

УДК 669.187: 621.186

**ЗАКОНЫ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ ФАКЕЛОВ  
И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАКОНЫ ФИЗИКИ***А.Н. Макаров**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Макаров А.Н., 2022

**Аннотация.** В статье приведены расчеты по методике, разработанной на основе законов теплового излучения газовых объемов. Эти расчеты позволили впервые получить информацию о распределении потоков теплового излучения факела по поверхности пламенной трубы, горелочного устройства. Рассмотрены фундаментальные законы физики, в частности законы теплового излучения газовых объемов.

**Ключевые слова:** законы физики, теплообмен, тепловое излучение, факел, камера сгорания.

DOI: 10.46573/2658-7459-2022-4-57-64

**ВВЕДЕНИЕ**

По открытым законам и разработанной методике [1] был рассчитан теплообмен в камере сгорания газотурбинной установки (КС ГТУ) мощностью 4,25 МВт. Мощность факела 16,28 МВт. Результаты расчета изображены на рис. 1.

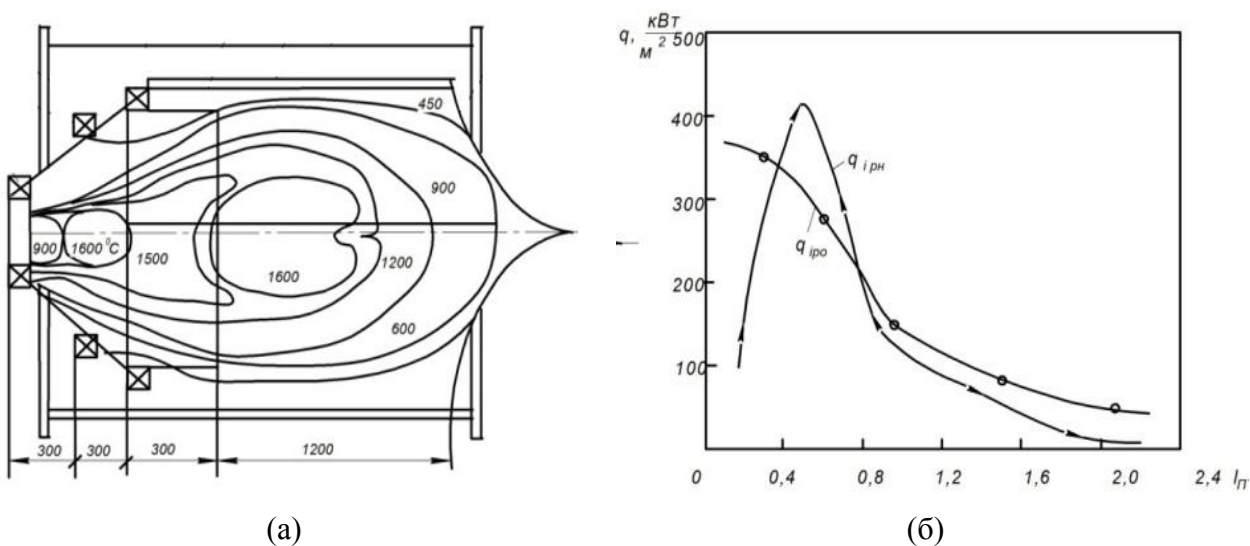


Рис. 1. Схема КС и распределения изотерм по объему факела (а); графики распределения плотностей потоков нагрева и охлаждения по длине пламенной трубы (б)

Анализ распределения плотностей результирующих потоков нагрева по длине КС показал их значительную неравномерность: от 380 кВт/м<sup>2</sup> на поверхностях большого

конуса чаши до  $120 \text{ кВт/м}^2$  в среднем кольце пламенной трубы и до  $8 \text{ кВт/м}^2$  в последней кольцевой зоне пламенной трубы у смесителя. На расстоянии  $0,5 \text{ м}$  от горелки охлаждение КС неудовлетворительное, поскольку результирующие тепловые потоки нагрева от факела превосходят тепловые потоки охлаждения воздуха. Для надежной эксплуатации КС требуется корректирование параметров охлаждающего воздуха по ее длине.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕНА ПО ЗАКОНАМ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ

Были рассчитаны плотности потоков теплового излучения, падающих от факела на горизонтальную поверхность нагрева и горелочное устройство, при различной длине факела (рис. 2).

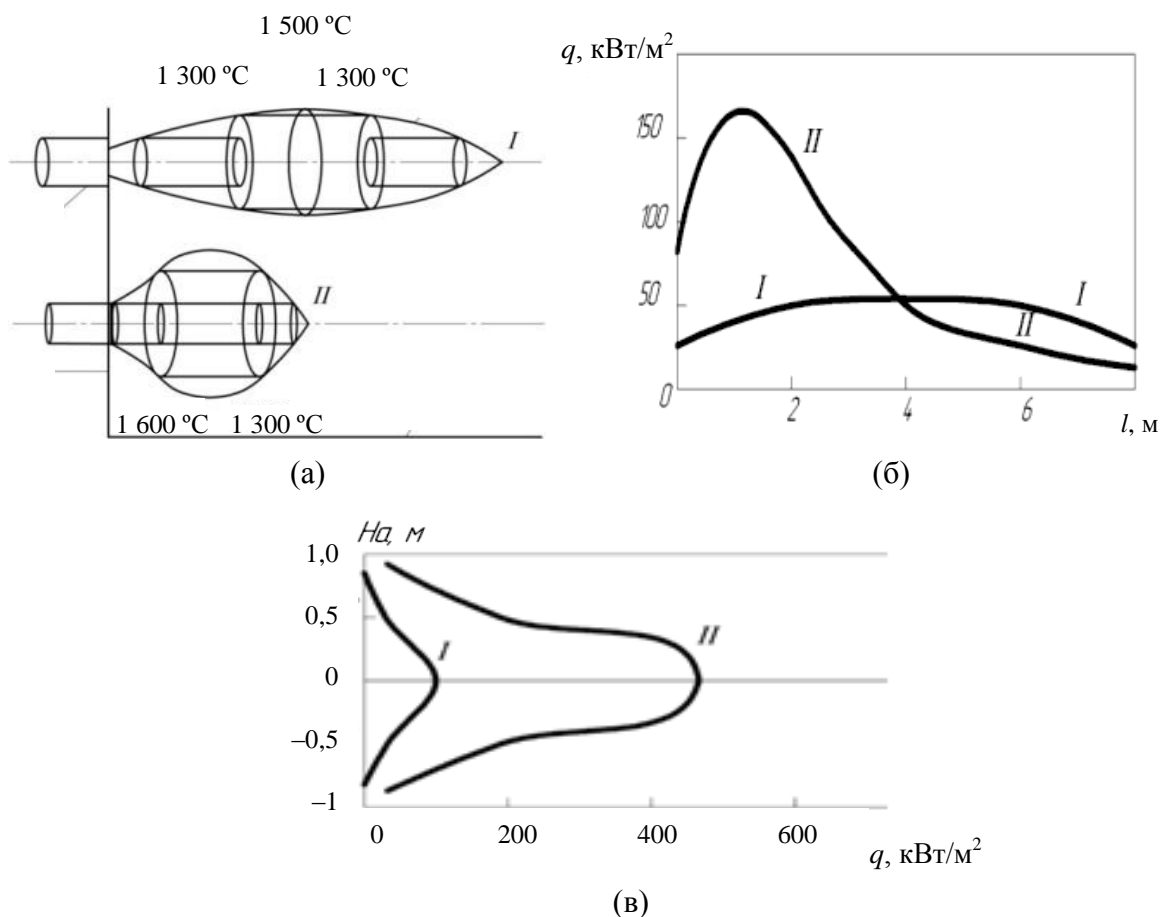


Рис. 2. Расположение факелов I и II одинаковой мощности ( $P_{\text{ф}} = 5 \text{ МВт}$ ), различной длины ( $l_{\text{фI}} = 8 \text{ м}$ ,  $l_{\text{фII}} = 3 \text{ м}$ ) (а); распределение тепловых потоков от факелов I и II по горизонтальной поверхности нагрева (б) и по поверхности амбразуры и горелочному устройству (в)

Как видно из результатов расчета, увеличение длины факела при постоянной его мощности влечет за собой снижение тепловых потоков, падающих на амбразуру и горелку. При увеличении длины факела в 2,7 раза (с 3 до 8 м) плотность тепловых потоков, падающих на горелку, уменьшилась в 4 раза – с  $480$  до  $120 \text{ кВт/м}^2$ . Данные расчетов

подтверждены экспериментальными исследованиями топок паровых котлов ТГМП-314 энергоблока 300 МВт на ТЭЦ-21, ТЭЦ-23 Мосэнерго и на Конаковской ГРЭС. При увеличении длины факела при постоянной мощности с 3 до 5 м, т.е. в 1,7 раза, плотность тепловых потоков излучения факела, падающих на горелочное устройство, снизилась в 2 раза (с 1 500–1 400 кВт/м<sup>2</sup> до 700–750 кВт/м<sup>2</sup>), срок службы горелок увеличился в 4 раза (с 6–12 месяцев до 2–4 лет) [2].

Расчеты по законам теплового излучения газовых объемов и разработанной на их основе методике позволили впервые получить полную расчетную информацию о распределении потоков излучения факела по поверхности пламенной трубы, горелочного устройства ГТУ, о величине и местоположении максимальных тепловых потоков факела на поверхности пламенной трубы для организации эффективного охлаждения и увеличения срока службы пламенной трубы ГТУ.

В настоящее время температура газов в КС и газовой турбине составляет 1 400–1 600 °С (рис. 3). Затраты на создание газотурбинного двигателя (ГТД) АЛ-31Ф составили несколько миллиардов долларов США, время создания – 10 лет. Около 10 % этой суммы приходится на конструирование, опытно-экспериментальные исследования КС, апробацию новой конструкции КС до ее эксплуатационного разрушения с последующим внесением изменений в конструкцию и использованием новых сплавов для достижения долговечности, вновь апробацию конструкции КС до разрушения, создание следующего опытного образца КС с жаропрочным покрытием. Такие работы продолжаются вплоть до создания образца КС с хорошими эксплуатационными свойствами и длительным ресурсом работы. Конструирование, исследование, изготовление, испытания опытного образца КС ведутся несколько лет до создания образца КС, обладающего высокой жаропрочностью, жаростойкостью, надежностью и долговечностью.

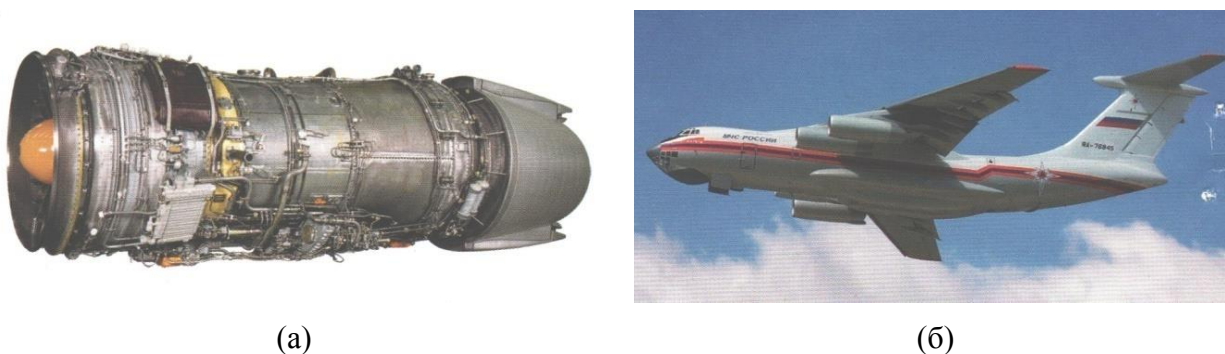


Рис. 3. Газотурбинный двигатель Д-30КП-2 с тягой 12 000 кг (а);  
Д-30КП-2 на самолете ИЛ-76 с грузоподъемностью 50 т (б)

При использовании разработанной методики расчета теплообмена в КС ГТУ, ГТД, основанной на открытых законах теплового излучения газовых объемов факела, время создания КС можно сократить в 2–3 раза, затраты на создание КС – на 20–30 %, на создание ГТД – на 5–8 %. Экономия при создании ГТД нового поколения с использованием открытых законов теплового излучения газовых объемов факелов и разработанной на их основе методики расчета теплообмена в КС может составить несколько сотен миллионов долларов.

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАКОНЫ ФИЗИКИ**

Все фундаментальные законы физики, законы Ньютона, Гаука, Фурье, Ома (таблица), теплового излучения газовых объемов Макарова и другие имеют относительно простое написание. В них мало расчетных параметров, но именно это и характеризует их фундаментальность, всеобщность и всеохватность, мультидисциплинарность, точность описания явлений природы.

Фундаментальные законы физики являются основой разработки теорий, методик расчета, с помощью которых в XX–XXI веках созданы все существующие виды техники и технологий, осуществлены электрификация, механизация, автоматизация, компьютеризация промышленности, сельского хозяйства и быта.

После открытия законов теплового излучения газовых объемов факелов и электрических дуг впервые появилась возможность рассчитывать теплообмен в электродуговых [3–6] и факельных печах, топках, КС [1–6] с высокой точностью, совершенствовать по всему миру теплообмен и конструкции электродуговых и факельных печей промышленных предприятий, топков, КС ГТУ электрических станций, экономить миллионы киловатт-час электроэнергии и миллионы тонн жидкого, газообразного, пылевидного топлива, сокращать выбросы загрязняющих веществ, уменьшать техногенную нагрузку на окружающую среду во многих городах мира.

Перечень ряда фундаментальных законов физики:  
законы Ньютона, Стефана – Больцмана, Ома, Планка,  
Вина, Эйнштейна, Макарова, постулаты Бора

Законы	Математическая запись	Формулировка
I закон Ньютона	$\vec{a} = 0$	Любое тело до тех пор, пока оно остается изолированным, сохраняет свое состояние покоя или равномерного прямолинейного движения (ускорение тела $\vec{a}$ равно нулю)
II закон Ньютона	$m\vec{a} = \vec{F}$	Произведение массы тела на ускорение, которое оно получило от воздействия силы $F$ другого тела, равно равнодействующей силе $F$
III закон Ньютона	$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$	Действию всегда есть равное и противоположное противодействие
Закон Стефана – Больцмана теплового излучения твердых тел	$q_{12} = \frac{\varphi_{12}\varepsilon_1 C_s F_1}{F_2} \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$	Плотность потока теплового излучения $q_{12}$ , падающего с тела 1 на тело 2, прямо пропорциональна разности температур тел в четвертой степени
Закон Ома	$I = \frac{U}{R}$	Ток, протекающий в проводнике, прямо пропорционален приложенному к нему напряжению и обратно пропорционален сопротивлению проводника

Продолжение таблицы

Законы	Математическая запись	Формулировка
Закон Планка	$E_{0\lambda} = c_1 \lambda^{-5} (e^{c_2/\lambda T} - 1)$	Квант энергии $\varepsilon$ излучающей частицы пропорционален частоте $\nu$ и универсальной постоянной (постоянной Планка)
Закон Вина	$\lambda_M T = 2,898 \cdot 10^{-3}$	Длина волны, при которой плотность излучения абсолютно черного тела (АЧТ) достигает максимального значения, обратно пропорциональна температуре тела
Закон Эйнштейна для фотоэффекта	$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}$	Энергия фотона, опускающегося на катод с последующим испусканием катодом электрона, равна энергии выхода и кинетической энергии электрона
Постулаты Бора	_____	<p>I. В стационарном состоянии атом не излучает.</p> <p>II. При переходе атома из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией, когда электрон в атоме перескакивает с более удаленной от ядра на более близкую к нему орбиту, испускается квант электромагнитного излучения.</p> <p>III. В стационарном состоянии электрон движется по определенной орбите, на электрон в атоме действует кулоновская сила</p>
<b>Законы Макарова</b>		
I	$q_{FdF} = \frac{\phi_{F_0 dF} \cdot P_F \cdot e^{-kl}}{F_0} = \frac{\phi_{F_0 dF} \cdot P_F}{F_0 \cdot e^{kl}}$	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
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

Окончание таблицы

Законы	Математическая запись	Формулировка
III	$\phi_{F_1,dF} = \phi_{F_2,dF} = \phi_{F_3,dF} = \dots = \phi_{F_i,dF}$	Угловые коэффициенты излучения коаксиальных цилиндрических газовых объемов на расчетную площадку равны
IV	$q_{F_1,dF} = q_{F_2,dF} = q_{F_3,dF} = \dots = q_{F_i,dF}$	Плотности потоков излучений коаксиальных цилиндрических газовых объемов на расчетную площадку равны
V	$q_{F_i,dF} = \sum_{i=1}^n q_{F_i,dF}$	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

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За открытие Вином и Планком законов теплового излучения твердых тел, АЧТ Вину в 1911 году и Планку в 1918 году были присуждены Нобелевские премии по физике. За аналогичное по своему значению открытие закона фотоэффекта излучения Эйнштейну в 1921 году, а Бору за разработку теории атома и излучения из него в 1922 году были присуждены Нобелевские премии по физике. Законы теплового излучения газовых объемов, так же как и законы теплового излучения твердых тел, АЧТ, относятся к фундаментальным законам физики, ее разделу «Квантовая физика теплового излучения». Бор был последним ученым, который получил Нобелевскую премию по физике за открытие фундаментальных законов. Такое открытие – выдающееся событие в жизни человечества, которое происходит один раз в 50–80 лет. Подтверждением данного факта являются учебники физики для школ и университетов, в которых изложены чуть более 30 законов, открытых человечеством за 3 000 лет (начиная с III века до н. э. с закона Архимеда и заканчивая последними фундаментальными законами, постулатами, открытыми Бором в 1913 году).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Makarov A.N. Calculations of Heat Transfer in Torch Furnaces // *JP Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. No. 18 (1), pp. 145–165. DOI: 10.17564/HM018010145
2. Makarov A.N. Calculations of Heat Transfer in the Furnaces of Steam Boilers According in the Laws of Radiation of Gas Volumes // *Heat Transfer-Models, Method and Applications*. 2018, pp. 111–130. DOI: 10.5772/intechopen.75529
3. Makarov A.N. Change in Arc Efficiency During Melting in Steel-Melting Arc Furnaces // *Metallurgist*. 2017. No. 61 (3–4), pp. 55–58. DOI: 10.1007/s 11015-017-0492-Y
4. Makarov A.N. Effect of the Architecture on Energy Efficiency of Electric Arc Furnaces of Conventional and Consteel Designs // *Metallurgist*. 2019. Vol. 62. No. 9–10, pp. 882–891. DOI: 10.1007/S 11015-019-00743-9
5. Makarov A.N. Calculation and Analysis of Energy Parameters of Meltings in Eafths of Conventional and Consteel Design // *Metallurgist*. 2019. Vol. 62. No. 9–10, pp. 974–978. DOI: 10.100/S 11015-019-00733-X

6. Makarov A.N. Calculation and Analysis of the Relationship Between the Efficiency and Position of Electric Arcs Furnaces (EAF) of Smaller and Larger Capacity. Part I. Calculation and Analysis of the Relationship Between Arc Efficiency and Power Consumption // *Metallurgist*. 2019. Vol. 63. No. 3–4, pp. 341–349. DOI: 10/1007/S 11015-019-00829-4

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет, 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Макаров А.Н. Законы теплового излучения газовых объемов факелов и электрических дуг и фундаментальные законы физики // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2022. № 4 (16). С. 57–64.

---

### LAWS OF THERMAL RADIATION OF GAS VOLUMES AND FUNDAMENTAL LAWS OF PHYSICS

*A.N. Makarov*

*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The article presents calculations according to a technique developed on the basis of the laws of thermal radiation of gas volumes. These calculations made it possible for the first time to obtain information on the distribution of thermal radiation fluxes of the torch over the surface of the flame tube, burner device. The fundamental laws of physics, in particular the laws of thermal radiation of gas volumes, are considered.

**Keywords:** laws of physics, heat transfer, thermal radiation, torch, combustion chamber.

#### REFERENCES

1. Makarov A.N. Calculations of Heat Transfer in Torch Furnaces. *JP Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. No. 18 (1), pp. 145–165. DOI: 10.17564/HM018010145
2. Makarov A.N. Calculations of Heat Transfer in the Furnaces of Steam Boilers According in the Laws of Radiation of Gas Volumes. *Heat Transfer-Models, Method and Applications*. 2018, pp. 111–130. DOI: 10.5772/intechopen.75529
3. Makarov A.N. Change in Arc Efficiency During Melting in Steel-Melting Arc Furnaces. *Metallurgist*. 2017. No. 61 (3–4), pp. 55–58. DOI: 10.1007/s 11015-017-0492-Y
4. Makarov A.N. Effect of the Architecture on Energy Efficiency of Electric Arc Furnaces of Conventional and Consteel Designs. *Metallurgist*. 2019. Vol. 62. No. 9–10, pp. 882–891. DOI: 10.1007/S 11015-019-00743-9
5. Makarov A.N. Calculation and Analysis of Energy Parameters of Meltings in EafTs of Conventional and Consteel Desing. *Metallurgist*. 2019. Vol. 62. No. 9–10, pp. 974–978. DOI: 10.100/S 11015-019-00733-X

6. Makarov A.N. Calculation and Analysis of the Relationship Between the Efficiency and Position of Electric Arcs Furnaces (EAF) of Smaller and Larger Capacity. Part I. Calculation and Analysis of the Relationship Between Arc Efficiency and Power Consumption. *Metallurgist*. 2019. Vol. 63. No. 3–4, pp. 341–349. DOI: 10/1007/S 11015-019-00829-4

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

*MAKAROV Anatoly Nikolaevich* – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Power Supply and Electrical Equipment, 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. Laws of thermal radiation of gas volumes and fundamental laws of physics // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2022. No. 4 (16), pp. 57–64.

**УДК 621.3:628.971.6**

### ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ В СИСТЕМЕ ОСВЕЩЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

*Т.Ш. Хавазов, А.В. Крупнов*

*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Хавазов Т.Ш., Крупнов А.В., 2022

**Аннотация.** В статье приведены и рассмотрены способы повышения энергоэффективности освещения транспортных дорог. Приведена ожидаемая оценка энергосбережения в результате перехода на светодиодные светильники, изучено применение индивидуального диммирования. Затронут вопрос влияния диммеров на качество электроэнергии.

**Ключевые слова:** диммирование, энергосбережение, энергоэффективность, освещение транспортных дорог, качество электроэнергии, светодиодные светильники.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2022-4-64-72**

#### ВВЕДЕНИЕ

Уличное освещение важно для любого города и страны в целом. Благодаря нему службы продолжают функционировать с наступлением темноты.

Системы уличного освещения зародились еще в XV веке и прошли немалый путь развития – от примитивных масляных ламп до автоматизированных систем с возможностью дистанционного управления. Качественное и правильно выполненное утилитарное освещение способствует сокращению числа аварийных ситуаций на автомагистралях, поскольку порядка 30–40 % всех дорожно-транспортных происшествий приходится именно на темное время суток, несмотря на снижение транспортной нагрузки автодорог [1, 2].