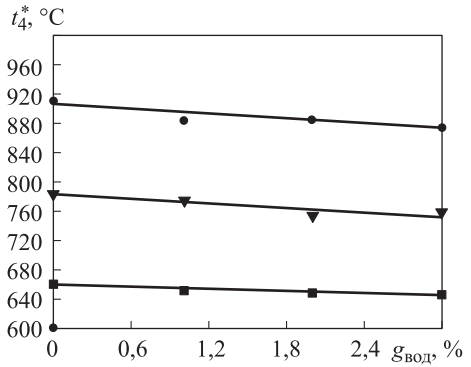


Рис. 3. Зависимость температуры газа на выходе из турбины от количества впрыскиваемой воды (■ — холодной ход, ▼ — 50 кВт, • — 90 кВт)

Впрыск воды за компрессором уменьшает температуру газов за турбиной. Это объясняется тем, что увеличение расхода и изменение теплофизических свойств рабочего тела увеличивает мощность турбины ГТУ, что заставляет САУ двигателя, работающую по программе $N_e = \text{const}, n = \text{const}$, снижать начальную температуру газа T_3^* .

На рис. 4 приведена зависимость удельного расхода топлива от относительного количества впрыскиваемой воды. Впрыск воды уменьшает топливную экономичность двигателя. Во-первых, это объясняется понижением температуры воздуха перед камерой сгорания, во-вторых, снижением САУ начальной температуры газа T_3^* , что ухудшает термический КПД цикла.

На рис. 5 представлена зависимость относительного изменения удельного расхода топлива от относительного количества впрыскиваемой воды на трех режимах работы двигателя.

При условии поддержания постоянной температуры газа перед турбиной ($T_3^* = \text{const}$) впрыск воды перед камерой сгорания привел бы к форсированию двигателя — увеличению его полезной мощности. Оценим это увеличение мощ-

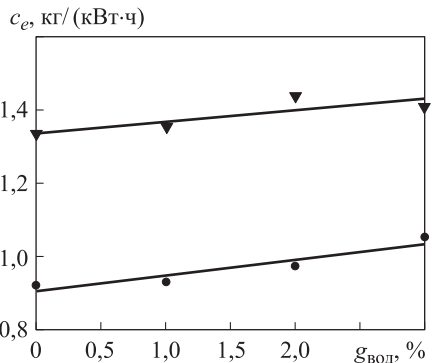


Рис. 4. Зависимость удельного расхода топлива от количества впрыскиваемой воды (▼ — 50 кВт, • — 90 кВт)

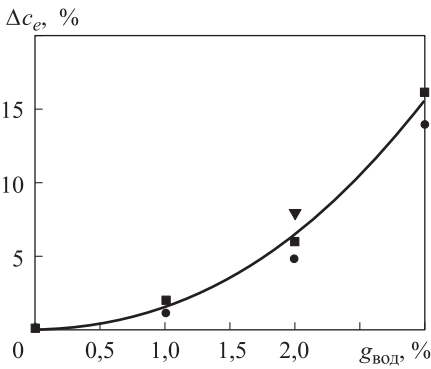


Рис. 5. Относительное изменение удельного расхода топлива от количества впрыскиваемой воды (● — 90 кВт, ▼ — 50 кВт, ■ — холостой ход)

ности термодинамическим расчетом, методика которого изложена в [2, 3]. Впрыск воды перед камерой сгорания компрессора приводит к увеличению расхода топлива, а следовательно, и расхода газа на входе в турбину и изменению его теплофизических свойств. Так, впрыск 1 % воды увеличивает расход газа на входе в турбину на величину $\sim 1,1$ %, а его теплоемкость — на 1 %. Это приводит к увеличению мощности турбины ГТУ на величину ~ 2 %. Для параметров двигателя 9И56 это означает рост мощности турбины от 333 до 339 кВт. Полезную мощность на валу ГТУ получаем, учитывая мощность, потребляемую компрессором

(230 кВт), величина которой в данном случае не зависит от количества впрыскиваемой воды. Таким образом, мощность ГТУ при впрыске воды в количестве 1 % перед камерой сгорания увеличивается от 103 до 109 кВт, т. е. на 5,8 %.

Выводы. Экспериментально установлено, что впрыск воды перед камерой сгорания одновальной микроГТУ в количестве до 3 % расхода воздуха уменьшает на 1,5...2 % потребную начальную температуру газа перед турбиной; увеличивает на 1,5...2 % удельный расход топлива; практически не влияет на эмиссионные и вибрационные характеристики двигателя; увеличивает мощность газотурбинной установки на ~ 5 ...5,8 % на один процент впрыскиваемой воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Троицкий Н.И., Хакимов Х.Х. Анализ возможных путей кратковременного форсирования ГТД на примере вспомогательного газотурбинного агрегата // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. № 5. С. 93–103. DOI: 10.7463/0516.0840406 URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/840406.html>
2. Гридчин Н.В., Жинов А.А., Землянский А.В. Исследование испарительного охлаждения рабочего тела в проточной части когенерационной газотурбинной установки // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2012. № 1. С. 87–81.
3. Шевелев Д.В., Гридчин Н.В. Влияние испарительного охлаждения рабочего тела на удельные параметры газотурбинных установок малой мощности // Фундаментальные исследования. 2016. № 4-2. С. 333–338. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=40177>
4. Lee J.J., Jeon M.S., Kim T.S. The influence of water and steam injection on the performance of a recuperated cycle microturbine for combined heat and power application // Applied Energy. 2010. Vol. 87. No. 4. P. 1307–1316. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.07.012 URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261909003018>
5. De Biasi V. LM6000 sprint design enhanced to increase power and efficiency // Gas Turbine World. 2000. Vol. 30. No. 4. P. 16–19.

Бурцев Геннадий Николаевич — начальник отдела турбокомпрессоров АО «Калужское опытное бюро моторостроения» (АО «КОБМ») (Российская Федерация, 248021, г. Калуга, ул. Московская, д. 247).

Рунько Виктор Викторович — ведущий инженер АО «Калужское опытное бюро моторостроения» (АО «КОБМ») (Российская Федерация, 248021, г. Калуга, ул. Московская, д. 247).

Шлейников Николай Вячеславович — канд. техн. наук, генеральный директор-главный конструктор АО «Калужское опытное бюро моторостроения» (АО «КОБМ») (Российская Федерация, 248021, г. Калуга, ул. Московская, д. 247).

Шевелев Денис Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Тепловые двигатели и теплофизика» Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2).

Гридчин Николай Викторович — старший преподаватель кафедры «Тепловые двигатели и теплофизика» Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Бурцев Г.Н., Рунько В.В., Шлейников Н.В., Шевелев Д.В., Гридчин Н.В. Экспериментальное исследование влияния впрыска воды на параметры газотурбинной установки малой мощности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 5. С. 122–131. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-5-122-131

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF WATER INJECTION ON LOW-POWER GAS TURBINE PLANT PARAMETERS

G.N. Burtsev¹

V.V. Run'ko¹

v_runko@bk.ru

N.V. Shleynikov¹

D.V. Shevelev²

denis.v.shevelev@gmail.com

N.V. Gridchin²

¹ Kaluga Mechanical Engineering Experimental Office (KOBM) JSC,
Kaluga, Russian Federation

² Kaluga Branch, Bauman Moscow State Technical University,
Kaluga, Russian Federation

Abstract

The article presents experimental investigation results for the effect that water injection has on the parameters of a single-shaft simple-cycle gas turbine plant. The injection happens after the compressor, before the combustion chamber for idle speed, 50 % and 90 % load modes. Over the course of the experiment we determined the following parameters as functions of the water amount injected: fuel

Keywords

Micro gas turbine, water injection, simple cycle, performance, experimental investigation

consumption, turbine outlet temperature, vibration and emission engine characteristics. An automatic engine control system kept the engine power and speed constant. We determined that water injection decreases the required initial turbine inlet temperature by 1,5...2 % per one percent (of air consumption) of water injected and increases specific fuel consumption by 1,5...2 % per one percent of water injected. We detected no measurable effect on vibration and emission engine characteristics. If the initial turbine inlet temperature remains constant, we can expect an increase in the gas turbine power of 5...5,8 % per one percent of water injected

REFERENCES

- [1] Troitskiy N.I., Khakimov Kh.Kh. Analysing the possible ways for short-term forcing gas turbine engines in auxiliary power unit. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MG TU im. N.E. Baumana* [Science and Education: Scientific Publication of BMSTU], 2016, no. 5, pp. 93–103 (in Russ.). DOI: 10.7463/0516.0840406
Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/840406.html>
- [2] Gridchin N.V., Zhinov A.A., Zemlyanskiy A.V. Study of evaporative cooling of working fluid in flow path of cogeneration gas-turbine plant. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2012, no. 1, pp. 87–81 (in Russ.).
- [3] Shevelev D.V., Gridchin N.V. The investigation of evaporative cooling of the actuating medium on the performance of gas microturbine. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2016, no. 4-2, pp. 333–338 (in Russ.).
Available at: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=40177>
- [4] Lee J.J., Jeon M.S., Kim T.S. The influence of water and steam injection on the performance of a recuperated cycle microturbine for combined heat and power application. *Applied Energy*, 2010, vol. 87, no. 4, pp. 1307–1316 (in Russ.). DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.07.012
Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261909003018>
- [5] De Biasi V. LM6000 sprint design enhanced to increase power and efficiency. *Gas Turbine World*, 2000, vol. 30, no. 4, pp. 16–19.

Burtsev G.N. — Head of Turbocompressor Department, Kaluga Mechanical Engineering Experimental Office (KOBM) JSC (Moskovskaya ul. 247, Kaluga, 248021 Russian Federation).

Run'ko V.V. — Leading Engineer, Kaluga Mechanical Engineering Experimental Office (KOBM) JSC (Moskovskaya ul. 247, Kaluga, 248021 Russian Federation).

Shleynikov N.V. — Cand. Sc. (Eng.), Director General, Chief Design Officer, Kaluga Mechanical Engineering Experimental Office (KOBM) JSC (Moskovskaya ul. 247, Kaluga, 248021 Russian Federation).

Shevelev D.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Heat Engines and Thermal Physics Department, Kaluga Branch, Bauman Moscow State Technical University (Bazhenova ul. 2, Kaluga, 248000 Russian Federation).

Gridchin N.V. — Assist. Professor, Heat Engines and Thermal Physics Department, Kaluga Branch, Bauman Moscow State Technical University (Bazhenova ul. 2, Kaluga, 248000 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Burtsev G.N., Run'ko V.V., Shleynikov N.V., Shevelev D.V., Gridchin N.V. Experimental Investigation of the Effect of Water Injection on Low-Power Gas Turbine Plant Parameters. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2017, no. 5, pp. 122–131.

DOI: 10.18698/0236-3941-2017-5-122-131



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие
автора **Л.Н. Лысенко**

«Наведение баллистических ракет»

Изложены научные и методологические основы наведения баллистических ракет. Рассмотрены вопросы программирования движения (задачи наведения) и информационно-навигационного обеспечения управления (задачи навигации), а также проблемы определения точности стрельбы (задачи оценки точности возмущенного движения). Показаны направления решений соответствующих задач при создании ракетных комплексов тактического, оперативно-тактического и стратегического назначения, возможные пути совершенствования баллистико-навигационного обеспечения полета ракет указанных классов.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru