

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

KORNEEV Konstantin Borisovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: energy-tver@mail.ru

PAVLOVA Yulia Mikhailovna – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sokolhawk98@gmail.com

OSEI-OWUSU Raymond – Graduate Student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: orajmond2008@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Korneev K.B., Pavlova Yu.M., Osei-Ovusu R. Algorithmic models of electric load control in power supply systems // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2022. No. 3 (15), pp. 40–50.

УДК 44.31.03:45.43.00:53.07.00

**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОТКРЫТЫХ В РОССИИ (В ТВГТУ)
ЗАКОНОВ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ И ФАКЕЛОВ**

А.Н. Макаров

Тверской государственной технической университет (г. Тверь)

© Макаров А.Н., 2022

Аннотация. Дано описание открытых автором фундаментальных законов физики, законов теплового излучения ионизированных и неионизированных газовых объемов. На основе открытых законов разработана современная теория теплообмена и методики расчета теплообмена в электродуговых и факельных металлургических печах, топках паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных установок электростанций. Сделан вывод, что использование научного открытия позволяет создавать инновационные электродуговые сталеплавильные печи, факельные нагревательные печи, топки, камеры сгорания, в которых снижается потребление электроэнергии и топлива, повышаются производительность и ресурс работы, уменьшается количество вредных выбросов в окружающую среду.

Ключевые слова: теплообмен, тепловое излучение, электрическая дуга, факел, печи, топки, камеры сгорания.

DOI: 10.46573/2658-7459-2022-3-50-58

ВВЕДЕНИЕ

В отечественной металлургии и в мире 40 % стали производят в дуговых сталеплавильных печах (ДСП), 60 % – в кислородных конверторах. В машиностроении и литейном производстве используют около 1 000 ДСП (пример подобной печи представлен на рис. 1). Дуговые сталеплавильные печи – сверхмощные потребители электроэнергии: мощность ДСП составляет 90–120 МВА, что равно 75 % мощности, потребляемой областным центром с населением в 500 000 человек и расположенной в ней промышленностью. До конца XX века (до 1980 года) электрическая дуга (основной источник теплового излучения в ДСП) представляла собой «черный ящик», неисследованный объект [1–3].



Рис. 1. Дуговая сталеплавильная печь вместимостью 6 т металла

В 1979–1982 годах автор разработал геометрическую, физическую, математическую модель электрической дуги как цилиндрического газового ионизированного излучающего объема и на основе модели создал методику расчета теплообмена в ДСП. В 2010-е годы формула для расчета теплового излучения электрической дуги была названа автором первым законом теплового излучения цилиндрического газового объема. В 1983–1992 годах он разработал пионерскую теорию теплообмена в ДСП и изложил ее в монографии [4].

В России на тепловых электростанциях (рис. 2) установлено около 2 000 энергоблоков (мощностью от 30 до 1 200 МВт). В топках паровых котлов сжигают 80–85 % добываемых и используемых в мире, в том числе и в России, топливно-энергетических ресурсов. В XX–XXI веках широкое распространение получило факельное сжигание в топках, печах, камерах сгорания газотурбинных установок газообразного, жидкого, пылевидного топлива.

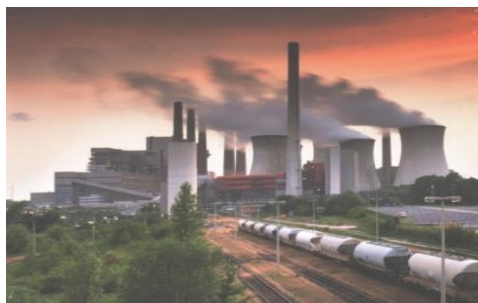


Рис. 2. Тепловая электрическая станция

Для факельного сжигания топлива характерно объемное излучение, а именно трехмерная модель излучения. Теплообмен излучением составляет 90–98 % суммарного теплообмена в топках паровых котлов, факельных нагревательных и электродуговых сталеплавильных печах, камерах сгорания газотурбинных установок [1–5]. В факеле, электрической дуге излучают квадриллионы атомов; излучение каждого атома на расчетную площадку необходимо учесть, что является сверхсложной проблемой. Для расчета теплового излучения факела на расчетную площадку необходимо решить трехкратные интегральные уравнения теплообмена излучением. Решение трехкратных интегральных уравнений для определения потоков теплового излучения, угловых коэффициентов излучения факела на расчетную площадку, средней длины пути лучей от излучающих атомов до расчетной площадки в XX веке не было найдено, факел также представлял собой «черный ящик». В существующих методах расчета (зональном, численном, Р1-аппроксимации, Монте-Карло, Шварцшильда – Шустера, Эддингтона, Чандрасекара, сферических гармоник [1–3]) используются закон теплового излучения абсолютно черного тела, закон Стефана – Больцмана; погрешность расчетов составляет 70–90 % и более, так как излучение газовых объемов не подчиняется закону Стефана – Больцмана [5].

ЗАКОНЫ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ И ФАКЕЛОВ

В 1996–2001 годах автором были открыты фундаментальные законы физики, законы теплового излучения газовых объемов факелов, законы излучения цилиндрических газовых объемов (табл. 1) [5–8]. В таблице использованы обозначения:

q – плотность потока теплового излучения падающего от цилиндрического газового объема на расчетную площадку, кВт/м²;

ϕ – угловой коэффициент излучения (доля излучения) цилиндрического газового объема на расчетную площадку;

P – мощность излучения цилиндрического газового объема, кВт;

k – коэффициент поглощения цилиндрического газового объема;

l – средняя длина пути лучей от всех атомов цилиндрического газового объема до расчетной площадки, м;

F – площадь поверхности расчетной площадки, м².

Индексы обозначают номера газовых объемов от 1 до n .

Таблица 1

Законы теплового излучения газовых объемов факелов (законы Макарова)

Номер закона	Математическая запись закона	Формулировка закона
1	2	3
I	$q_{FdF} = \frac{\phi_{F_0dF} \cdot P_F \cdot e^{-kl}}{F_0} = \frac{\phi_{F_0dF} \cdot P_F}{F_0 \cdot e^{kl}}$	Плотность потока теплового излучения, падающего от газового объема на расчетную площадку, прямо пропорциональна его мощности, угловому коэффициенту излучения и обратно пропорциональна коэффициенту поглощения, средней длине пути лучей от всех атомов объема до площадки и площади площадки

Окончание табл. 1

1	2	3
II	$l_1 = l_2 = l_3 = \dots = l_i = \left(\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{n} \right) = l$	Средняя длина пути лучей от квадриллионов излучающих атомов объема до расчетной площадки равна среднеарифметическому расстоянию от оси симметрии объема до площадки
III	$\phi_{F_1dF} = \phi_{F_2dF} = \phi_{F_3dF} = \dots = \phi_{F_idF}$	Угловые коэффициенты излучения коаксиальных цилиндрических газовых объемов на расчетную площадку равны
IV	$q_{F_1dF} = q_{F_2dF} = q_{F_3dF} = \dots = q_{F_idF}$	Плотности потоков излучений коаксиальных цилиндрических газовых объемов на расчетную площадку равны
V	$q_{F_idF} = \sum_{i=1}^n q_{F_idF}$	Плотности потоков тепловых излучений цилиндрического газового объема большого диаметра и его цилиндрической оси симметрии на расчетную площадку равны при равенстве выделяющихся в них тепловых мощностей

С целью соблюдения многовековых научных традиций и авторского права законы теплового излучения газовых объемов факелов в дипломе на научное открытие, статьях, учебнике, монографиях, аналогично законам излучения абсолютно черного тела (законам Стефана – Больцмана, Планка, Вина), названы фамилией автора, их открывшего, а именно законами Макарова. На основе научного открытия автором разработана теория и методики расчета теплообмена [5–11] в факельных печах (рис. 3), топках паровых котлов, камерах сгорания (рис. 4) газотурбинных установок (рис. 5), газотурбинных двигателей гражданской авиации.



Рис. 3. Факельная печь для обжига кирпича

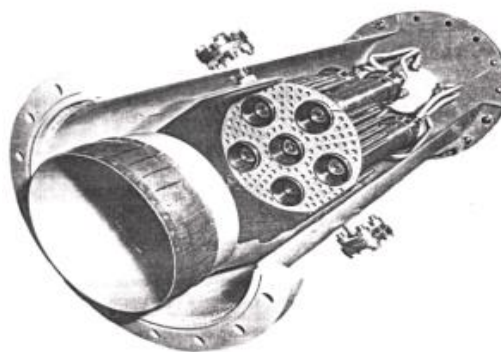


Рис. 4. Камера сгорания газотурбинной установки

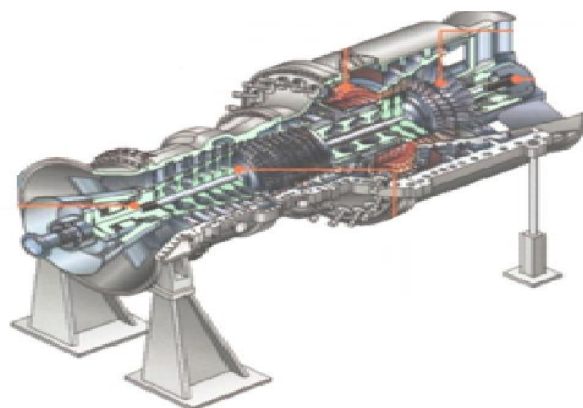


Рис. 5. Газотурбинная установка мощностью 295 МВт

Благодаря открытым законам теплового излучения газовых объемов была решена сверхсложная задача расчета с помощью одной формулы излучения квадриллионов атомов факела на любую расчетную площадку в печах, топках, камерах сгорания.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕНА В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ И ФАКЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ, ТОПКАХ, КАМЕРАХ СГОРАНИЯ

Открытые законы обладают мультидисциплинарностью и используются в металлургии, энергетике, различных отраслях промышленности. Согласно открытым законам, в газовые объемы факелов вписываются цилиндрические газовые объемы (рис. 6), излучение которых в расчетах моделируется эквивалентным излучением их цилиндрической оси симметрии (см. закон V в табл. 1).

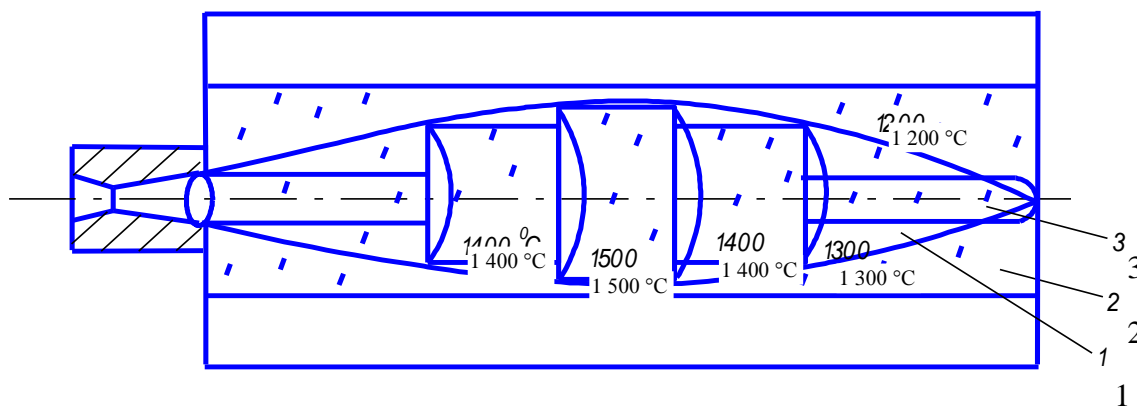


Рис. 6. Геометрическая модель факела в виде цилиндрических газовых объемов:
1 – факел; 2 – продукты горения; 3 – цилиндрические газовые объемы разного диаметра

Основные формулы методики расчета теплообмена в ДСП, факельных печах, топках, камерах сгорания изложены в табл. 2, в которой использованы условные обозначения:

q_{in} – плотность теплового потока, падающего на i -ю элементарную площадку на поверхности нагрева;

$q_{in\phi}$ – плотность потока теплового излучения, падающего на i -ю площадку от факела, с учетом поглощения излучения факела;

$q_{ino.\phi}$ – плотность потока теплового излучения, падающего на i -ю площадку b , вызванного отражением излучения факела от стен, пода, свода, изделий;

$q_{inп}$ – плотность потока теплового излучения, падающего на i -ю площадку от излучающих стен, пода, крышки, с учетом отражения и поглощения излучения;

$q_{ino.п}$ – плотность потока теплового излучения, падающего на i -ю площадку, вызванного отражением излучения поверхностей от стен, пода, крышки, слитков;

q_{ikon} – плотность конвективного потока факела и продуктов сгорания на i -ю площадку;

q_{inn} – плотность потока излучения продуктов сгорания на i -ю площадку;

$\varphi_{\phi ji}$ – локальный угловой коэффициент излучения j -го цилиндрического источника на i -ю площадку;

$P_{\phi j}$ – мощность j -го цилиндрического источника;

F_i – площадь i -й элементарной площадки;

$\psi_{\phi jk}$ – обобщенный угловой коэффициент излучения j -й объемной зоны (j -го цилиндрического источника) на k -ю поверхность;

$\varphi_{\phi jk}$ – средний угловой коэффициент излучения j -го цилиндрического источника на k -ю поверхность;

φ_{ji} – локальный угловой коэффициент излучения j -й поверхности на i -ю площадку;

Q_{jc} – поток собственного излучения j -й поверхности;

$t_n = 20^\circ\text{C}$ – температура изделий;

$t_{г.ср} = 1400^\circ\text{C}$ – средняя температура продуктов горения, газа;

$\alpha_{кон}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией (при свободной конвекции $\alpha_{кон} = 11,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ в начале нагрева $q_{ikon} = 16,2 \text{ кВт}/\text{м}^2$);

φ_{ncji} – локальный угловой коэффициент излучения j -го объема продуктов сгорания на i -ю площадку;

P_{ncj} – мощность j -го объема продуктов сгорания;

ε_j – коэффициент излучения j -й поверхности;

c_s – излучательная способность абсолютно черного тела;

T_j – температура поверхности;

F_j – площадь j -й поверхности.

Таблица 2

Уравнения, формулы для расчета теплообмена в факельных печах, топках, камерах сгорания по законам излучения газовых объемов

№ п/п	Наименование формулы, уравнения	Уравнение, формула	Единица измерения
1	2	3	4
1	Плотность суммарного теплового потока, падающего на расчетную площадку	$q_{in} = q_{in\phi} + q_{ino.\phi} + q_{inп} + q_{ino.п} + q_{ikon} + q_{inn}$	кВт/м ²
2	Доля мощности, выделяющаяся в газовом объеме факела	$P_1 : P_2 : \dots : P_n = T_1^3 V_1 : T_2^3 V_2 : \dots : T_n^3 V_n$	–

Окончание табл. 2

1	2	3	4
3	Плотность теплового потока излучения, падающего на расчетную площадку от факела (первый закон теплового излучения цилиндрических газовых объемов)	$q_{in\phi} = \sum_1^n \frac{\varphi_{\phi ji} P_{\phi j}}{F_i} e^{-kl}$	кВт/м ²
4	Плотность теплового потока излучения, вызванного отражением излучения факела от поверхностей на расчетную площадку	$q_{ino.\phi} = \sum_1^n \frac{P_{\phi j}(\psi_{\phi jk} - \varphi_{\phi jk} e^{-kl})}{F_k}$	кВт/м ²
5	Плотность теплового потока излучения, падающего на расчетную площадку от излучающих поверхностей	$q_{in\pi} = \sum_1^n \frac{\varphi_{ji} Q_{jc}}{F_i} e^{-kl}$	кВт/м ²
6	Плотность теплового потока излучения, вызванного отражением излучения поверхностей и падающего на расчетную площадку	$q_{ino.\pi} = \sum_1^n \frac{Q_{jc}(\psi_{jk} - \varphi_{jk} e^{-kl})}{F_k}$	кВт/м ²
7	Плотность конвективного потока от факела и продуктов сгорания на расчетную площадку	$q_{икон} = \alpha_{кон}(t_{г. ср} - t_{и})$	кВт/м ²
8	Плотность потоков излучения продуктов сгорания на расчетную площадку	$q_{inc} = \sum_1^n \frac{\varphi_{псji} P_{псj}}{F_i} e^{-kl}$	кВт/м ²
9	Поток собственного излучения поверхности	$Q_{jc} = \varepsilon_j c_s (T_j/100)^4 F_j$	кВт/м ²

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Открытые законы теплового излучения газовых объемов и разработанная на их основе методика используются для расчета теплообмена в электродуговых сталеплавильных и факельных нагревательных печах, топках паровых котлов электростанций, камерах сгорания газотурбинных установок электростанций [4–9]. На основе выполненных расчетов разработаны защищенные несколькими десятками патентов электродуговые сталеплавильные печи, факельные печи, топки паровых котлов [10, 11], в которых снижается расход электроэнергии, топлива, повышается производительность, увеличивается срок службы отдельных узлов оборудования: водоохлаждаемых панелей в ДСП, горелок в топках паровых котлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков А.Н. Теплообмен излучением. М.: Энергоатомиздат. 1991. 432 с.

2. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир. 1975. 934 с.
3. Телегин А.С. Теплотехнические расчеты металлургических печей. М.: Metallurgy. 1993. 368 с.
4. Макаров А.Н., Свенчанский А.Д. Оптимальные тепловые режимы дуговых сталеплавильных печей. М.: Энергоатомиздат. 1992. 96 с.
5. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. СПб.: Лань. 2014. 384 с.
6. Makarov A.N. Theory of radioactive heat exchange in fire boxes, fireboxes, combustion chambers is replenished by four new laws // *Science Discovery*. 2014. No. 2, pp. 34–42.
7. Makarov A.N. Radiation from large gas volumes and heat exchange in steam boiler furnaces // *Power Technology and Engineering*. 2015. No. 3 (49), pp. 196–201.
8. Makarov A.N. Flare Temperature and nitrogen oxide emission reduction and heat transfer in the TGMP-314I steam boilerfirebox // *Power Technology and Engineering*. 2016. No. 2 (50), pp. 200–203.
9. Makarov A.N., Okuneva V.V., Galicheva M.K. Influence of the length of a torch tongue on heat flow in a burner device // *Power Technology and Engineering*. 2017. No. 4 (51), pp. 445–450.
10. Патент РФ 2613539. *Топка для сжигания газомазутного топлива* / Макаров А.Н., Галичева М.К., Кузнецов А.В. Заявл. 12.01.2016. Оpubл. 17.03.2017. Бюл. № 8.
11. Патент РФ 2547675. *Топка для сжигания газомазутного топлива* / Макаров А.Н., Неверов Ф.Н., Кузнецов А.В. Заявл. 14.04.2014; Оpubл. 10.04.2015. Бюл. № 10.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Макаров А.Н. Основные положения открытых в России (в ТвГТУ) законов теплового излучения газовых объемов электрических дуг и факелов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2022. № 3 (15). С. 50–58.

THE MAIN PROVISIONS OF THE LAWS OF THERMAL RADIATION OF GAS VOLUMES OF ELECTRIC ARCS AND TORCHES DISCOVERED IN RUSSIA (IN TVSTU)

A.N. Makarov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The description of the fundamental laws of physics discovered by the author, the laws of thermal radiation of ionized and non-ionized gas volumes is given. On the basis of open laws, a modern theory of heat transfer and methods for calculating heat transfer in electric arc and flare metallurgical furnaces, furnaces of steam boilers, and combustion chambers of gas turbine plants of

power plants have been developed. The use of scientific discovery makes it possible to create innovative electric arc steel-making furnaces, flare heating furnaces, furnaces, combustion chambers in which the consumption of electricity and fuel is reduced, productivity and service life are increased, and the amount of harmful emissions into the environment is reduced.

Keywords: heat exchange, heat radiation, electric arc, torch, furnaces, furnaces, combustion chambers.

REFERENCES

1. Bloch A.G., Zhuravlev Yu.A., Ryzhkov A.N. *Teploobmen izlucheniym* [Heat transfer by radiation]. Moscow: Energoatomizdat. 1991. 432 p.
2. Siegel R., Howell J. *Teploobmen izlucheniym* [Heat transfer by radiation]. Moscow: Mir. 1975. 934 p.
3. Telegin A.S. *Teplotekhnicheskiye raschety metallurgicheskikh pechey* [Thermotechnical calculations of metallurgical furnaces]. Moscow: Metallurgy. 1993. 368 p.
4. Makarov A.N., Svenchansky A.D. *Optimal'nyye teplovyye rezhimy dugovykh staleplavil'nykh pechey* [Optimal thermal conditions of arc steel-smelting furnaces]. Moscow: Energoatomizdat. 1992. 96 p.
5. Makarov A.N. *Teploobmen v elektrodugovykh i fakel'nykh metallurgicheskikh pechakh i energeticheskikh ustanovkakh* [Heat transfer in electric arc and flare metallurgical furnaces and power plants]. St. Petersburg: Lan. 2014. 384 p.
6. Makarov A.N. The theory of radioactive heat exchange in fire box, fireboxes, combustion chambers is replenished by four new laws. *Science Discovery*. 2014. No. 2, pp. 34–42.
7. Makarov A.N. Radiation from large gas volumes and heat Exchange in steam boiler furnaces. *Power Technology and Engineering*. 2015. No. 3 (49), pp. 196–201.
8. Makarov A.N. Flare Temperature and nitrogen oxide emission reduction and heat transfer in the TGMP-314I steam boilerfirebox. *Power Technology and Engineering*. 2016. No. 2 (50), pp. 200–203.
9. Makarov A.N., Okuneva V.V., Galicheva M.K. Influence of the length of a torch tongue on heat flow in a burner device. *Power Technology and Engineering*. 2017. No. 4 (51), pp. 445–450.
10. Patent RF 2613539. *Topka dlya szhiganiya gazomazutnogo topliva* [Furnace for burning oil-gas fuel]. Makarov A.N., Galicheva M.K., Kuznetsov A.V. Declared 01.12.2016. Published 03.17.2017. Bulletin No. 8. (In Russian).
11. Patent RF 2547675. *Topka dlya szhiganiya gazomazutnogo topliva* [Furnace for combustion of oil-gas fuel]. Makarov A.N., Neverov F.N., Kuznetsov A.V. Declared 04.14.2014. Published 04.10.2015. Bulletin No. 10. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Power Supply and Electrical Equipment, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Makarov A.N. The main provisions of the laws of thermal radiation of gas volumes of electric arcs and torches discovered in Russia (in TvSTU) // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2022. No. 32 (15), pp. 50–58.