

Теоретическая и практическая реализация перспективной технологии термического бурения горных пород

А.И. Мустейкис¹, А.А. Левихин¹, К.Ю. Анистратов²✉

¹Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация
✉ anistratov_k@mail.ru

Резюме: В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований применения газогенератора ракетного двигателя для создания устройства термического бурения твердых горных пород. Основным отличием исследуемого устройства от традиционных термобуров является относительно невысокая температура рабочего тела. Экспериментально показано, что данный уровень температуры рабочего тела обеспечивает устойчивый процесс термического разрушения породы и одновременно длительный ресурс конструкции. Разработанный математический аппарат позволяет подбирать параметры устройства для различных типов горных пород. Предложен концепт реактивной буровой установки для бурения взрывных скважин на открытых горных работах. Эта установка мобильна, не требует тяжелого основания и подготовки буровой площадки, имеет высокий коэффициент технического использования и длительный срок эксплуатации, в качестве компонентов топлива используются широко распространённые компоненты (воздух, вода, керосин, дизельное топливо).

Ключевые слова: реактивный буровой аппарат, конверсия, термобур, реактивный буровой комплекс, газогенератор, термическое бурение

Для цитирования: Мустейкис А.И., Левихин А.А., Анистратов К.Ю. Теоретическая и практическая реализация перспективной технологии термического бурения горных пород. *Горная промышленность*. 2021;(2):90–94. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-2-90-94.

Theoretical and practical realisation of perspective thermal spallation drilling technology

A.I. Musteykis¹, A.A. Levikhin¹, K.Yu. Anistratov²✉

¹Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, St. Petersburg, Russian Federation

²Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation
✉ anistratov_k@mail.ru

Abstract: The article presents the results of theoretical and experimental studies of the conversional use of a rocket engine gas generator to create a device for thermal spallation drilling of solid rocks. The main difference between the studied device and traditional thermal drills is the relatively low temperature of the working fluid. It has been experimentally shown that this level of temperature of the working fluid provides a stable process of thermal spallation of the rock and at the same time a long life of the structure. The developed mathematical apparatus allows to select device parameters for various types of rocks. The concept of a jet drilling rig for drilling blast holes in open pit mines is proposed. This unit is mobile, does not require a heavy basement and preparation of the drilling site; it is characterized with a high utilization factor and a long service life, and uses widely available components (air, water, kerosene, diesel fuel) as fuel components.

Keywords: jet drill, conversion, thermal drill, jet drilling rig, gas generator, thermal spallation drilling

For citation: Musteykis A.I., Levikhin A.A., Anistratov K.Yu. Theoretical and practical realisation of perspective thermal spallation drilling technology. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2021;(2):90–94. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2021-2-90-94.

Введение

Бурение – один из самых энергоёмких процессов открытых горных работ. На крупных карьерах затраты на буровзрывные работы достигают 30% от общих затрат на добычу [1].

Буровые станки, применяемые в современной практике бурения взрывных скважин, по способу бурения подразделяются на пять основных типов (табл. 1) [2].

Наиболее распространенным на сегодняшний день является механический способ бурения: вращательное бурение, осуществляемое шарошечными долотами, и ударно-вращательное, осуществляемое погружными пневмоударниками [3]. Среди прочих способов бурения выделим способ термического бурения путем высоко-температурного теплового воздействия на породу стру-

Таблица 1
Область применения и типы буровых станков

Table 1
Applications and types of drilling rigs

Способ бурения	Тип пород, условия применения	Диаметр скважин, мм	Типы буровых станков
Вращательное бурение режущими коронками с очисткой шнеками	В плотных и полускальных породах крепостью $f=1-8$	160–200	Буровые станки типа СБР
Вращательное бурение шарошечными долотами с очисткой сжатым воздухом	В скальных породах крепостью $f=6-18$, при большом объеме бурения	160–406	Буровые станки шарошечного типа СБШ
Ударно-вращательное бурение с погружными пневмударниками и бурение с верхним расположением гидроперфоратора	В скальных породах крепостью $f=10-20$	100–300	Буровые станки с погружными пневмударниками типа СБУ Буровые станки с гидроперфораторами
Огневое бурение	В чрезвычайно крепких породах крепостью $f \geq 14$ с кристаллической структурой	До 600	Буровые станки типа СБО
Ударно-канатное бурение	В сильнотрещиноватых или закарстованных породах, где бурение возможно только с обсадными трубами	450–1200	Буровые станки типа БС

ями продуктов сгорания керосина и кислорода или воздуха [4; 5].

Перспективы совершенствования технологии горных работ в значительной мере связаны с развитием способов высокоэффективного разрушения горных пород при термическом бурении скважин на основе интеграции тепловых и газодинамических методов бурения [4; 6].

С точки зрения величины удельной энергии, которую необходимо подвести к скальным породам для их разрушения, термический способ бурения оказывается более выгодным по сравнению с механическим [7].

Преимуществом термического способа бурения перед механическим также является отсутствие непосредственного контакта бурового инструмента (горелки) с породой, что теоретически должно обеспечивать отсутствие износа инструмента, характерного для механического способа. Однако в классическом термическом способе бурения («огневом» бурении) используются газовые струи высокой температуры – 1600–2800 °С. При подобных температурах буровой инструмент имеет крайне низкую стойкость.

Термическое бурение реактивной горячей струей реализует принцип разрушения шелушением за счет растягивающих напряжений. Предел прочности пород на растяжение в 7–10 раз меньше предела прочности на сжатие. Таким образом, энергопоглощение при термическом бурении на порядок меньше.

Устройства термического бурения

Существующие устройства термического бурения обладают крайне низким ресурсом, что обусловлено высокой температурой рабочего тела, которая близка к температуре неохлажденных продуктов сгорания компонентов топлива и составляет от 1900 до 3200 К [7, 8]. При этом, как показывают исследования, например [7], температура разрушения крепких горных пород находится в пределах 670–900 К.

Реализовать потенциал подобных устройств возможно снижением температуры рабочего тела до уровня, обеспечивающего процесс разрушения породы и одновременно длительную термическую стойкость конструкции [9].

Диапазон температуры рабочего тела для разрушения крепких горных пород может быть определен следующим образом.

Нижняя граница диапазона температуры рабочего тела определяется как температура разрушения породы [10]:

$$T_p = \frac{2\sigma_c(1-\mu)}{\beta \cdot E},$$

где σ_c – предел прочности на сжатие; μ – коэффициент Пуассона; β – коэффициент теплового расширения; E – модуль Юнга.

Верхнее значение диапазона температуры рабочего тела определяется наименьшей из температур: характерных тепловых эффектов Тэф в материале породы (плавление, диссоциация, дегидратация и т.п.) и из максимальной температуры длительной термической прочности материала конструкции аппарата ТМАХ ДОП. Конструкция аппарата по возможности должна изготавливаться из распространенных конструкционных материалов.

Характерные значения границ диапазона температур приведены в табл. 2.

Таблица 2
Характерные значения температур для различных материалов

Table 2
Typical temperature values for different materials

Порода	T_p , К	$T_{эф}$, К	Материал конструкции	$T_{МАХ доп}$, К
Кварцит	500–600	1700	12Х18Н10Т	1073
Граниты, гнейс	600–800	1700	10Х23Н18	1273

Для получения высокотемпературного рабочего тела в традиционных инструментах термического бурения используются два компонента: горючее – жидкие углеводородные горючие типа керосина или дизельного топлива; окислитель – газообразный кислород или воздух.

В реактивном буровом аппарате (РБА) для получения рабочего тела с требуемой температурой, которая существенно ниже температуры продуктов полного сгорания керосина с воздухом или кислородом, используется трехкомпонентный парогазогенератор (ПГГ).

Трехкомпонентный ПГГ (рис. 1) представляет собой устройство на основе малогабаритной камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя, в котором реализуется впрыск хладагента (воды или воздуха), прошедшего рубашку охлаждения камеры сгорания 2, через ряд отверстий 4 в поток высокотемпературных продуктов сгорания. Это позволяет получать на выходе ПГГ, после взаимодействия хладагента с продуктами сгорания в испарительной части 3, рабочее тело с требуемой температурой. Испарительная часть камеры сгорания имеет на конце резьбу для

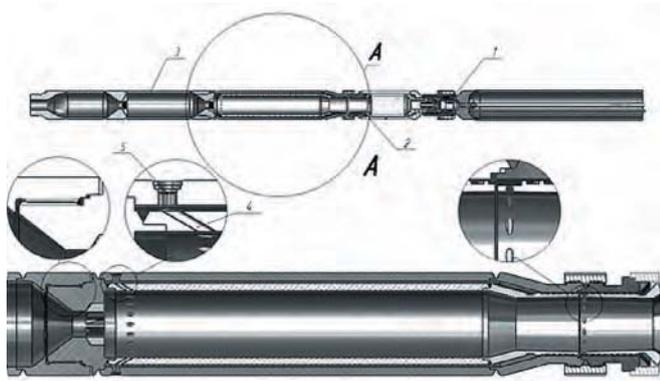


Рис. 1
Конструкция ПГГ:
 1 – запальное устройство;
 2 – КС;
 3 – испарительная часть КС;
 4 – калиброванные отверстия для подачи хладагента;
 5 – отверстия для подачи хладагента в окружающее пространство

Fig. 1
Steam-and-gas generator design:
 1 – ignition device;
 2 – combustion chamber;
 3 – evaporating section of the combustion chamber;
 4 – calibrated holes for the coolant supply;
 5 – holes for the coolant supply into the surrounding space

Таблица 3
Параметры ПГГ

Параметр	Диапазон значений
Давление в камере, МПа	1–20
Массовый расход рабочего тела, кг/с	0,6–1,3
Температура рабочего тела, °С	500–800

Table 3
Steam-and-gas generator specifications

стыковки со сменной сопловой головкой. Далее струи рабочего тела, истекающие через сопловую буровую головку, взаимодействуют с породой. На конструкцию ПГГ получен патент РФ на полезную модель [11].

ПГГ разработан для достижения следующего диапазона параметров рабочего тела (табл. 3).

Схема бурения скважины с применением РБА представлена на рис. 2.

Рабочее тело бурового инструмента должно обладать необходимой температурой, которая должна изменяться в достаточно узком диапазоне, а также быть экологически безопасным. Достичь этого в реактивном двигателе позволяет использование третьего компонента (хладагента), не участвующего в химических реакциях, но позволяющего получить рабочее тело с необходимыми параметрами [12]. Схема организации процесса близка при этом к схеме работы газогенератора жидкостного ракетного двигателя [13].

Для исследования возможности реализации описанной выше схемы бурового инструмента на кафедре «Двигатели и энергоустановки ЛА» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова создан и конструктивно проработан реактивный буровой аппарат (РБА), обеспечивающий получение рабочего тела с требуемыми физико-химическими характеристиками (рис. 1 и 2) [11].

РБА, состоящий из ПГГ 1 и буровой головки 2, центрируется и уплотняется в куполе 3 с помощью сальника 4. Шлам и отработанный парогаз, образующиеся в процессе бурения, через отвод на куполе попадают в систему шламоудаления, состоящую из адсорбирующего циклона, фильтра и теплообменника для утилизации тепла. Небольшая глубина бурения, характерная для взрывных скважин, позволяет бурить каждую скважину за одну операцию

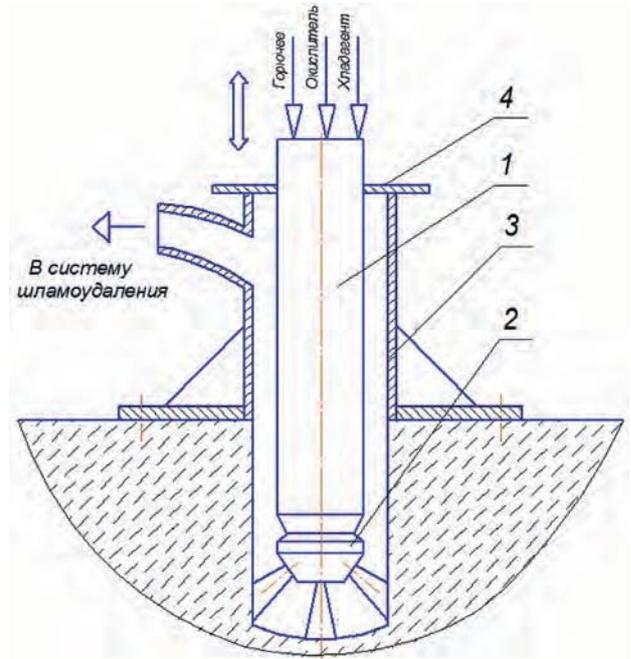


Рис. 2
Схема способа бурения с применением РБА

Fig. 2
Schematic diagram of the jet drilling method

без дополнительных монтажно-стыковочных работ. Это позволяет использовать стандартные гибкие рукава для подачи компонентов, что существенно упрощает систему питания и управления РБА, а также снижает суммарное время, необходимое для бурения и обвязки скважины.

Сопловая головка РБА является главным рабочим органом при реактивном бурении. На ней установлены сопла, через которые рабочее тело, истекая на забой со сверхзвуковой скоростью, разрушает его.

Эффективность РБА во многом определяет эффективность технологии реактивного бурения в целом. Для определения оптимальных диапазонов параметров струй рабочего тела для различных типов пород впервые предложена аналитическая методика, позволяющая проводить выбор конструктивных и режимных параметров РБА на ранних этапах проектирования. Методика реализована в виде программного кода в среде Matlab. Поскольку существующие энергетические критерии не отражают особенностей реактивного бурения, в качестве критерия выбора параметров РБА предложена удельная энергоемкость бурения 1 м³ породы способом реактивного бурения, определяемая как:

$$E_r = \frac{\dot{m}_r \cdot H_u}{V} \text{ [Дж / м}^3\text{]}, \quad (2)$$

где V – средняя объемная скорость бурения породы, м³/с; \dot{m}_r – массовый расход горючего в РБА, кг/с; H_u – низшая теплотворная способность горючего, Дж/кг. Данный критерий для скважины заданного диаметра позволяет определить средний расход энергоресурсов на бурение 1 пог.м скважины.

Для исследования процесса бурения с помощью РБА спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд, обеспечивающий подачу компонентов в РБА (керосин, сжатый воздух, вода), перемещение РБА относительно образца породы и определение средней скорости бурения.

В результате стендовых экспериментов получен устойчивый процесс термического разрушения крепких горных пород (граниты и гнейсы) со скоростью до 2,5 мм/с (рис. 3, 4).



Рис. 3
Внешний вид станда для
испытания РБА

Fig. 3
External view of the jet rig test
bench

Проведенные полевые испытания показали, что данный способ бурения также может быть применим для рыхлых пород и пород средней крепости.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования показали, что при использовании РБА с невысокой температурой рабочего тела реализуется устойчивый процесс бурения скальных горных пород. Данный способ также применим и для бурения скважин в породах меньшей крепости путем модификации буровой головки.

Стоит отметить, что способ реактивного бурения взрывных скважин имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с термическим, а также механическим способами бурения:

- данный способ бурения обеспечивает разрушение скальных пород при минимальном энергопотреблении;
- РБА имеет длительный срок эксплуатации, так как не имеет движущихся частей, не контактирует с породой во время работы и имеет возможность подбора соответствующих параметров рабочего тела, обеспечивающих длительную стойкость элементов конструкции;

Список литературы

1. Rostami J., Hambley D. *SME Mining Engineering Handbook*. 3rd ed. Englewood: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.; 2011.
2. Анистратова К.Ю. (ред.) *Открытые горные работы – XXI век: Справочник*. М.: ООО «Система максимум»; 2019. Т. 1. 640 с.
3. Решетняк С.П., Паладеева Н.И. Основные направления развития техники для бурения взрывных скважин на открытых горных работах. *Горная техника*. 2012;(1):2–8.
4. Wang M., Zhang S., Edwin G.N.J. Hydrothermal Spallation Drilling Technology: An Alternative Method of Geothermal Energy Development. In: *Proceedings of the 2017 2nd International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering (EAME 2017)*. Paris: Atlantis Press; 2017, pp. 302–305. DOI: 10.2991/eame-17.2017.71.
5. Xianzhi S., Zehao L., Gensheng L., Baojiang S. Model evaluation and experimental validation of thermal jet drilling for geothermal energy. *Geothermics*. 2019;77:151–157. DOI: 10.1016/j.geothermics.2018.09.010.
6. Song X.Z., Lyu Z.H., Li G.S., Hu X.D. Numerical analysis of the impact flow field of multi-orifice nozzle hydrothermal jet combined with cooling water. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017;114:578–589. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.106.



Рис. 4
Буровое отверстие в образце
гнейса

Fig. 4
Drilled hole in a gneiss sample

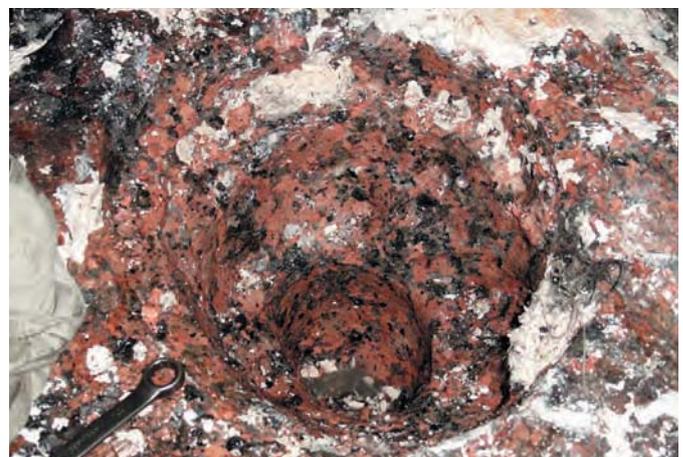


Рис. 5
Буровое отверстие в образце
гранита

Fig. 5
Drilled hole in a granite
sample

– буровая машина с РБА не требует тяжелого основания, она мобильна и не требует подготовки буровой площадки, что позволяет использовать ее в труднодоступных местах и экстремальных условиях;

– за счет исключения некоторых монтажно-стыковочных операций и высокой надежности конструкции РБА имеет высокий коэффициент технического использования;

– в качестве компонентов топлива используются такие широко распространенные компоненты, как воздух, вода и керосин или дизельное топливо.

7. Zehao L., Xianzhi S., Gensheng L., Yu S., Rui Z., Gaosheng W., Yu L. Investigations on thermal spallation drilling performance using the specific energy method. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2018;54:216–223. DOI: 10.1016/j.jngse.2018.04.009.
8. Первышин А.Н., Буланова Е.А. Нагрев плоской преграды струей продуктов сгорания ракетного двигателя. *Известия Самарского научного центра Российской Академии наук*. 2013;15(6-4):917–920. Режим доступа: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2013/2013_6_917_920.pdf
9. Мустейкис А.И. Физико-математическая модель процесса хрупкого термического разрушения горных пород. В: *Итоги диссертационных исследований: материалы 5-го Всероссийского конкурса молодых ученых*. М.: РАН; 2013. Т. 4. С. 34–42.
10. Kant M.A., Rossi E., Madonna C., Höser D., Rudolf von Rohr P. A theory on thermal spalling of rocks with a focus on thermal spallation drilling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2017;122(3):1805–1815. DOI: 10.1002/2016JB013800.
11. Мустейкис А.И., Кузьмин А.М., Левихин А.А., Ильинов Е.В., Побелянский А.В., Попов В.В. *Патент РФ на полезную модель №136083*, 27.12.2013, Бюл. № 36. Режим доступа: <https://www.fips.ru/Archive/PAT/2013FULL/2013.12.27/DOC/RUNWU1/000/000/000/136/083/DOCUMENT.PDF>
12. Мустейкис А.И. Новая технология термического бурения горных пород. В: *Новые технологии: материалы 10-й Всероссийской конференции*. М.: РАН; 2013. Т. 3. С. 137–140.
13. Добровольский М.В. *Жидкостные ракетные двигатели*. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2016. 461 с.

References

1. Rostami J., Hambley D. *SME Mining Engineering Handbook*. 3rd ed. Englewood: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.; 2011.
2. Anistratova K.Yu. (ed.) *Surface Mining Operations – 21st Century: Reference Book*. Moscow: Sistema maksimum; 2019. Vol. 1. 640 p. (In Russ.)
3. Reshetnyak S.P., Paladeeva N.I. Main trends in development of blast hole drilling technology in surface mining. *Gornaya tekhnika*. 2012;(1):2–8. (In Russ.)
4. Wang M., Zhang S., Edwin G.N.J. Hydrothermal Spallation Drilling Technology: An Alternative Method of Geothermal Energy Development. In: *Proceedings of the 2017 2nd International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering (EAME 2017)*. Paris: Atlantis Press; 2017, pp. 302–305. DOI: 10.2991/eame-17.2017.71.
5. Xianzhi S., Zehao L., Gensheng L., Baojiang S. Model evaluation and experimental validation of thermal jet drilling for geothermal energy. *Geothermics*. 2019;77:151–157. DOI: 10.1016/j.geothermics.2018.09.010.
6. Song X.Z., Lyu Z.H., Li G.S., Hu X.D. Numerical analysis of the impact flow field of multi-orifice nozzle hydrothermal jet combined with cooling water. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017;114:578–589. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.106.
7. Zehao L., Xianzhi S., Gensheng L., Yu S., Rui Z., Gaosheng W., Yu L. Investigations on thermal spallation drilling performance using the specific energy method. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2018;54:216–223. DOI: 10.1016/j.jngse.2018.04.009.
8. Pervyshin A.N., Bulanova E.A. Jet propulsion combustion materials stream heating of flat obstruction. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi Akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2013;15(6-4):917–920. (In Russ.) Available at: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2013/2013_6_917_920.pdf
9. Musteykis A.I. Physical and mathematical model of brittle thermal fracture of rocks. In: *Results of Dissertation Research: Proceedings of the 5th All-Russian Contest of Young Researchers*. Moscow: Russian Academy of Sciences; 2013. Vol. 4, pp. 34–42. (In Russ.)
10. Kant M.A., Rossi E., Madonna C., Höser D., Rudolf von Rohr P. A theory on thermal spalling of rocks with a focus on thermal spallation drilling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2017;122(3):1805–1815. DOI: 10.1002/2016JB013800.
11. Musteykis A.I., Kuz'min A.M., Levikhin A.A., Iliinov E.V., Pobelyanskii A.V., Popov V.V. *Patent of the Russian Federation for a useful model №136083*, 27.12.2013, Newsletter No. 36. (In Russ.) Available at: <https://www.fips.ru/Archive/PAT/2013FULL/2013.12.27/DOC/RUNWU1/000/000/000/136/083/DOCUMENT.PDF>
12. Musteykis A.I. New technology for thermal rock drilling. In: *New Technologies: Proceedings of the 10th All-Russian Conference*. Moscow: Russian Academy of Sciences; 2013. Vol. 3, pp. 137–140. (In Russ.)
13. Dobrovolsky M.V. *Liquid fuel rocket engines*. Moscow: Bauman Moscow State Technical University; 2016. 461 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Мустейкис Антон Иванович – старший преподаватель кафедры двигателей и энергоустановки летательных аппаратов, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Левихин Артем Алексеевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой двигателей и энергоустановки летательных аппаратов, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Анистратов Константин Юрьевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: anistratov_k@mail.ru.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 22.03.2021
 Поступила после рецензирования: 29.03.2021
 Принята к публикации: 05.04.2021

Information about the authors

Anton I. Musteykis – Senior Lecturer, Department of Aircraft Engines and Power Units, Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, St. Petersburg, Russian Federation.

Artem A Levikhin – Candidate of Technical Sciences (PhD in Engineering), Head of the Department of Aircraft Engines and Power Units, Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, St. Petersburg, Russian Federation.

Konstantin Yu. Anistratov – Doctor of Technical Sciences, Chief Research Associate at Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: anistratov_k@mail.ru.

Article info

Received: 22.03.2021
 Revised: 29.03.2021
 Accepted: 05.04.2021