

Оптимизация работы светлого излучателя на бедной газовой смеси

Рецензия эксперта на статью получена 23.09.2021 [The expert review of the article received on September 23, 2021].

Введение

В настоящее время для отопления помещений большого объема и различного назначения всё большее распространение получают газовые излучатели. Конструктивно они подразделяются на три типа: панельные, тёмные и светлые излучатели.

К исследованию предлагается светлый излучатель, который состоит из перфорированной, чаще всего керамической панели, в порах которой с высокой скоростью сгорает газозоодушная смесь, нагревая её до 700–900 °С и тем самым отдавая тепловую энергию. Данная конструкция не имеет индивидуальных дымооых труб, а продукты сгорания удаляются из помещения естественным способом [2, 4].

В большинстве случаев излучатель не подвергается конструктивным изменениям, так как при эксплуатации используются взаимозаменяемые газы, определяемые по числу Воббе и имеющие нижнее значение 42 МДж/м³ при теплоте сгорания 35 МДж/м³. Однако для удовлетворительной работы излучателя на газовой смеси, отличающейся от природного газа составом и характеристиками, требуется внести изменения в конструкцию. В качестве применяемого газа предлагается использовать бедную газую смесь (содержание метана около 60 %), такую как биогаз с теплотой сгорания 22 МДж/м³ и числом Воббе 25 МДж/м³ [3, 5].

Одним из главных условий работы излучателя является высокая скорость потока газа. Поскольку в биогазе присутствует значительная доля углекислого газа, то низкая скорость распространения пламени метановоздушной смеси, характерная для природного газа, в существующей конструкции уменьшается ещё больше. Ещё одно условие — это отсутствие угарного газа СО в продуктах сгорания. При

Расход газа зависит от низшей теплоты сгорания и необходимой мощности излучателя. Чем ниже теплота сгорания газа, тем больше требуется топлива

недостатке воздуха происходит неполное сгорание углерода, часть его образует оксид углерода, при этом происходят значительные потери тепла. Для обеспечения полного сгорания топлива задаётся «оптимальная газозоодушная смесь», в которой количества восстановителя и окислителя равны, поэтому после протекания реакции не остаётся ничего. Восстановителем является метан, содержащийся в биогазе, а окислителем — кислород, содержащийся в воздухе [1, 3, 6, 10].

Для устранения указанных недостатков при переходе с одного газа на другой требуется подобрать оптимальный режим работы и внести изменения в конструкцию излучателя.

Строение и принцип работы светлого излучателя

Светлый излучатель относится к приборам, работающим на высоких температурах и преимущественно устанавливаемым для отопления высоких помещений. Данный прибор конструктивно состоит из смесителя, корпуса горелки, керамической панели и рефлектора.

Перед корпусом горелки монтируется коробка автоматики, которая представляет собой блок клапанов для управления и регулирования давления газа на входе в горелку, а также контроллер для управления розжигом и контроля горения газозоодушной смеси. Струя газа из сопла инжектирует необходимое количество воздуха, поступающего в смеситель через

УДК 697.242. Научная специальность: 05.23.03.

Оптимизация работы светлого излучателя на бедной газовой смеси

Н. О. Ермаков, аспирант; **С. В. Чуйкин**, к.т.н., доцент, кафедра теплогазоснабжения и нефтегазового дела, Воронежский государственный технический университет (ВГТУ, г. Воронеж)

Предлагается провести исследования для определения возможности работы светлого излучателя на бедной газовой смеси, такой как биогаз. В связи с этим необходимо установить оптимальные параметры эксплуатации светлого излучателя. Доказана возможность работы светлого излучателя на бедной газовой смеси (биогазе). Подобраны семь настраиваемых параметров. Рассчитаны конструктивные изменения. Получены оптимальные условия работы и внесены изменения в конструкцию излучателя. Графические зависимости показали, что низшая теплота сгорания влияет на режим работы и конструкцию излучателя. Для проверки достоверности полученных результатов необходимо математическое моделирование.

Ключевые слова: биогаз, бедная газозоодушная смесь, расход газа, коэффициент избытка воздуха, светлые излучатели, теплота сгорания, оптимизируемые параметры, конструктивные изменения.

UDC 697.242. Scientific specialty number: 05.23.03.

Optimization of operation of a light radiator on a lean gas mixture

N. O. Ermakov, postgraduate student; **S. V. Chuikin**, PhD, Associate Professor, the Department of Heat and Gas Supply and Oil and Gas Business, Voronezh State Technical University (VSTU, Voronezh city)

It is proposed to conduct research to determine the possibility of operation of a light emitter on a poor gas mixture, such as biogas. In this regard, it is necessary to establish the optimal operating parameters of the light emitter. The possibility of operation of a light emitter on a poor gas mixture, such as biogas, has been proved. Seven configurable parameters have been selected. Design changes are calculated. The maximum temperature is obtained for the set changes. The results of the study allow us to conclude that for the satisfactory operation of the light emitter, it is necessary to choose the optimal working conditions and make changes to the design of the emitter. The graphical dependences showed that the lower heat of combustion affects the operating mode and the design of the radiator. For the reliability of the results obtained, it is necessary to perform mathematical modeling.

Key words: biogas, poor gas mixture, gas consumption, excess air coefficient, light emitters, heat of combustion, optimized parameters, design changes.

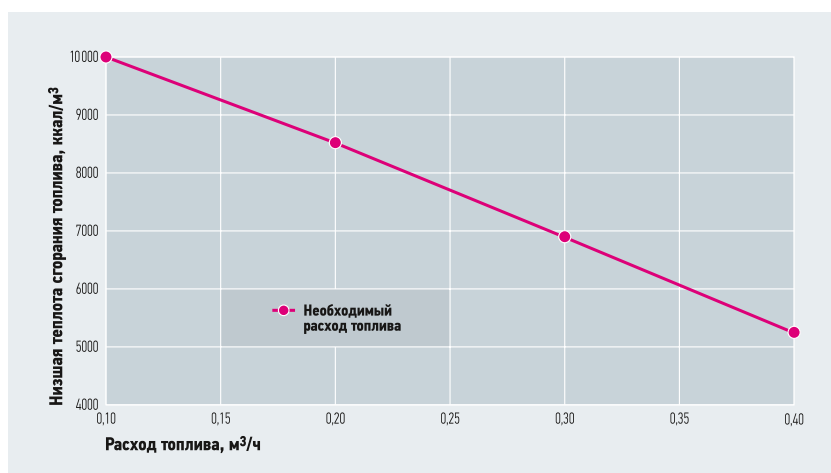


Рис. 1. Зависимость расхода топлива от теплоты сгорания

воздуховод из отопляемого помещения. Затем газозвушная смесь поступает в керамическую плитку с отверстиями, где сгорает вблизи выходных отверстий без видимого пламени. Большая часть тепла отдаётся поверхности плитки, которая нагревается до рабочей температуры.

Вывод дымовых газов осуществляется неорганизованным способом. Продукты сгорания удаляются из помещения естественным способом, то есть через входные проёмы, или выбрасываются наружу механическим вентилятором, который устанавливается в кровле помещения над излучателем [7–9].

Все детали излучателя производятся из листовой стали с алюминиевым покрытием, что даёт требуемую стойкость к температуре и увеличивает полезную лучистую составляющую теплового потока. Прибор устанавливается над рабочим местом и настраивается на нужный режим горения.

Расчёт параметров оптимизации

Для оптимизации процесса горения бедной газовой смеси в светлом излучателе предлагается задать конструктивные изменения в соответствии с подбираемыми оптимальными параметрами. Необходимо определить площадь поперечного сечения форсунки, основные размеры инжекционного смесителя, а также площадь керамической плитки. Оптимизация будет проходить по: параметрам расхода газа, коэффициенту избытка воздуха, связанного с теоретическим расходом воздуха, коэффициенту инжекции, удельной тепловой нагрузке на керамическую плитку, скорости вылета газозвушной смеси, по потерям давления.

Для начала расчёта определяется состав рассматриваемого газа с объёмными долями веществ CH_4 , CO_2 , H_2 и H_2S , а также его характеристики: теплота сгорания, предел воспламеняемости, температура воспламенения, критическое давление, критическая температура, нормальная плотность, критическая плотность, плотность относительно воздуха.

Исходя из теплоты сгорания газовой смеси и необходимой мощности излучателя рассчитывается расход топлива светлого излучателя, м³/ч:

$$Q_{\text{ном.г}} = Q/Q_{\text{н}}^{\text{р}}, \quad (1)$$

где Q — тепловая нагрузка горелки, ккал/м³; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ — низшая теплота сгорания топлива, ккал/м³.

На рис.1 показано изменение расхода топлива в зависимости от теплоты сгорания.

Расход газа зависит от низшей теплоты сгорания и необходимой мощности излучателя. Если мощность излучателя остаётся неизменной, зависит от требуемого объёма для отопления помещения и принимается $Q = 2149,61$ ккал/м³, то низшая теплота сгорания исходит из состава исследуемого газа. Так, для природного газа величине $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 8500$ ккал/м³ соответствует расход 0,2 м³/ч, а для биогаза значению $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 5255,8$ ккал/м³ соответствует расход 0,4 м³/ч.

Из рис.1 видно, что расход газа находится в прямой зависимости от низшей теплоты сгорания топлива. Чем ниже теплота сгорания газа, тем больше требуется топлива.

Одним из основных параметров, зависящих от расхода топлива, является размер форсунки, а именно площадь поперечного сечения и диаметр, которые определяют остальные размеры.

Площадь поперечного сечения форсунки [мм²] определяется по формуле:

$$F_{\phi} = 78,4 Q_{\text{ном.г}} \sqrt{\frac{\gamma_0}{p}}, \quad (2)$$

где γ_0 — удельный вес газа, кг/м³; p — давление газа перед горелкой, мм вод. ст.

Диаметр форсунки [мм] будет равен:

$$d_{\phi} = \sqrt{\frac{4 F_{\phi}}{\pi}}. \quad (3)$$

Такие конструктивные параметры, как длина и диаметр горловины, диффузора и конфузора, связаны друг с другом и рассчитываются через коэффициенты. Однако такой параметр, как длина пути [мм] смешивания газа с поступающим воздухом, определяется по формуле:

$$l_{\text{см}} = \frac{A_{\text{см}} d_p}{a}, \quad (4)$$

где a — коэффициент структуры в струе; $A_{\text{см}}$ — параметр смешения в струе:

$$A_{\text{см}} = \frac{(A' + 1) \sqrt{a_c C}}{3,217}, \quad (5)$$

где a_c — коэффициент сжатия струи; C — коэффициент различия плотности воздуха и топлива; A' — коэффициент инжекции [м³/м³], определяемый по формуле:

$$A' = \alpha V_T, \quad (6)$$

где V_T — теоретический объём воздуха, м³; α — коэффициент избытка воздуха. Во избежание «проскока» пламени, который получается при неполном сгорании смеси, необходимо подводить воздух с коэффициентом избытка не менее 1,19.

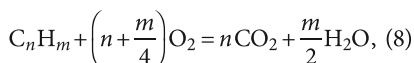
Коэффициент избытка воздуха связан с теоретическим объёмом воздуха через формулу:

$$\alpha = V_p / V_T, \quad (7)$$

здесь V_p — действительный объём воздуха, м³.

Необходимо учесть объёмное содержание кислорода в воздухе и рассчитать теоретический объём воздуха для сгорания рассматриваемой газовой смеси.

Теоретически, количество кислорода, необходимое для полного сгорания углеводородных газов, определяется по стехиометрическому уравнению:



Оптимальная газозоудушная смесь зависит в том числе от количества подводимого воздуха. Исходя из (рис. 2) величины коэффициента избытка воздуха, не пропорциональные низшей теплоты сгорания, не будут лежать на прямой, что приведёт к «проскоку» пламени. Для по-

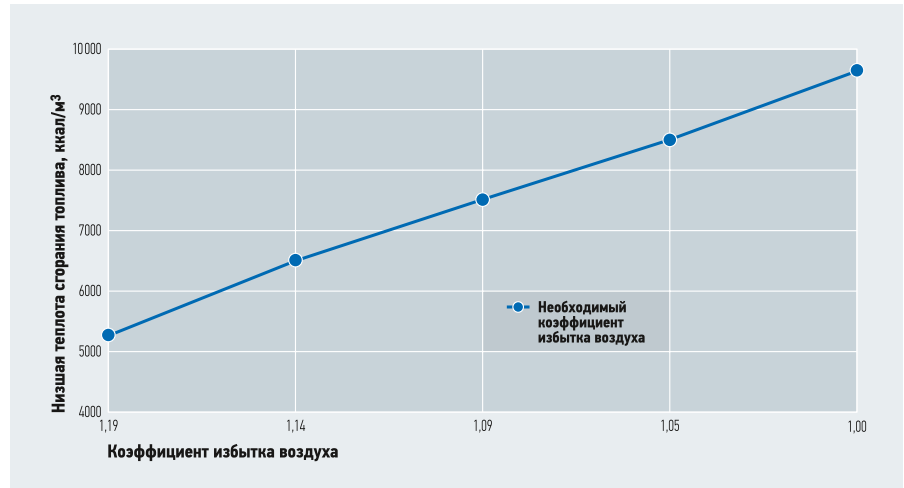


Рис. 2. Зависимость коэффициента избытка воздуха от теплоты сгорания

лучения оптимальной смеси необходимо уменьшить низшую теплоту сгорания газа и увеличивать коэффициент избытка воздуха для удовлетворительной работы газогорелочного оборудования. Оптимальное значение подводимого воздуха $\alpha = 1,19$ при $Q_H^P = 5255,8$ ккал/м³.

Исходя из коэффициента смешивания, зависящего от количества воздуха, а также расхода газовой смеси, рассчитывается площадь сечения отверстия [мм²] для поступления воздуха:

$$f_v = \frac{A' Q_{\text{ном.г}}}{3600 v}. \quad (9)$$

Также один из основных параметров — площадь керамической плитки. Для расчёта принимается размер одной плитки, удельная тепловая нагрузка и диаметр отверстий исходя из состава газа, тогда суммарная площадь [см²] плитки определяется по формуле:

$$f_n = Q / q_y, \quad (10)$$

где q_y — удельная тепловая нагрузка керамической плитки, ккал/(см²·ч).

Количество плиток, шт.:

$$N = f_n / f_{\text{пл}}, \quad (11)$$

где $f_{\text{пл}}$ — площадь одной плитки, см².

Расход газа [м³/ч] для расчёта скорости вылета смеси на одну плитку составляет величину:

$$q_{\text{ном.г}} = q / Q_H^P, \quad (12)$$

где q — количество тепла на одну плитку, ккал/ч.

Скорость вылета газозоудушной смеси [м/с] из отверстий плитки определяется по формуле:

$$v_{\text{см}} = \frac{q_{\text{ном.г}} (1 + A') \times 10^6}{3600 \times 0,785 d_n^2 n}. \quad (13)$$

Полученная скорость должна укладываться в пределы допускаемых скоростей для бедных газозоудушных смесей, что обеспечит удовлетворительную работу излучателя. «Проскок» пламени возникает,

когда скорость распространения пламени превышает скорость истечения газозоудушной смеси, что определяется как

$$v_{\text{мин см}} \leq v_{\text{см}} \leq v_{\text{р.п}}, \quad (14)$$

где $v_{\text{мин см}}$ — минимальная требуемая скорость вылета газозоудушной смеси, м/с; $v_{\text{р.п}}$ — скорость распространения пламени биогаза, м/с.

Также необходимо обеспечить нужное давление в соотношении:

$$\Delta p_{\text{тв.с}} \geq \sum \Delta p_{\text{т}}, \quad (15)$$

где $\Delta p_{\text{тв.с}}$ — входное давление, Па; $\Delta p_{\text{т}}$ — суммарные потери давления на преодоление сопротивлений по всей горелке, Па.

Суммарные потери давления в горелке складываются из потерь в всасывающей камере $\Delta p_{\text{в.к}}$, в инжекторе $\Delta p_{\text{инж}}$ и излучающей панели $\Delta p_{\text{изл.п}}$:

$$\sum \Delta p_{\text{т}} = \Delta p_{\text{в.к}} + \Delta p_{\text{инж}} + \Delta p_{\text{изл.п}}. \quad (16)$$

Определим температуру горения и составим график для выявления оптимального коэффициента избытка воздуха с использованием уже рассчитанных параметров по формуле:

$$t_{\text{г}} = t_1 + \frac{Q_{\text{нг}} - Q_{\text{нг}}^1}{Q_{\text{нг}}^2 - Q_{\text{нг}}^1} (t_2 - t_1), \quad (17)$$

где $Q_{\text{нг}}$ — тепловая нагрузка горелки [кДж] с индексами 1 и 2, соответственно, для температур горения t_1 и t_2 , определяемых по методическим рекомендациям.

Зависимость температуры горения от коэффициента избытка воздуха представлена на рис. 3.

Очевидно, что при увеличении коэффициента избытка воздуха происходит увеличение температуры горения топлива вследствие увеличения количества излучаемой теплоты. Однако наибольшее значение (2090 К) соответствует рассчитанному ранее по формуле (7) коэффициенту 1,19, далее кривая начинает приобретать наклонный характер и пропорционально снижается при увеличении значения коэффициента избытка воздуха.

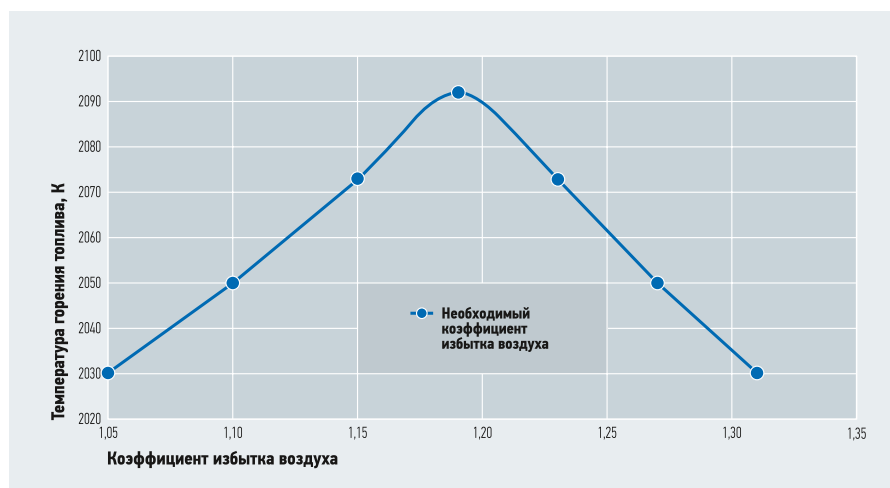


Рис. 3. Зависимость температуры горения от коэффициента избытка воздуха

Параметры оптимизации

Итак, расчёты показали, что при величине тепловой нагрузки излучателя 2,5 кВт (2149,61 ккал/ч) и теплоте сгорания топлива 22 МДж/м³ (5255,8 ккал/м³) будет обеспечиваться полное сгорание и оптимальная скорость вылета газозвдушной смеси, подходящая для бедной газовой смеси, такой как биогаз. При этом максимальная температура горения будет только при условиях, приведённых в табл. 1, и при конструктивных параметрах, перечисленных в табл. 2. Как видно из табл. 1, при расходе газа 0,4 м³/ч необходимо установить площадь сечения форсунки 3,4 мм². При этом коэффициент инжекции 6,51, рассчитываемый из коэффициента избытка воздуха (1,19) и теоретического объёма воздуха (5,474 м³), задаёт оптимальные параметры пути смешивания газовой смеси с воздухом, что исклю-

чит проскок пламени. На основании полученных характеристик обеспечивается скорость вылета газозвдушной смеси из плиток, площадь которых остаётся неизменной, так как зависит от требуемой тепловой потребности излучателя. Таким образом, применение биогаза для светлого излучателя представляется возможным.

Выводы

1. Обоснована возможность работы светлого излучателя на бедной газовой смеси, такой как биогаз.
2. В результате проведённых исследований определены оптимальные условия расхода газа, коэффициента избытка воздуха, связанного с теоретическим расходом воздуха, коэффициента инжекции, удельной тепловой нагрузки на керамическую плитку, скорости вылета газозвдушной смеси и потери давления.

3. Рассчитаны конструктивные характеристики светлого излучателя, площадь поперечного сечения форсунки, основные размеры инжекционного смесителя, а также площадь керамической плитки на основании предложенных условий.

4. Получено графическое изображение расчётов, которое показало зависимости расхода топлива, коэффициента избытка воздуха от теплоты сгорания и зависимость температуры горения с получением максимального значения от коэффициента избытка воздуха.

Основной вывод данной статьи таков: обоснована возможность работы светлого излучателя на бедной газовой смеси, такой как биогаз

Существует ряд проблем для перевода светлого излучателя с природного газа на биогаз. Главной проблемой является разная теплота сгорания, которая влияет на режим работы. Для соответствующего режима работы нужны конструктивные изменения. Можно сделать вывод, что работа светлого излучателя будет обеспечена только при наборе рассчитанных параметров. Для углублённого исследования и утверждения рассчитанных условий оптимизации есть необходимость создания математической модели. ●

Условия оптимизации

табл. 1

Наименования параметра	Значение
Расход газа, м ³ /ч	0,4
Теоретический объём воздуха, м ³	5,474
Коэффициент избытка воздуха	1,19
Коэффициент инжекции	6,51
Удельная тепловая нагрузка на керамическую плитку, ккал/(см ² ·ч)	14,0
Скорость вылета газозвдушной смеси, м/с	0,1
Суммарные потери давления, кПа	0,003

Характеристики светлого излучателя, работающего на бедной газовой смеси (биогаз) табл. 2

Наименование параметра	Значение
Площадь сечения форсунки, мм ²	3,4
Диаметр форсунки, мм	2,0
Длина пути инжекции, мм	48,3
Площадь сечения воздуха для поступления воздуха, мм ²	1446
Диаметр горловины, мм	30
Длина горловины, мм	90
Диаметр диффузора, мм	44
Длина диффузора, мм	117
Диаметр конфузора, мм	60
Длина конфузора, мм	68
Площадь / кол-во керамических плиток, см ² /шт.	154 / 7

1. Баадер В., Доне Е., Бренндерфер М. Биогаз: теория и практика / Пер. с нем. — М.: Колос, 1982. 148 с.
2. Барашкова Н.П. Сравнение инфракрасных газовых излучателей по конструктивным особенностям (светлые и тёмные) и рекомендации по применению // Вестник магистратуры, 2019. №1–2. С. 53–55.
3. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Топливо и теория горения. Ч. 1. Топливо: учебное пособие. — СПб.: СПбГТУРП, 2011. 84 с.
4. Ермаков Н.О., Чуйкин С.В. Проблемы использования биогаза в светлых излучателях // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации, 2020. №3. С. 24–29.
5. Зиганшин Б.М. Снижение энергетических затрат в системах отопления производственных объектов радиационными трубами: дисс. канд. техн. наук по спец. 05.14.04. — Казань: КГАСУ, 2006. 163 с.
6. Зингер А.С., Алимбаев В.Г., Козлов А.В. Газовые инфракрасные излучатели / Инновационное развитие агропромышленного комплекса для обеспечения продовольственной безопасности РФ: Мат. Межд. науч.-практ. конф. (Тюмень, 20.12.2020). — Тюмень: ГАУ Северного Зауралья, 2020. С. 53–60.
7. Кюблер Т. Инфракрасная отопительная техника больших помещений. — СПб.: Печатный двор, 2004. 224 с.
8. Маслов В.А. Энергетический менеджмент: учебное пособие. — Мариуполь: ПДТУ (Украина), 2016. 95 с.
9. Пелипенко В.Н., Слесарев Д.Ю. Газовые горелки инфракрасного излучения: учебное пособие. — Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. 118 с.
10. Чуйкин С.В., Змановский Т.А., Бохан А.Р., Григорьева К.А. Газолучистое отопление. Научно-практические проблемы и особенности проектирования // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации, 2019. №4. С. 29–33.

References — see page 78.

Optimization of operation of a light radiator on a lean gas mixture. Pp. 48–51.

Nikita O. Ermakov, postgraduate student; **Sergey V. Chuikin**, PhD, Associate Professor, the Department of Heat and Gas Supply and Oil and Gas Business, Voronezh State Technical University (VSTU, Voronezh city)

1. V. Baader, E. Done, M. Brennderfer. *Biogaz: teorija i praktika* [Biogas: theory and practice]. Transl. from German. Moscow. Kolos ["An ear" Publishers]. 1982. 148 p. [In Russian]
2. N.P. Barashkova. *Sravnenie infrakrasnykh gazovykh izluchatelej po konstruktivnym osobennostjam (svetlye i temnye) i rekomendacii po primeneniju* [Comparison of infrared gas emitters by design features (light and dark) and recommendations for use]. *Vestnik magistratury* [Bulletin of the Magistracy of Russia (Vestnik Magistratury)]. 2019. No. 1–2. Pp. 53–55. [In Russian]
3. V.N. Belousov, S.N. Smorodin, O.S. Smirnova. *Toplivo i teorija gorenija. Ch. 1. Toplivo: ucheb. pos.* [Fuel and the theory of combustion. Part 1. Fuel: A textbook]. St. Petersburg. SPbGTURP [Saint Petersburg State Technological University of Plant Polymers]. 2011. 84 p. [In Russian]
4. N.O. Ermakov, S.V. Chuikin. *Problemy ispol'zovaniya biogaza v svetlykh izluchatel'jah* [Problems of using biogas in light emitters]. *Gradostroitel'stvo. Infrastruktura. Kommunikacii* ["Urban planning. Infrastructure. Communications" Magazine]. 2020. No. 3. Pp. 24–29. [In Russian]
5. B.M. Ziganshin. *Snizhenie jenergeticheskikh zatrat v sistemah otoplenija proizvodstvennykh ob'ektov radiacionnymi trubami* [Reduction of energy costs in heating systems of production facilities with radiant tubes]. *The dissertation of the PhD of Technical Sciences on specialty No. 05.14.04. Kazan. KGASU* [Kazan State University of Architecture and Engineering]. 2006. 163 p. [In Russian]
6. A.S. Zinger, V.G. Alimbaev, A.V. Kozlov. *Gazovye infrakrasnye izluchateli* [Gas infrared emitters]. *Innovacionnoe razvitie agropromyshlennogo kompleksa dlja obespechenija proizvodstvennoj bezopasnosti Rossijskoj Federacii: Mat. Mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Innovative development of the agro-industrial complex to ensure food safety of the Russian Federation. Proc. of the International Scientific and Practical Conference]. Tyumen. GAU Severnogo Zaural'ja [Tyumen State Agricultural Academy]. 2020. Pp. 53–60. [In Russian]
7. T. Kjubler. *Infrakrasnaja otopitel'naja tehnika bol'shih pomeschenij* [Infrared heating technology for large rooms]. St. Petersburg. Pechatnyj dvor ["The Printing Yard" Publishers]. 2004. 224 p. [In Russian]
8. V.A. Maslov. *Jenergeticheskij menedzhment: ucheb. pos.* [Energy management: A textbook]. Mariupol. DVNZ "PDTU" (Azov State Technical University). Azov, Ukraine. 2016. 95 p. [In Russian]
9. V.N. Pelipenko, D.Ju. Slesarev. *Gazovye gorelki infrakrasnogo izlucheniya: ucheb. pos.* [Gas burners of infrared radiation: A textbook]. Togliatti. Izd-vo TGU [Publishing House of Togliatti State University]. 2012. 118 p. [In Russian]
10. S.V. Chuikin, T.A. Zmanovskij, A.R. Bohan, K.A. Grigor'eva. *Gazoluchistoe otoplenie. Nauchno-prakticheskie problemy i osobennosti proektirovaniya* [Gas-radiant heating. Scientific and practical problems and design features]. *Gradostroitel'stvo. Infrastruktura. Kommunikacii* ["Urban planning. Infrastructure. Communications" Magazine]. 2019. No. 4. Pp. 29–33. [In Russian]