

Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 3. С. 123–129
Thermal processes in engineering, 2025, vol. 17, no. 3, pp. 123–129

Научная статья
УДК 683.878.2
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185058>
EDN: <https://www.elibrary.ru/XTOKVY>

Разработка критериального уравнения расчета теплоотдачи в канале подвода топлива газовой горелки с интенсификатором теплоотдачи

К.В. Алтунин^{1✉}, Н.С. Баданов²

^{1,2}Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Российская Федерация

¹altkonst881@yandex.ru✉

Аннотация. Статья посвящена обобщению результатов экспериментальных исследований с газовой горелкой бытовой плиты. Проведен анализ источников информации по теме исследования, который позволил выявить основных разработчиков и ученых в области газогорелочных устройств с повышенной энергоэффективностью. Эксперименты были проведены со штатной газовой горелкой бытовой плиты «Gefest 1200 – С6», а также с модернизированной, содержащей металлический стержень с интенсификатором теплоотдачи в канале подвода газовой смеси. Подтверждено, что применение резьбы на поверхности металлического стержня, а также более теплопроводного материала позволяют далее повысить экономию природного газа. Проведено обобщение результатов экспериментов в виде критериального уравнения теплоотдачи.

Ключевые слова: газовая горелка, интенсификатор теплоотдачи, природный газ, бытовая плита, число, уравнение

Для цитирования. Алтунин К.В., Баданов Н.С. Разработка критериального уравнения расчета теплоотдачи в канале подвода топлива газовой горелки с интенсификатором теплоотдачи // Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 3. С. 123–129. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185058>

Original article

Development of a criterion equation for heat transfer calculation inside a gaseous fuel supply channel of gas burner with a heat transfer intensifier

K.V. Altunin^{1✉}, N.S. Badanov²

^{1,2}Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russian Federation

¹altkonst881@yandex.ru✉

Abstract. The paper is devoted to generalization of experiments results with a domestic stove gas burner. A new literature analysis was successfully conducted and let to highlight the main scientists, engineers

who paid a great attention to development of new energy-efficient gas burners. All experiments were carried out with a simple gas burner of the domestic stove of Gefest 1200 – C6 type.

During the experimental study there were two main schemes of gas burners that were used, first, the gas burner without any possible heat transfer intensifiers such as a majority of modern gas burners across the world, and second, the gas burner that had a special metal rod attached to the metal lid, and it had the thread on its surface too. Thus, the thread was the main heat transfer intensifier. The experimental study also included an application of the same metal rod but with an additional heat transfer intensifier such as two longitudinal spacing gaps. The gaseous fuel supply channel was in a form of diffusor.

It was proved that the following increase of heat conduction coefficient let to increase a heat transfer coefficient and, simultaneously, increase of efficiency of the gas burner as well. The maximum heat transfer coefficient was obtained on the level of $h = 989 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ with the application of long copper rod with its thread and without any longitudinal spacing gaps.

The successful generalization of all the data was done and the new heat transfer equation was obtained that included dimensionless numbers such as Nusselt and Reynolds criterions. This equation lets to calculate the heat transfer coefficient inside a gaseous fuel supply channel of gas burner with a heat transfer intensifier. It was noticed that presence or absence of longitudinal spacing gaps in the metal rod did not make influence on the empirical coefficient c in the obtained heat transfer criterion equation if the calculation was built on thermophysical properties of natural gas and air mixture.

Additionally, new graphs such as heat transfer coefficient vs. Reynolds number graphs were created for special cases of heat properties calculation based on natural gas data and based on gas-air mixture data.

Keywords: gas burner, heat transfer intensifier, natural gas, gas stove, number, equation

For citation. Altunin K.V., Badanov N.S. Development of a criterion equation for heat transfer calculation inside a gaseous fuel supply channel of gas burner with a heat transfer intensifier. *Thermal processes in engineering*. 2025, vol. 17, no. 3, pp. 123–129. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185058>

Введение

Непрекращающийся рост цен на энергоносители, включая природный газ, заставляет задуматься о разработке новых и более экономичных газогорелочных устройств.

Большинство современных газовых плит, предназначенных для приготовления пищи, оборудованы стандартными горелками, как правило, малой, средней и большой мощности. Но в данных горелочных устройствах обычно отсутствуют какие-либо интенсификаторы теплоотдачи, а также нет внутренней регенерации тепла.

Настоящая статья посвящена обобщению результатов экспериментальных исследований с газовой горелкой средней мощности бытовой плиты марки «Gefest 1200 – С6».

Цель работы: разработка критериального уравнения расчета теплоотдачи в канале подвода топлива газовой горелки, содержащей интенсификатор теплоотдачи.

Существующие конструктивные схемы газовых горелок бытовых плит повышенной энергоэффективности

В 2013 г. получен патент на полезную модель «Газовая горелка» [1], общий вид которой приведен на рис. 1, где: 1 – канал подвода газа; 2 – корпус; 3 – смесительная камера; 4 – головка; 5 – зазор; 6 – огневые отверстия; 7 – крышка; 8 – стержень; 9 – интенсификатор теплоотдачи.

Представленная газовая горелка функционирует следующим образом (рис. 1). При работе смесь природного газа и первичного воздуха подводится по каналу 1, далее поступает в смесительную камеру 3, воспламеняется, а через огневые отверстия 6 языки пламени выходят за пределы головки 4 и смесительной камеры 3. При сгорании топлива выделяется тепло: часть тепла передается нагреваемому объекту, к примеру, сосуду с водой, другая часть тепла - потери в окружающую среду, остальная энергия идет на поддержание самого пламени. В данном случае с целью уменьшения потерь теплоты предлагается

аккумулировать часть тепла при помощи системы: крышки 7, соединенной стержнем 8 с интенсификатором теплоотдачи 9, которые целесообразно изготавливать из металлов или металлических сплавов с высоким коэффициентом теплопроводности. Таким образом, при горении часть тепла поглощается материалом крышки 7, передается по стержню 8 интенсификатору теплоотдачи 9.

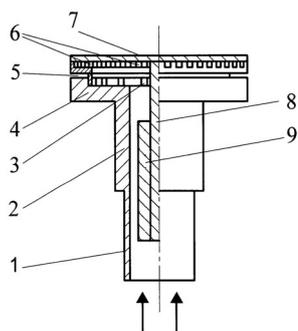


Рис. 1. Газовая горелка (патент РФ на полезную модель № 129600)

Ненагретый газ (или смесь газов), проходя через канал подвода газа 1, частично нагревается, происходит внутренняя регенерация тепла с интенсификацией теплоотдачи. Стержень с интенсификатором теплоотдачи 9 может быть выполнен, к примеру, в виде трубки с искусственной шероховатостью, резьбой, в виде шнекового завихрителя или цилиндра с продольными ребрами, в виде пористой металлической вставки или скрученной металлической проволоки, в виде какого-либо устройства, закручивающего поток или содержащего развитую поверхность с выемками (лунками) и выступами и т.п. Другими словами, здесь вполне возможно применить разнообразные интенсификаторы теплоотдачи (ИТ).

В результате обобщения данных экспериментов с разными ИТ был получен целый ряд критериальных уравнений, показанных в таблице 1 [2, 3, 4].

Таблица 1. Критериальные уравнения расчета теплоотдачи в канале подачи газовой горелки в форме конфузора с разными ИТ [2, 3, 4]

Вид ИТ на металлическом стержне	Критериальное уравнение с числом Pr	Критериальное уравнение без Pr
Резьба и продольные зазоры в стальном стержне	$Nu_m = 0,99RePr$. (1)	$Nu_m = 0,73Re$. (2)
Коническое винтовое оребрение на стальном стержне	$Nu_m = 1,7(RePr)^{0,76}$. (3)	$Nu_m = 1,3Re^{0,76}$. (4)
Коническое винтовое оребрение на стальном стержне, обмотанным медной проволокой	$Nu_m = 1,42(RePr)^{0,8}$. (5)	$Nu_m = 1,01Re^{0,81}$. (6)

Впоследствии другими авторами был проведен ряд научных исследований, связанный с этой темой. Например, известна «Газовая горелка с коническим рассекателем» [5], в которой содержится корпус 1, смеситель 4 с установленным на входе газовым соплом 2 с аксиальным выходным отверстием 3, крышку 6, образующую с выходным торцом 5 смесителя 4 огневые отверстия 7, с внутренней стороны в центре крышки 6 расположен рассекаТЕЛЬ 8, обращенный вершиной в сторону газового сопла. В нижней части корпуса 1 на уровне сопла 3 имеются равномерно распределенные отверстия 9 для подачи первичного воздуха. При этом рассекаТЕЛЬ 8 выполнен в форме конуса и жестко связан основанием с внутренней поверхностью крышки 6, при этом наружная поверхность конуса выполнена вогнутой с радиусом R , равным высоте рассекателя h (рис. 2).

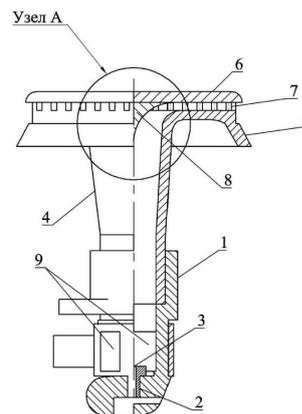


Рис. 2. Газовая горелка с коническим рассекателем

Как отмечают авторы [5], данная полезная модель направлена на повышение эффективности работы газовой горелки за счет устранения завихрений и стабилизации потока газозвдушной смеси в области присоединения рассекателя к крышке горелки, что обеспечивает интенсификацию предварительного подогрева газозвдушной смеси.

Теплофизические свойства воздуха, природного газа и газовой смеси

Подробно рассмотрены теплофизические свойства (ТФС) сухого воздуха при нормальном давлении [6], а также ТФС природного газа [7], на основе чего созданы таблицы нахождения ТФС газозвдушной смеси при разном соотно-

пении природного газа и воздуха. В таблице 2 представлены ТФС газовой смеси (природный газ и воздух), при этом расчет ТФС проведен на основе формул для газовых смесей [7, 8].

Таблица 2. ТФС смеси природного газа и сухого воздуха в зависимости от температуры при давлении $p = 0,1$ МПа (80 % воздуха, 20 % природного газа, по объему)

T , К	t , °C	λ , Вт/(м·К)	C_p , Дж/(кг·К)	μ , Па·с	ν , 10^{-5} м ² /с	ρ , кг/м ³	Pr
293	20	0,027167	1159	1,66943	1,51217	1,104	0,712
303	30	0,028098	1161	1,71575	1,60801	1,067	0,709
313	40	0,029115	1164	1,76177	1,70648	1,032	0,704
323	50	0,029972	1167	1,80779	1,80706	1,000	0,704
333	60	0,030834	1171	1,85350	1,91083	0,970	0,704
343	70	0,031616	1178	1,89922	2,01616	0,942	0,708
353	80	0,032645	1181	1,94463	2,12761	0,914	0,704
363	90	0,033594	1184	1,98265	2,23121	0,889	0,699
373	100	0,034862	1194	2,02862	2,34576	0,865	0,695
393	120	0,036538	1201	2,11146	2,57370	0,820	0,694

В 2024 г. проведены новые эксперименты с горелкой бытовой газовой плиты марки «Gefest 1200 – Сб», в которой внутри газоподводящего канала в виде диффузора 10 размещался металлический стержень с интенсификатором теплоотдачи (ИТ) 9 в виде резьбы, при этом применялись стержни, изготовленные из стали и из меди. В схеме также применялась уплотнительная шайба 13. Природный газ подавался через форсунку 11 (рис. 3).

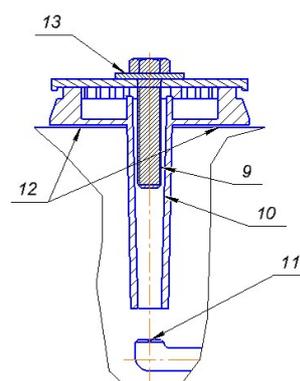


Рис. 3. Газовая горелка с диффузором и интенсификатором теплоотдачи, где 9 – интенсификатор теплоотдачи, 10 – канал подачи газа в виде диффузора, 11 – форсунка подачи газа, 12 – корпус бытовой газовой плиты, 13 – уплотнительная шайба

В ходе экспериментов измерялись температуры на разных поверхностях горелки. При горении тепловой поток шел на подогрев стальной емкости с водой (до 373К), а также имелись тепловые потери. В случае с металлическим стержнем с ИТ – часть теплового потока возвращалась обратно, т.о., происходила эффективная внутренняя регенерация тепла. Геометрические параметры данной горелки, распределение температур в горелке, основное оборудование для проведения экспериментов, методика проведения экспериментальных исследований показаны в предыдущей статье [9]. В таблице 3 представлены основные характеристики датчиков и приборов, задействованных в экспериментах.

Таблица 3. Характеристики основных датчиков и приборов

№ п/п	Измеряемые параметры	Обозначение	Измерительные и регистрирующие приборы	Единицы измерения	Класс точности	Диапазон измерений	Цена деления/разрешение
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Объем природного газа	V	Газовый счетчик	м ³	1,5	0...99999,999	0,001
2	Время эксперимента	τ	Секундомер часов смартфона Samsung	с	0,001	0...6039	0,01
3	Масса воды, емкости	m	Электронные весы Tefal BC5304V0	г	1	0...5000	1
4	Диаметр, толщина, длина (крышки, канала, стержня)	d, s, l	Штангенциркуль Gigant CLP 150 (вид ШЦ-1)	мм	2	0...150	0,1
			Линейка	мм	1	0...200	1
5	Температура крышки, стержня с ИТ	t	Термометр (пирометр) FLUKE 568	°C/°F	1	-40°C...+800°C	0,1
6	Температура потока смеси, поверхности стержня с ИТ	t	Термометр Mastech MS6512 цифрового типа (с двумя термопарами)	°C/°F/K	0,2	-200°C...+1372°C	0,1
7	Температура воды	t	Термометр ТЛ-2 №3 исп. 1	°C	1	(0...+150) °C	1
			Цифровой термометр Mastech MS6500	°C/°F	0,5	-50°C...750°C	1

Результаты экспериментальных исследований газовой горелки с интенсификатором теплоотдачи из разных металлических материалов

Необходимо отметить, что в ходе расчетов энергоэффективности (EE) газовой горелки оказалось, что наиболее экономичной является газовая горелка, содержащая длинный медный стержень с резьбой (без продольных зазоров) с показателем $EE = 53,82\%$, а наименее энергоэффективной – базовая горелка без стержня и без ИТ с результатом $EE = 45,92\%$ [9]. Данные по теплоотдаче в канале подачи горелки представлены на рис. 4, 5.

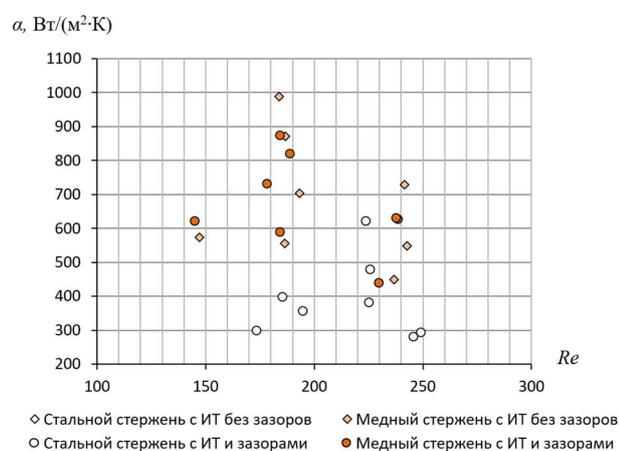


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от числа Re при расчете по ТФС природного газа (газовоздушный канал – диффузор)

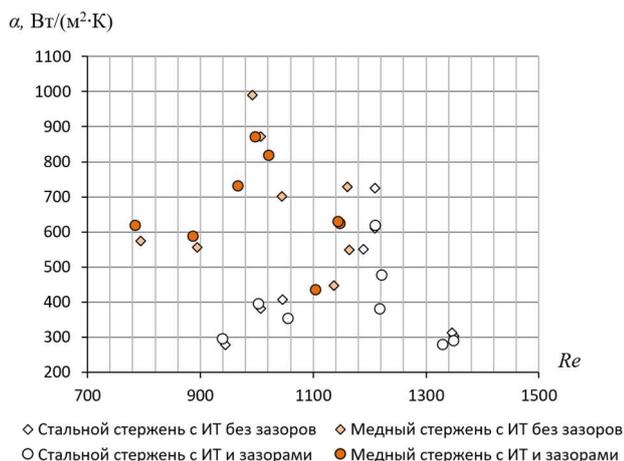


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от числа Re при расчете по ТФС смеси 80 % воздуха и 20 % природного газа (газовоздушный канал – диффузор)

Из рис. 4, 5 видно, что максимальное значение коэффициента теплоотдачи составило $\alpha = 989 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ – при применении длинного стерж-

ня из меди без продольных зазоров. Необходимо отметить, что все эксперименты были проведены при установившихся стационарных режимах.

Разработка критериального уравнения расчета теплоотдачи в канале подвода газообразного топлива

На основе обобщения результатов экспериментов с газовой горелкой, содержащей металлический стержень, установленный в канале подвода газового топлива в виде диффузора (рис. 3), с интенсификатором теплоотдачи в виде резьбы с двумя продольными зазорами и без зазоров, было получено критериальное уравнение расчета теплоотдачи:

$$Nu_m = cRe^{0,8}, \quad (1)$$

где Nu – число Нуссельта, Re – число Рейнольдса, c – эмпирический коэффициент, значения которого сведены в таблицу 4.

При расчете по (1) погрешность не превысила 30 %.

Таблица 4. Значения эмпирического коэффициента c

Длина, материал стержня с ИТ в виде резьбы (в диффузоре)	Расчет по ТФС природного газа		Расчет по ТФС газовой смеси (80 % воздуха, 20 % природного газа, по объему)
	стержень без зазоров	стержень с зазорами	
	c	c	c
$L = 35 \text{ мм}$, стальной	0,67	0,62	0,20
$L = 20 \text{ мм}$, стальной	0,52	0,45	0,16
$L = 35 \text{ мм}$, медный	1,20	1,20	0,35
$L = 20 \text{ мм}$, медный	0,76	0,76	0,23

Необходимо отметить, что в формуле (1) нет числа Прандтля, так как его значения практически не менялись при разных температурных режимах. Однако для природного газа числа Прандтля были больше, чем для смеси воздуха с природным газом (для природного газа $Pr_{max} \approx 0,74$, для газовой смеси (80 % воздуха, 20 % природного газа, по объему) $Pr_{max} \approx 0,71$).

Сравнение результатов экспериментов

Проведено сравнение полученных результатов экспериментов с данными, найденными ранее автором [4] при составлении уравнений (2), (4), (6).

Для проведения сравнения все данные были получены при значении низшей теплоты сгорания природного газа на уровне $Q_n = 34,26$ МДж/м³. В результате построены графики сравнения (рис. 6, 7).

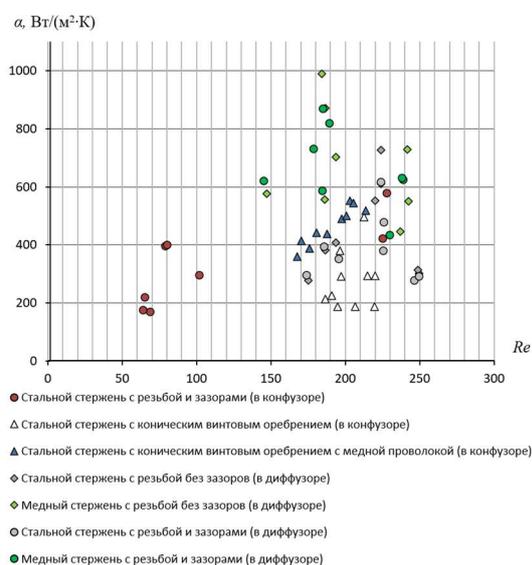


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от числа Re при применении разных геометрий каналов подачи газовой смеси и разных ИТ (расчет проведен по ТФС природного газа)

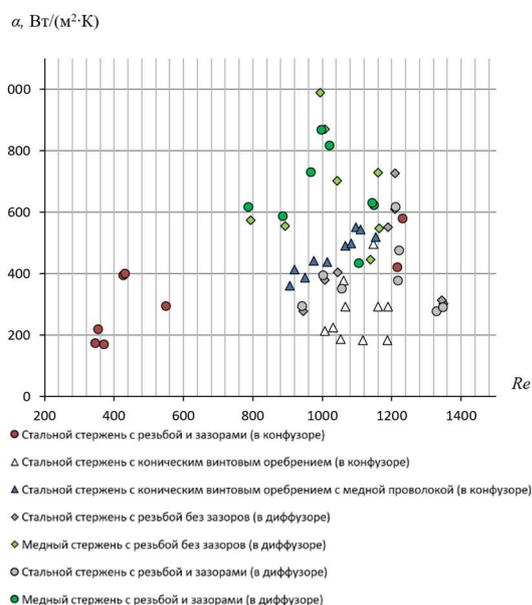


Рис. 7. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от числа Re при применении разных геометрий каналов подачи газовой смеси и разных ИТ (расчет проведен по ТФС смеси 80 % воздуха и 20 % природного газа)

На рис. 6, 7 газоподающий канал газовой горелки по форме конфузора применялся в экспериментах автора [4], а по форме диффузора – в последних экспериментах (рис. 3).

Выводы

Таким образом, на основе ранее проведенных экспериментальных исследований проведено обобщение результатов в виде единого уравнения теплообмена, позволяющего определить значение коэффициента теплоотдачи в канале подачи газозвушной смеси по форме диффузора с металлическим стержнем, содержащим интенсификатор теплоотдачи. Выдвинута гипотеза о том, что с увеличением коэффициента теплопроводности металлического стержня повышается энергоэффективность, коэффициент теплоотдачи и экономичность сжигания природного газа. Максимальное значение коэффициента теплоотдачи было получено при применении длинного медного стержня с резьбой на поверхности.

В ходе анализа литературы найдены подобные конструктивные схемы газовых горелок, однако не обнаружены какие-либо данные по применению высокотеплопроводных материалов, например, меди, в качестве основного материала для интенсификатора теплоотдачи и металлической вставки (стержня, конусного рассекателя и т.п.).

Проведен анализ полученного критериального уравнения, из которого следует, что: расчет теплофизических свойств топлива следует проводить по газозвушной смеси; зазоры в стержне незначительно влияют на изменение эмпирического коэффициента c при расчете по ТФС природного газа в случае проведения экспериментов с ИТ в канале-диффузоре.

Построены графики сравнения коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса при расчете по ТФС природного газа и ТФС газозвушной смеси.

Намечены дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования.

Список источников

1. Алтуни К.В. *Газовая горелка*. Патент RU №129600. Бюл. № 18, 27.06.2013.
2. Altunin K.V. Gas burner with improved economical efficiency // *Journal of Engineering Physics and Thermodynamics*. 2017. Vol 90. № 2. pp. 480–483.
3. Altunin K.V. Experimental Research on a Gas Burner with a Heat-Transfer Enhancer in a Rod Form // *High Temperature J*. 2020. Vol. 58. № 1. pp. 126–131.
4. Алтуни К.В. Разработка научных основ создания эффективных систем подвода для жидких и газообразных горючих и теплоносителей в тепловых двигателях и энергоустановках: Дисс. ... докт. техн. наук. Казань, 2024. 707 с.

5. Суслов Д.Ю., Рамазанов Р.С., Кушев Л.А. и др. Газовая горелка с коническим рассекателем. Патент RU № 210455. Бюл. № 11|, 15.04.2022.
6. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: ООО Старс, 2006. 720 с.
7. Бакулин В.Н., Берещенко Е.М., Дубовкин Н.Ф. и др. Газовые топлива и их компоненты. Свойства, получение, применение, экология: справочник. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. 614 с.
8. Болгарский А.В., Голдобеев В.И., Идиатуллин Н.С. и др. Сборник задач по термодинамике и теплопередаче: учебное пособие для авиационных вузов. М.: Высшая школа, 1972. 304 с.
9. Баданов Н.С. Расчет энергоэффективности газовых горелок бытового применения с интенсификатором теплоотдачи из разных металлических материалов // Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 10. С. 455–461.
3. Altunin KV. Experimental Research on a Gas Burner with a Heat-Transfer Enhancer in a Rod Form. *High Temperature J.* 2020;58(1):126–131.
4. Altunin KV. *Development of scientific basics of creation of effective supply systems for liquid and gaseous fuels and heat carriers in heat engines and power plants.* PhD. thesis. Kazan; 2024. 707 p. (In Russ.).
5. Suslov DYu, Ramazanov RS, Kushchev LA et al. *Gas Burner with a Conical Flow Divider.* Patent RU 210455. 15.04.2022 (In Russ.).
6. Vargaftik N.B. *Handbook of Thermophysical Properties of Gases and Liquids.* Moscow: Stars; 2006. 720 p. (In Russ.).
7. Bakulin VN, Bereshchenko EM, Dubovkin NF et al. *Gaseous Fuels and its Components. Properties, Getting, Application, Ecology: Handbook.* Moscow: MEI, 2009. 614 p. (In Russ.).
8. Bolgarskii AV, Goldobeev VI, Idiatullin NS et al. *Handbook of Tasks for Thermodynamics and Heat Transfer: Training Manual for Aviation Higher Education Institutes.* Moscow: Vysshaya shkola, 1972. 304 p. (In Russ.).
9. Badanov NS. Energy-Efficiency Calculation of Gas Burners for Home Usage with a Heat Transfer Intensifier made of Different Metal Materials. *Thermal Processes in Engineering.* 2024; 16(10):455–461. (In Russ.).

References

1. Altunin KV. *Gas Burner.* Patent RU 129600, 27.06.2013. (In Russ.).
2. Altunin KV. Gas burner with improved economical efficiency. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics.* 2017;90(2):480–483.