

DOI: 10.15593/2224-9982/2018.55.09

УДК 519.9, 621.45.04

И.О. Замеров, Н.Л. Бачев, Р.В. Бульбович

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКОГО ГОРЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ГАЗОВ В УТИЛИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

В программном комплексе ANSYS FLUENT смоделирован процесс кинетического горения нефтяного газа в утилизационной камере сгорания при разных коэффициентах избытка воздуха. По построенной модели были получены поля значений температуры, давления и скорости, а также концентрации компонентов продуктов сгорания. Произведена проверка на проскок пламени в область подготовки газозвушной смеси. Проведен анализ составов продуктов сгорания при кинетическом и диффузионном горении. На основании полученных данных был выбран оптимальный режим работы камеры сгорания, при котором коэффициент избытка воздуха равен трем. Приведена зависимость средней температуры по выходному сечению от коэффициента избытка воздуха.

В результате исследования, по данным численного моделирования проведен анализ, из которого следует, что кинетическое горение подходит для сжигания нефтяных газов. Равномерное горение наблюдается по всей длине камеры сгорания. Отсутствует проскок пламени в область подготовки газозвушной смеси. Уровень вредных примесей в продуктах сгорания значительно снижается в зоне горения, при которой коэффициент воздуха равен трем. Содержание NO в продуктах сгорания снижается в несколько раз в сравнении с диффузионным горением.

Ключевые слова: кинетическое горение, нефтяной газ, коэффициент избытка воздуха, состав продуктов сгорания, проскок пламени, снижение выбросов, массовый расход, математическая модель.

I.O. Zamerov, N.L. Bachev, R.V. Bulbovich

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

MODELLING OF KINETIC BURNING OF OIL GASES IN THE UTILIZATION COMBUSTION CHAMBER

In the ANSYS FLUENT software package, the process of kinetic burning of petroleum gas in a utilization combustion chamber with different air excess coefficients is modeled. According to the constructed model, the fields of temperature, pressure and velocity, as well as the concentration of components of the combustion products were obtained. A check on the breakthrough of the flame in the area of the preparation of the gas-air mixture. The analysis of the composition of combustion products during kinetic and diffusion combustion was carried out. On the basis of the data obtained, the optimal mode of operation of the combustion chamber was chosen, in which the coefficient of excess air is 3. The dependence of the average temperature over the outlet section on the coefficient of excess air is given.

As a result of the study, according to numerical simulation data, an analysis was carried out, from which it follows that kinetic combustion is suitable for burning oil gases. Uniform burning is observed along the entire length of the combustion chamber. There is no flame breakthrough to the area of preparation of the gas-air mixture. The level of harmful impurities in the combustion products is significantly reduced in the combustion zone, at which the air coefficient is 3. The content of NO in the combustion products decreases several times in comparison with the diffusion burning.

Keywords: kinetic combustion, oil gas, air excess coefficient, composition of combustion products, flame breakthrough, emission reduction, mass flow rate, mathematical model.

Введение

Попутный нефтяной газ является побочным продуктом нефтедобычи, получаемым в процессе сепарации нефти. Как и любой побочный продукт, нефтяной газ необходимо утилизировать. К основным способам утилизации попутного нефтяного газа можно отнести поставку газа на газоперерабатывающие заводы, однако часть его просто сжигается на факельных установках, нанося при этом значительный вред окружающей среде [1]. В последнее время замечена тенденция перехода от факельного сжигания в пользу газовых микротурбинных установок.

В микротурбинных установках используется диффузионное горение, т.е. горючее и окислитель подаются в камеру сгорания отдельно [2]. Ожидается, что внедрение в такую установку кинетического метода горения позволит уменьшить вероятность химического недожога и длину пламени, а также повысить производительность и уменьшить количество вредных веществ в продуктах сгорания [3, 4]. Однако для того, чтобы осуществить задуманное, необходимо подробно изучить строение газового пламени при диффузионном и кинетическом горении и выделить преимущества и недостатки обоих видов горения [5–8], рассмотреть способы стабилизации пламени [9–11].

Данная работа посвящена изучению кинетического горения в утилизационной камере сгорания.

Система уравнений рабочего процесса

В систему уравнений нестационарного рабочего процесса входят следующие уравнения¹:

- уравнение переноса массовых фракций веществ;
- уравнение химической кинетики;
- уравнение скорости химической реакции по модели Магнуссена;
- уравнение кинетической энергии турбулентности по k – ϵ -модели;
- уравнение скорости диссипации по k – ϵ -модели;
- уравнение сохранения массы (уравнение неразрывности);
- уравнение сохранения импульса;
- уравнение сохранения энергии.

Граничные условия

В качестве входного граничного условия использовались массовый расход (mass flow inlet), полная температура потока на входе в расчетную область, состав газовой смеси при заданном коэффициенте избытка воздуха, гидравлический диаметр входного сечения и начальный уровень турбулизации газовой смеси.

Задание массового расхода на входе означает, что давление на этой границе будет зависеть от решения, полученного в расчетной области, – от ее геометрии, т.е. гидравлического сопротивления.

В качестве выходных граничных условий используется Outflow. Это граничное условие используется для моделирования границы выхода потока, в случае если заранее не известны распределения скорости или давления по границе. Для этого граничного условия не нужно задавать никаких условий – Fluent экстраполирует значения всех рассчитываемых величин из расчетной области.

Пристеночные граничные условия (wall) обычно описывают условие прилипания ($u_t = 0$ – касательная составляющая скорости на границе) и непроницаемости ($u_n = 0$ – нормальная составляющая скорости на границе) [12].

Задание свойств рабочего тела

Расчеты проводились для нефтяного газа месторождения Шемети Пермского края, состав которого приведен в табл. 1.

Массовый расход выбирался из данных, предварительно рассчитанных по формуле

$$m_{\Sigma} = m_r (\alpha K_{M0} + 1),$$

где m_{Σ} – общий массовый расход смеси; m_r – массовый расход горючего; α – коэффициент избытка воздуха; K_{M0} – стехиометрическое соотношение.

¹ Help. ANSYS Fluent – User's Guide.

Таблица 1

Компонентный состав нефтяного газа

Название газа	Химическая формула	Концентрация (м. д.)	Название газа	Химическая формула	Концентрация (м. д.)
Азот	N ₂	0,363	Бутан	C ₄ H ₁₀	0,078
Диоксид углерода	CO ₂	0,013	Пентан	C ₅ H ₁₂	0,0124
Гексан	C ₆ H ₁₄	0,0038	Состав воздуха		
Метан	CH ₄	0,2214			
Этан	C ₂ H ₆	0,1272	Азот	N ₂	0,78
Сероводород	H ₂ S	0,0066	Кислород	O ₂	0,21
Пропан	C ₃ H ₈	0,175	Аргон	Ar	0,01

В табл. 2 приведены результаты расчета общего массового расхода. По таблице видно, что каждому α соответствует свой общий массовый расход.

Таблица 2

Массовый расход газозвушной смеси

α	Массовый расход горючего, г/с	Массовый расход окислителя, г/с	Общий массовый расход	
			г/с	кг/с
0,8	0,25	2,12	2,37	0,00237
1,00	0,25	2,65	2,90	0,00290
2,00	0,25	5,3	5,55	0,00555
3,00	0,25	7,95	8,20	0,00820
4,00	0,25	10,60	10,85	0,01085

На рис. 1 изображен график зависимости общего массового расхода от коэффициента избытка воздуха α , построенный на основании данных из табл. 2.

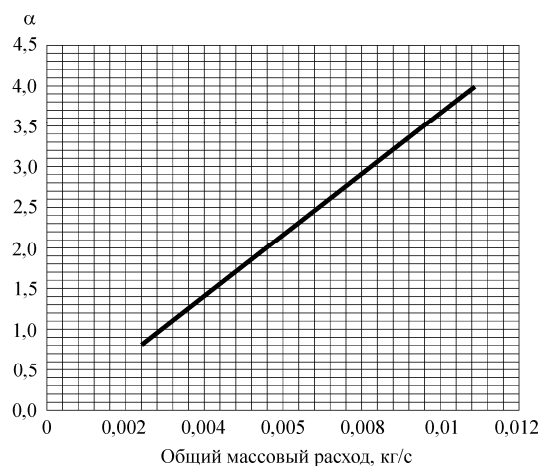


Рис. 1. Зависимость общего массового расхода от коэффициента избытка воздуха α

Коэффициент избытка воздуха α рассчитывается по формуле

$$\alpha = \frac{1}{K_{M0}} \frac{g_{ок}}{g_r},$$

где K_{M0} – стехиометрическое соотношение; $g_{ок}$ – доля окислителя; g_r – доля горючего.

Зависимость коэффициента избытка воздуха от доли горючего представлена на рис. 2.

По рис. 2 видно, что с увеличением доли окислителя в составе топливно-воздушной смеси повышается коэффициент избытка воздуха α .

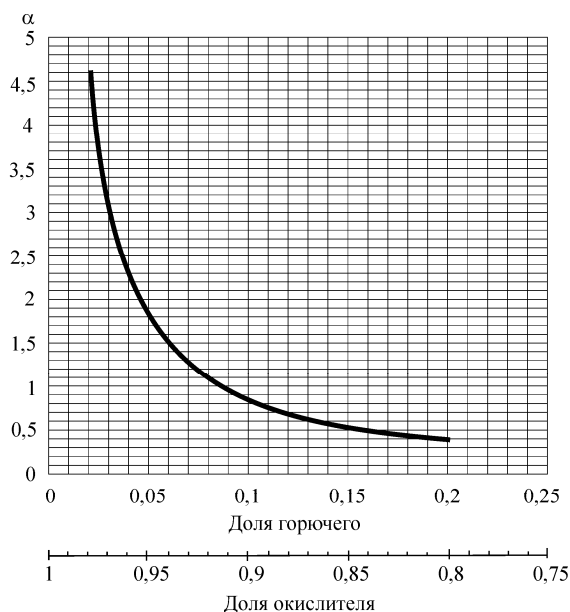


Рис. 2. Зависимость коэффициента избытка воздуха от доли горючего

Состав смеси для каждого α задается отдельно и рассчитывается по формуле

$$g_i = g_r g_i^{\text{газ}} + g_{\text{ок}} g_i^{\text{возд}},$$

где $g_{\text{ок}}$ – доля окислителя; g_r – доля горючего; $g_i^{\text{газ}}$ – концентрация i -го компонента газа; $g_i^{\text{возд}}$ – концентрация i -го компонента воздуха; g_i – концентрация i -го компонента смеси.

Результаты расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3

Состав газовой смеси в массовых долях при разных коэффициентах избытка воздуха

Состав газовой смеси при		$\alpha = 0,8$	$\alpha = 1$	$\alpha = 2$	$\alpha = 3$	$\alpha = 4$
Название газа	Химическая формула	Концентрация (м.д.)				
Азот	N_2	0,736025	0,744063	0,761223	0,767305	0,770411
Диоксид углерода	CO_2	0,001371	0,001121	0,000586	0,000396	0,000299
Гексан	C_6H_{14}	0,000401	0,000328	0,000171	0,000116	0,000087
Метан	CH_4	0,023353	0,019085	0,009972	0,006742	0,005092
Этан	C_2H_6	0,013417	0,010965	0,005729	0,003873	0,002926
Сероводород	H_2S	0,000696	0,000569	0,000297	0,000201	0,000152
Пропан	C_3H_8	0,018417	0,015051	0,007864	0,005317	0,004016
Бутан	C_4H_{10}	0,008217	0,006715	0,003509	0,002372	0,001792
Пентан	C_5H_{12}	0,001308	0,001069	0,000558	0,000378	0,000285
Кислород	O_2	0,187849	0,191898	0,200542	0,203606	0,20517
Аргон	Ar	0,008946	0,009138	0,00955	0,009696	0,00977

Результаты численного моделирования и их анализ

Представленные ниже результаты численного моделирования получены для модельной горелки, геометрические размеры которой представлены на рис. 3. Модель представляет из себя цилиндр с диаметром 34 мм и длиной 340 мм. На лицевом ребре цилиндра находится входное сечение конусной формы, эмитирующее форсунку, гидравлический диаметр которого равен 7 мм. Данная модель построена в пакете Solid Works, а затем экспортирована в программу ANSYS Workbench.

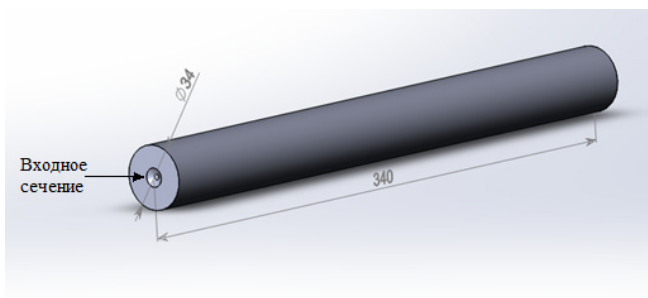
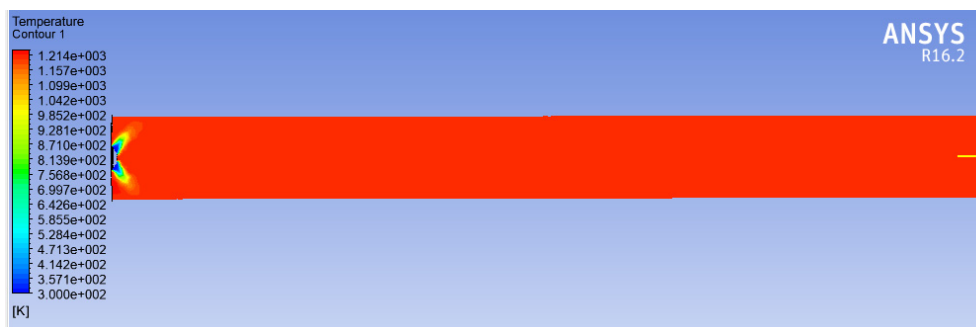


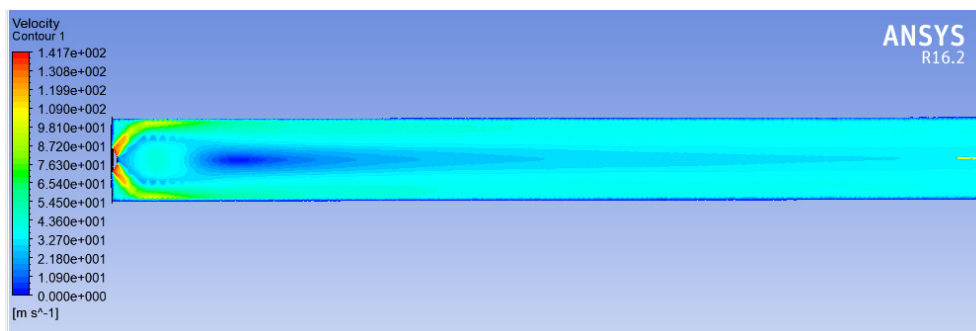
Рис. 3. Геометрические размеры горелки

Расчеты проводились при коэффициентах избытка воздуха $\alpha = 0,8; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0$.

В качестве примера на рис. 4 представлены результаты расчета при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 3$.



a



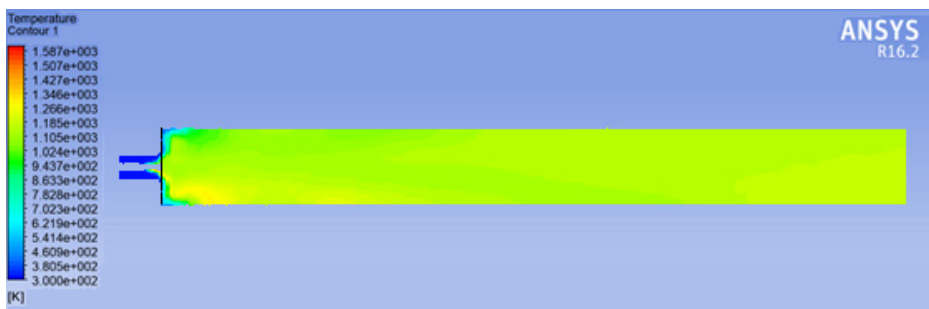
б

Рис. 4. Результаты расчета при $\alpha = 3$: *a* – поле значений температуры; *б* – поле скоростей

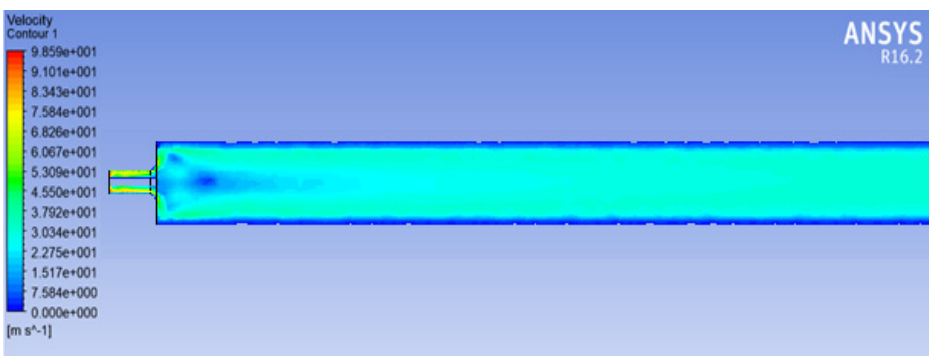
По рис. 4, *a* видно, что пламя распространяется равномерно по всей длине камеры, занимая весь предоставленный ему объем. Горение устойчиво [13].

Проблемой при организации горения предварительно подготовленной смеси является возможность проскока пламени на форсуночную головку [14].

На рис. 5 представлены поля значений температуры и скорости, полученные в результате расчетов на проверку проскока пламени в область форсунки.



a



б

Рис. 5. Результаты расчетов на проверку проскока пламени в область форсунки:
a – поле значений температуры; *б* – поле скоростей

По рис. 5 видно, что в область форсунки пламя не проскакивает.

На рис. 6 представлена зависимость температуры, усредненной по выходному сечению горелки, от коэффициента избытка воздуха α .

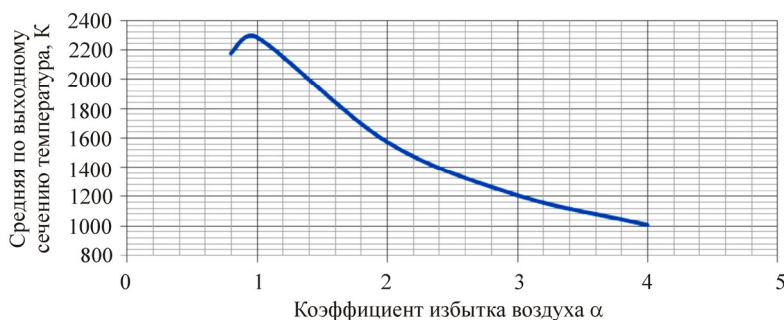


Рис. 6. Зависимость средней по выходному сечению температуры от коэффициента избытка воздуха α

По рис. 6 можно заметить, что максимальная температура наблюдается при $\alpha = 1$.

Большой интерес представляют концентрации продуктов сгорания, представленные в табл. 4.

Таблица 4

 Концентрация продуктов сгорания в массовых долях и температура при разных α

α	0,8	1	2	3	4
Компоненты					
C ₂ H ₆	0,00194714	0,000350946	0	0	0
C ₃ H ₈	0,00985711	0,00183686	0	0	0
C ₄ H ₁₀	0,00262184	0,000477181	0	0	0
C ₅ H ₁₂	0,000141879	2,3E-05	0	0	0
C ₆ H ₁₄	2,94E-05	4,84E-06	0	0	0
CH ₄	0,00216533	0,000383676	0	0	0
CO	0,0195489	0,0110226	0	0	0
CO ₂	0,143135	0,156309	0,0959827	0,049121	0,0294714
H ₂ O	0,102333	0,101819	0,0563229	0,0288278	0,0188653
H ₂ S	1,60E-05	2,5E-06	0	0	0
H _{сн}	0,0798711	0,0763532	0,0417129	0,0241496	0,0114736
NO	3,91E-07	1,26E-06	0,000331	4,16E-09	3,1E-11
N ₂	0,704485	0,713503	0,732878	0,743313	0,752301
SO ₂	0,00149305	0,0012418	0,000653976	0,0003335403	0,000144683
O ₂	0	3,06E-33	0,101045	0,164961	0,185941
Температура	2174,97	2278,45	1571,83	1207,74	1007,35

По табл. 4 видно, что уровень вредных примесей значительно снижается при приближении к зоне $\alpha = 3$.

Таким образом, наиболее оптимальным режимом работы исследуемой камеры сгорания будет режим при $\alpha = 3$.

Для конечной оценки кинетического горения необходимо сравнить данные, полученные при моделировании кинетического и диффузионного горения.

В табл. 5 представлены результаты расчетов кинетического и диффузионного горения при $\alpha = 3$ в м. д. и мг/м³.

Таблица 5

Сравнение концентраций веществ в продуктах сгорания при кинетическом и диффузионном горении

Компоненты	Кинетическое горение		Диффузионное горение		δ
	$\alpha = 3$		$\alpha = 3$		
	м. д.	мг/м ²	м. д.	мг/м ²	
CO ₂	0,049121	14245,09	0,06028755	17483,3895	1,2273
H ₂ O	0,0288278	8360,062	0,04123046	11956,8334	1,4302
NO	4,16E-09	0,00120695	6,10E-08	0,0176842	14,663
N ₂	0,743313	215560,77	0,7372437	213800,673	0,9918
SO ₂	0,000335403	97,26687	0,000335688	97,34952	1,0008
O ₂	0,164961	47838,69	0,1484419	43048,151	0,8999

По табл. 5 видно, что образование NO при кинетическом горении ниже на 93 %, чем при диффузионном горении.

Таким образом, по полученным данным численного моделирования проведен анализ, из которого следует, что кинетическое горение подходит для сжигания нефтяных газов:

- происходит равномерное горение по всей длине камеры сгорания;
- уровень вредных примесей значительно снижается при приближении к зоне $\alpha = 3$;
- отсутствует проскок пламени в форсунку;
- содержание NO в продуктах сгорания снижается в несколько раз в сравнении с диффузионным горением.

Библиографический список

1. Белоусова В.С. Попутный нефтяной газ – проблемы и пути решения [Электронный ресурс] // Молодежь и наука: сб. материалов IX Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и мол. ученых с междунар. участием, посвященной 385-летию со дня основания г. Красноярска / Сиб. федер. ун-т. – Красноярск, 2013. – URL: <http://elib.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/12277/s071-002.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения: 30.11.2018).
2. Демидов П.Г., Шандыба В.А., Щеглов П.П. ДЗО Горение и свойства горючих веществ. – М.: Химия, 1973. – 248 с.
3. Булгаков С.В., Катин В.Д. Повышение экологической эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в котельных и на транспорте / под ред. В.Д. Катина. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. – 147 с.
4. Беспамятнов Г.П., Богушевский К.К. Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе и воде / Гос. ин-т прикл. хим. (ГИПХ). – Л.: Химия, 1972. – 376 с.
5. Бекетов П.Н. Обслуживание котельных, работающих на газовом топливе / М-во коммун. хоз-ва РСФСР. – М., 1963. – 172 с.
6. Баратов А.Н. Горение – Пожар – Взрыв – Безопасность / ФГУ ВНИИПО МЧС России. – М., 2003. – 364 с.
7. Кузнецов В.Р., Сабельников В.А. Турбулентность и горение. – М.: Наука, 1986. – 290 с.
8. Блинов В.И., Худяков Г.Н. Диффузионное горение жидкостей. – М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1961. – 207 с.
9. Вулис Л.А. Тепловой режим горения. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1954. – 288 с.
10. Перминов В.А. Теория горения и взрыва: конспект лекций / Том. политехн. ун-т. – Томск, 2017. – 512 с.
11. Вершинин Н.Н., Козлов Г.В., Григорьев Ю.А. Теория горения и взрыва: учеб. пособие. – Пенза: Изд-во Пензен. гос. ун-та, 2014. – 156 с.
12. Расчет образования CO и NO_x в камерах сгорания ГТД: электрон. учеб. пособие / С.Г. Матвеев, С.В. Лукачев, М.Ю. Орлов, И.В. Четет, Ю.В. Красовская; Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Самара, 2012. – 41 с.
13. Скафтымов Н.А. Основы газоснабжения. – Л.: Недра, 1975. – 343 с.
14. Говоров В.И., Плотников В.М., Каратай Е.В. Теоретические основы горения и взрыва: курс лекций. – Темиртау: Изд-во КГИУ, 2007. – 89 с.

Reference

1. Belousova V.S. Poputnyy neftyanoy gaz - problemy i puti resheniya [Associated oil gas - problems and solutions]. Proceedings of the IX All-Russian scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists with international participation, dedicated to 385 anniversary of the founding of the Krasnoyarsk city "Molodezh i nauka", Krasnoyarsk: Sibirskiy federalnyy universitet, 2013. URL: <http://elib.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/12277/s071-002.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (access date: 30 November 2018).
2. Demidov P.G., Shandyba V.A., Shcheglov P.P. DZO Goreniye i svoystva goryuchikh veshchestv [DZO Combustion and properties of combustible substances]. Moscow: Khimiya, 1973, 248 p.
3. Bulgakov S.V., Katin V.D. Povysheniye ekologicheskoy effektivnosti ispolzovaniya toplivno-energeticheskikh resursov v kotelnykh i na transporte [Improving the environmental efficiency of using fuel and energy resources in boiler rooms and in transport]. Khabarovsk: Publishing House of the Pacific National University, 2015, 147 p.

4. Bespamyatnov G.P., Bogushevskiy K.K. Predelno dopustimyye kontsentratsii vrednykh veshchestv v vozdukh i vode [Maximum permissible concentrations of harmful substances in air and water]. Leningrad: Khimiya, 1972, 376 p.
5. Beketov P.N. Obsluzhivaniye kotelnykh, rabotayushchikh na gazovom toplive [Maintenance of gas-fired boilers]. Moscow: Publishing house of "Ministerstvo kommunalnogo khozyaystva RSFSR", 1963, 172 p.
6. Baratov A.N. Goreniye - Pozhar - Vzryv - Bezopasnost [Burning - Fire - Explosion – Safety]. Moscow: FGBU VNIPO of EMERCOM of Russia, 2003, 364 p.
7. Kuznetsov V.R., Sabelnikov V.A. Turbulentnost i goreniiye [Turbulence and burning]. Moscow: Nauka, 1986, 290 p.
8. Blinov V.I., KHudyakov G.N. Diffuzionnoye goreniiye zhidkostey [Diffusion burning liquids]. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1961, 207 p.
9. Vulis L.A. Teplovoy rezhim goreniiya [Thermal Combustion Mode]. Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat, 1954, 288 p.
10. Perminov V.A. Teoriya goreniiya i vzryva: konspekt lektsiy [The Theory of Combustion and Explosion: lecture notes]. Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2017, 512 p.
11. Vershinin N.N., Kozlov G.V., Grigoryev Yu.A. Teoriya goreniiya i vzryva: uchebnoye posobiye [Theory of combustion and explosion: studies. Manual]. Penza: Penza State University Publishing House, 2014, 156 p.
12. Matveyev S.G., Lukachev S.V., Orlov M.Yu., Chechet I.V., Krasovskaya Yu.V. Raschet obrazovaniya CO i NO_x v kamerakh sgoraniya GTD: elektron. ucheb. posobiye [Calculation of the formation of CO and NO_x in combustion chambers of the CCD: electron. studies. Manual]. Samara University, Samara, 2012, 41 p.
13. Skaftymov N.A. Osnovy gazosnabzheniya [Basics of gas supply]. Leningrad: Nedra, 1975, 343 p.
14. Govorov V.I., Plotnikov V.M., Karatay E.V. Teoreticheskiye osnovy goreniiya i vzryva. Kurs lektsiy [The theoretical basis of combustion and explosion. A course of lectures]. Temirtau: Karaganda State Industrial University, 2007, 89 p.

Об авторах

Замеров Иван Олегович (Пермь, Россия) – бакалавр, студент магистратуры кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: ivanzamerov@gmail.com).

Бачев Николай Леонидович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: bnl54@yandex.ru).

Булбович Роман Васильевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: dekan_akf@pstu.ru).

About the authors

Ivan O. Zamerov (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: ivanzamerov@gmail.com).

Nikolay L. Bachev (Perm, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Professor, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: bnl54@yandex.ru).

Roman V. Bulbovich (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: dekan_akf@pstu.ru).