

УДК 519.7; 622.691.4

**ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ТЕМПЕРАТУРУ
ПЛАМЕНИ ФАКЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ**

**THE INFLUENCE OF DIFFERENT FACTORS ON THE FLAME
TEMPERATURE OF THE FLARE UNIT**

Андреева Д. Ю., Юлдыбаев Л. Х.

**Уфимский государственный нефтяной технический университет
г. Уфа, Российская Федерация**

D. Yu. Andreeva, L. H. Yuldybaev

**Ufa State Petroleum Technological University,
Ufa, the Russian Federation**

Аннотация. Рассмотрено решение задачи оценки температуры пламени и исследование на нее основных параметров факельной установки. На базовом предприятии в соответствие с техническим заданием была спроектирована факельная установка, предназначенная для сжигания сбросного газа на одном из месторождений РФ.

Оценка температуры во фронте пламени сбрасываемого газа находилась из следующих соображений.

Из теории известно, что при горении не перемешанных газов фронт пламени устанавливается в тех точках, где подходящие в зону горения потоки реагентов (сбрасываемого газа и воздуха) находятся в стехиометрическом соотношении. При этом температура во фронте пламени будет максимальной. При такой модели процесса горения, температуру на фронте пламени можно определить из уравнения теплового баланса. Температуру на фронте пламени T_{ϕ} , входящую в качестве аргумента во все слагаемые правой части приведенного

уравнения, можно определить, решив это нелинейное относительно температуры уравнение тем или иным способом. В данной работе для нахождения температуры был использован численный метод решения нелинейного уравнения методом половинного деления (дихотомии).

В работе приведены исходные данные и пример расчета температуры спроектированной факельной установки. Произведен расчет влияния на температуру пламени факельной установки следующих факторов: расхода сбрасываемого газа, диаметра оголовка факельной трубы, температуры сбрасываемого газа, коэффициента полноты сгорания, низшей теплоты сгорания некоторых природных газов и коэффициента избытка воздуха.

Результатами работы являются инженерная методика и компьютерная программа расчета температуры, использованные при анализе вариантов проектируемой конструкции факельной установки.

Abstract. The article considers the problem of estimation of flame temperature and the study on it the main parameters of a flare. In the typical company in accordance with the terms of reference were designed flare unit designed for burning waste gas in one of the fields of the Russian Federation.

Evaluation of the temperature in the flame front of gas were discharged from the following considerations.

From theory it is known that during the combustion of unmixed gases the flame front is established in those locations where suitable in the combustion zone the flow of reagents (discharged gas and air) are in stoichiometric ratio. The temperature in the flame front is maximized. In this model the combustion process, the temperature of the flame front can be determined from the heat balance equation. The temperature of the flame front, which is an argument in all the components of the right side of the equation, you can determine in deciding this non-linear relative to the temperature equation one way or another. In this paper, for finding temperature was used numerical method for solving nonlinear equations by the method of half division (dichotomy). The paper presents original data and a sample calculation of the temperature-designed

flare. The calculation of the effect on the flame temperature of the flare unit of the following factors: flow rate of discharged gas, the diameter of the tip the flare, temperature of discharged gas, combustion efficiency, net calorific value of natural gases and the excess air ratio. The results of this work are engineering methods and a computer program for calculating the temperature used in the analysis of variants of the designed construction of a flare.

Ключевые слова: факельная установка, фронт пламени, температура пламени, дихотомия, природные газы, тепловой баланс.

Key words: flare unit, the flame front, the flame temperature, calculation algorithm, analysis of the influence factors.

В данной работе решается задача по оценке температуры пламени факельной установки, а также исследованию влияния различных факторов на температуру пламени.

На базовом предприятии в соответствии с техническим заданием была спроектирована факельная установка, предназначенная для сжигания сбросного газа на одном из месторождений РФ. Задача по оценке температуры во фронте пламени сбрасываемого газа решалась следующим образом.

Из теории известно [1–3, 8 - 9], что при горении не перемешанных газов фронт пламени устанавливается в тех точках, где подходящие в зону горения потоки реагентов (сбрасываемого газа и воздуха) находятся в стехиометрическом соотношении. При этом температура во фронте пламени будет максимальной.

При такой модели процесса горения, температуру на фронте пламени можно определить из уравнения теплового баланса [1–3].

$$Q_{\text{физ}} + Q_{\text{хим}} = Q_{\text{изл}} + Q_{\text{конв}} + Q_{\text{отв}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{физ}}$ – подведенная физическая теплота (внутренняя энергия реагентов);

$Q_{\text{хим}}$ – подведенная теплота химических реакций (теплота сгорания газа);

$Q_{\text{изл}}$ – теплота, отведенная излучением;

$Q_{\text{конв}}$ – теплота, отведенная конвекцией;

$Q_{\text{отв}}$ – отведенная физическая теплота (внутренняя энергия продуктов сгорания).

Температуру на фронте пламени T_{ϕ} , входящую в качестве аргумента во все слагаемые правой части уравнения (1), можно определить, решив это нелинейное относительно температуры уравнение тем или иным способом.

В данной работе для нахождения температуры пламени был использован численный метод решения нелинейного уравнения методом половинного деления (дихотомии) [5]. Оценив значение температуры на фронте пламени T_{ϕ} , можно рассчитать, например, воздействие теплового облучения от факела. Методики расчета теплового облучения от факелов описаны в [10].

Исходными данными для расчета температуры являются:

$w = 313500$ – максимальное количество сбрасываемого газа, $\frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$;

$T_r = 22,5$ – температура сбрасываемого газа, С;

$m = 17,69$ – молекулярный вес, $\frac{\text{кг}}{\text{моль}}$;

$k = 1,314$ – показатель адиабаты;

$H_u = 9082,11$ – низшая теплота сгорания, $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^3}$;

$\eta_z = 0,95$ – коэффициент полноты сгорания;

$\alpha = 1,6$ – коэффициент избытка воздуха;

$D_{oz} = 1,0$ – диаметр проходного сечения оголовка, м;

$\rho = 0,733$ – плотность газа, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

$v_в = 31,75$ – максимальная скорость ветра в данной местности, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$;

$T_n = 20$ – температура окружающей среды, С;

$\varepsilon_\phi = 0,8$ – степень черноты факела;

$\alpha_t = 0,5$ – коэффициент конвективной теплоотдачи факела, $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}}$;

$H = 40$ – высота факельного ствола, м.

Методика расчета температуры во фронте пламени

1) Скорость истечения газового потока из оголовка

$$v = \frac{w}{0,785(D_{oz})^2 3600} \quad (2)$$

2) Длина пламени

$$L_\phi = 118 D_{oz} \quad (3)$$

3) Площадь боковой поверхности факела

$$S_{бок} = 3,14 D_{oz} L_\phi \quad (4)$$

4) Задаем температуру факела

$$T_\phi = T_{\phi 0} \quad (5)$$

5) Теплота, отведенная излучением

$$Q_{изл} = C_s \varepsilon_\phi S_{бок} (T_\phi^4 - T_n^4), \text{ где } C_s = 20,77 \cdot 10^{-8} \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{К}^4} \quad [4] \quad (6)$$

6) Теплота, отведенная конвекцией

$$Q_{конв} = \alpha_t S_{бок} (T_\phi - T_n) \quad (7)$$

7) Подведенная физическая теплота

$$Q_{\text{физ}} = w(C_{\text{пр}} T_{\text{Г}} + \alpha L_0 C_{\text{рв}} T_{\text{Н}}), \quad (8)$$

где L_0 - стехиометрический массовый расход воздуха, кг/кг;

$$L_0 = 0,01(4,3CH_4 + 5,07C_2H_6 + 5,18C_3H_8 + 5,25C_4H_{10} + 5,3C_5H_{12}) \quad (9)$$

Коэффициент избытка воздуха вдоль факела принят $\alpha = 1,6$, исходя из того, что для полного сгорания в струе необходимо примерно в 1,5 раза больше воздуха, чем при предварительном смешении [4].

Удельные теплоемкости воздуха, газа (метана) и продуктов сгорания рассчитываются по следующим зависимостям, аппроксимирующим табличные справочные данные [6 - 8]:

$$C_{\text{рв}} = 1,297 + 0,022t + 0,168t^2 - 0,077t^3, \quad \text{где } t = \frac{t_6}{1000} \quad (10)$$

$$C_{\text{рз}} = 1,544 + 0,989t + 0,606t^2 - 0,436t^3, \quad \text{где } t = \frac{t_2}{1000} \quad (11)$$

$$C_{\text{рнс}} = 1,602 + 1,044t - 0,639t^2 + 0,189t^3, \quad \text{где } t = \frac{t_{\phi}}{1000} \quad (12)$$

8) Подведенная теплота химических реакций (горения)

$$Q_{\text{хим}} = wHu \eta_z \quad (13)$$

9) Температура факела во фронте пламени, определяется из уравнения теплового баланса

$$T_{\phi} = \frac{Q_{\text{физ}} + Q_{\text{хим}} - Q_{\text{изл}} - Q_{\text{конв}}}{w(1 + \alpha L_0) C_{\text{рнс}}} \quad (14)$$

10) Если температура факела T_{ϕ} отличается от температуры $T_{\phi 0}$ по модулю более чем на 1 градус, то расчет повторяется с пункта 5 с новым значением $T_{\phi 0} = T_{\phi}$ до выполнения заданного условия. Процесс последовательных приближений подбора температуры T_{ϕ} реализован в программе с помощью метода дихотомии.

Методика расчета реализована в компьютерной программе в системе Delphi 7.

Ниже приведен пример базового варианта расчета для приведенных выше исходных данных:

Скорость истечения газа, м/с	=	111,0
Длина пламени факела, м	=	15,49
Боковая поверхность факела, м ²	=	37,8
Температура на фронте факела, К	=	1887

На рисунках 1– 6 приведены графики изменения температуры на фронте пламени факела в зависимости от некоторых факторов: расхода сбрасываемого газа, диаметра оголовка факельной трубы, температуры сбрасываемого газа, коэффициента полноты сгорания, теплоты сгорания и коэффициента избытка воздуха.

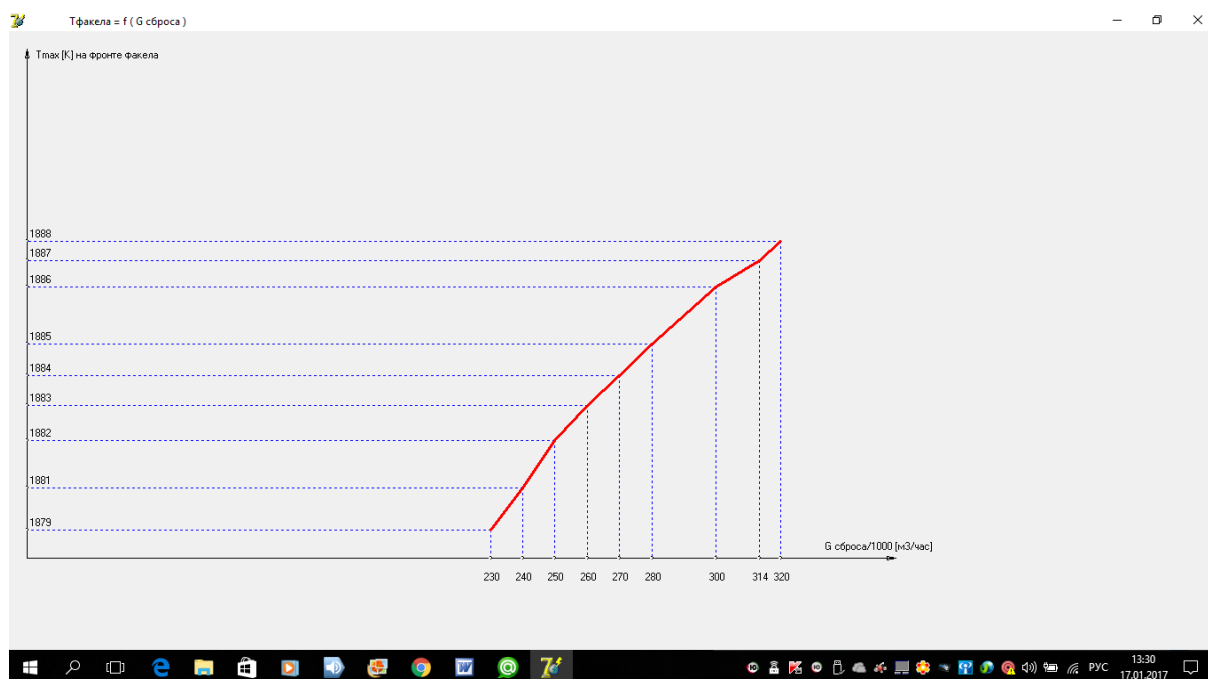


Рисунок 1. Изменение температуры пламени от расхода сбрасываемого газа



Рисунок 2. Изменение температуры пламени от диаметра оголовка трубы



Рисунок 3. Изменение температуры пламени от температуры сбрасываемого газа

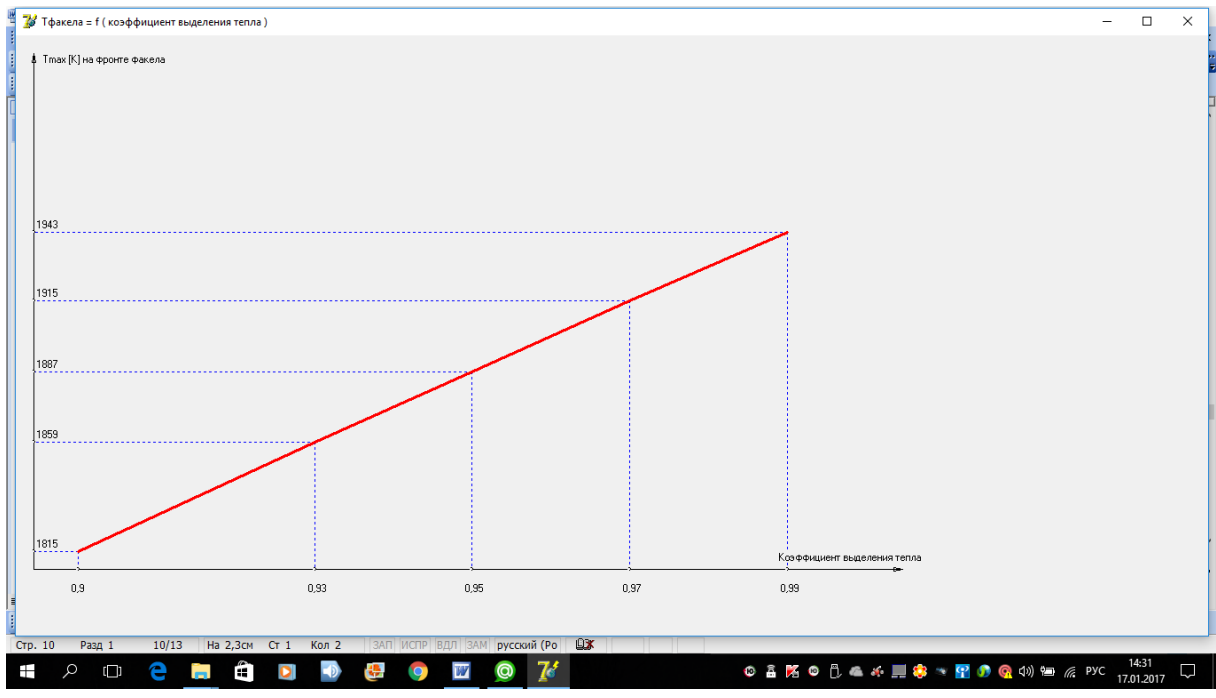


Рисунок 4. Изменение температуры пламени от коэффициента выделения тепла

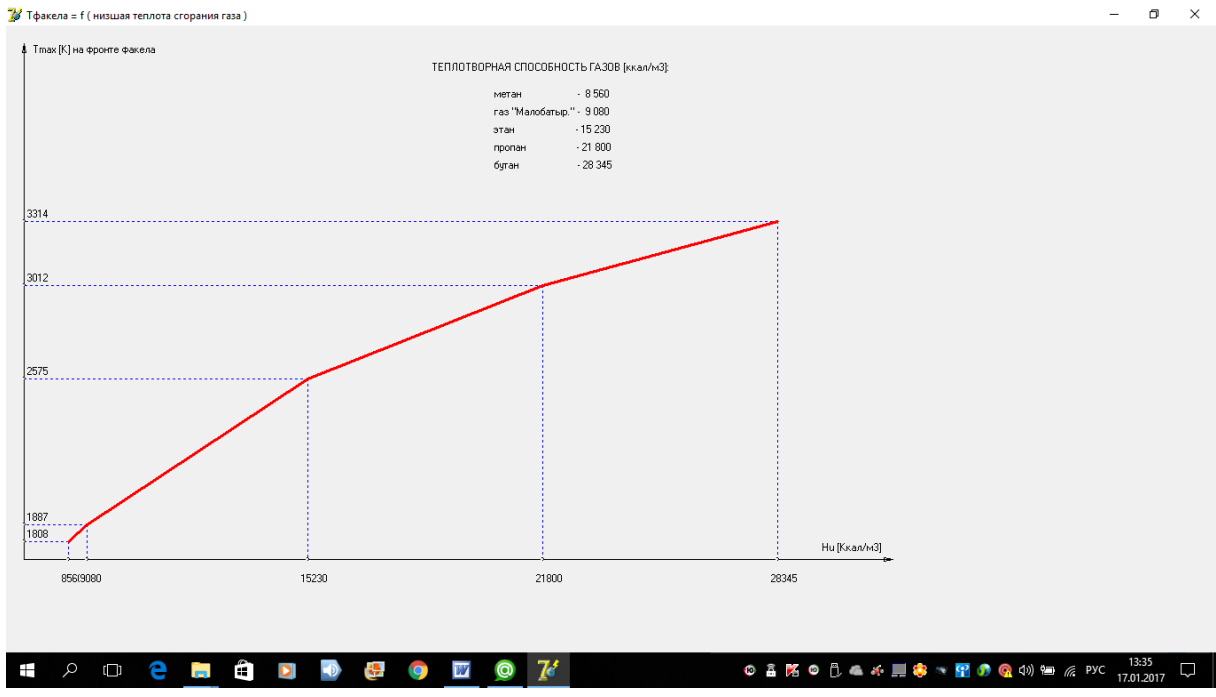


Рисунок 5. Изменение температуры пламени от теплоты сгорания газа

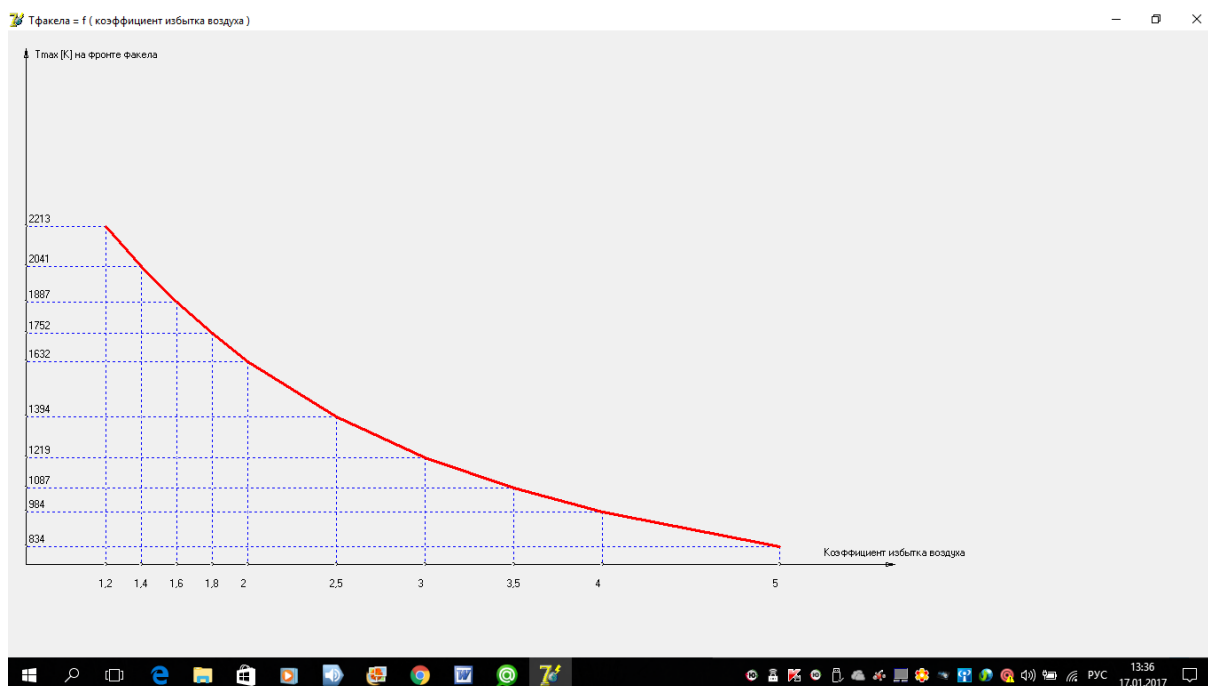


Рисунок 6. Изменение температуры пламени от коэффициента избытка воздуха

Выводы

Результатами работы являются методика, компьютерная программа расчета, исследование влияния некоторых факторов на температуру пламени. Эти расчеты были использованы при анализе вариантов проектируемой конструкции факельной установки.

Список используемых источников

- 1 Вулис Л.А., Ершин Ш.А., Ярин Л.П. Основы теории газового факела. М.: Энергия, 1968. 203с.
- 2 Вулис Л.А., Ярин Л.П. Аэродинамика факела. М.: Энергия, 1978. 216 с.
- 3 Пацков Е.А. Промышленные факелы: расчет и реализация //Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2001. №1. С.35-37.
- 4 Макаров А.Н. Теория и практика теплообмена в электродуговых и факельных печах, топках, камерах сгорания. Тверь: ТГТУ, 2007. 184с.

- 5 Моисеев Н. Н. Методы оптимизации : учебное пособие для вузов по спец. "Прикладная математика". М.: Наука, 1978. 256с.
- 6 Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 721 с.
- 7 Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгилов М.К. Хрестоматия энергосбережения: справочник в 2-х т. М.:Теплотехник, 2006. Т. 2. 650с.
- 8 Блинов Е.А. Топливо и теория горения. СПб.: СЗТУ, 2007. Ч. 1. Подготовка и сжигание топлива. 119с.
- 9 Гущин С.Н., Князев М.Д. Расчеты горения топлив: учеб.-метод. пособие. Екатеринбург. Уфа: УГТУ – УПИ, 1995. 25с.
- 10 Андреева Д.Ю., Юлдыбаев Л.Х. Расчет температуры и плотности теплового потока от пламени факельной установки с подачей пара//Вестник молодого ученого. 2016. Вып. № 1. С. 29-33.

References

- 1 Vulis L.A., Ershin Sh.A., Jarin L.P. Osnovy teorii gazovogo fakela. M.: Jenergija, 1968. 203 s. [in Russian].
- 2 Vulis L.A., Jarin L.P. Ajerodinamika fakela. M.: Jenergija, 1978. 216 s. [in Russian].
- 3 Packov E.A. Promyshlennye fakely: raschet i realizacija. / E.A. Packov //Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie. 2001. №1. S. 35-37. [in Russian].
- 4 Makarov A.N. Teorija i praktika teploobmena v jelektrodugovyh i fakel'nyh pechah, topkah, kamerah sgoranija. Tver': TGTU, 2007. 184 s. [in Russian].
- 5 Moiseev N. N. Metody optimizacii : uchebnoe posobie dlja vuzov po spec. "Prikladnaja matematika". M.: Nauka, 1978. 256s. [in Russian].
- 6 Vargaftik N.B. Spravochnik po teplofizicheskim svojstvam gazov i zhidkostej. M.: Nauka, 1972. 721 s. [in Russian].

7 Lisienko V.G., Shhelokov Ja.M., Ladygilev M.K. Hrestomatija jenergosberezhenija. Spravochnik v 2-h t. M.:Teplotehnik. 2006. T. 2. 650s. [in Russian].

8 Blinov E.A. Toplivo i teorija gorenija. SPb.: SZTU. 2007. Ch. 1. Podgotovka i szhiganie topliva. 119s. [in Russian].

9 Gushhin S.N., Knjazev M.D. Raschety gorenija topliv: ucheb.-metod. posobie. Ekaterinburg. Ufa: UGTU – UPI, 1995. 25s. [in Russian].

10 Andreeva D.Ju., Juldybaev L.H. Raschet temperatury i plotnosti teplovogo potoka ot plameni fakel'noj ustanovki s podachej para//Vestnik molodogo uchenogo. 2016. Vyp. № 1. S. 29-33. [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

Андреева Д. Ю., студент гр. БПО-15-02, ФГБОУ ВО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

D. Yu. Andreeva, Student, of БПО -15-02 Group, FSBEI HE USPTU, Ufa, the Russian Federation

e-mail: di1702@mail.ru

Юлдыбаев Л. Х., канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Математика» ФГБОУ ВО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

L.H. Yuldybayev, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Chair “Mathematics”, FSBEI HE USPTU, Ufa, the Russian Federation

e-mail: yuldybaevlx@ufamail.ru