А.А. Шилова, Р.В. Бульбович, Н.Л. Бачев, О.О. Матюнин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И ПАРАМЕТРОВ ПОДАЧИ НЕФТЯНОГО ГАЗА НА ПРЕДЕЛЫ ГОРЕНИЯ В УТИЛИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Вопрос об утилизации нефтяных газов на сегодняшний день является весьма актуальным. При разработке отечественных микрогазотурбинных утилизационных энергоустановок центральное место занимает создание универсальной камеры сгорания, которая обеспечивала бы устойчивое горение забалластированных газов на разных месторождениях в переменных условиях эксплуатации. Пределы воспламенения горючих и слабозабалластированных газов определяются обычно с использованием правила Ле-Шателье. Однако теоретические и экспериментальные исследования показали, что при высоком содержании балластирующих компонентов данный метод дает некорректные результаты. Для определения нижних и верхних концентрационных пределов использован метод флегматизации, который позволяет учитывать влияние балластирующих компонентов на пределы горения.

При расчете коэффициентов избытка воздуха на верхнем и нижнем пределах учитывалось влияние состава, температуры и давления подачи компонентов. Анализ полученных результатов показал, что учет параметров воздуха и нефтяного газа на выходе из компрессоров расширяет пределы горения по коэффициенту избытка воздуха. Дополнительный рекуперативный подогрев воздуха между компрессором и камерой сгорания сдвигает область устойчивости горения по коэффициенту избытка воздуха в сторону богатых смесей. Рекуперативный подогрев топливного газа сдвигает область устойчивого горения в сторону бедных смесей. Одновременный рекуперативный подогрев топливного газа и воздуха расширяет область устойчивого горения.

Ключевые слова: состав топливного газа, параметры подачи, устойчивость горения, коэффициент избытка воздуха, рекуперативный подогрев, экспериментальные данные.

A.A. Shilova, R.V. Bulbovich, N.L. Bachev, O.O. Matyunin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

THE INFLUENCE OF THE COMPOSITION AND PARAMETERS OF THE OIL GAS SUPPLY ON THE COMBUSTION LIMITS IN THE COMBUSTION CHAMBER

The question of oil gas utilization today is very important. In the development of domestic micro-gas-turbine utilization power plants, the central place is occupied by the creation of a universal combustion chamber, which would ensure stable combustion of ballasted gases at different fields under variable operating conditions. In this work, the phlegmatization method was used to determine the lower and upper concentration limits, which allows taking into account the effect of ballasting components on the combustion limits.

When calculating the coefficients of excess air at the upper and lower limits, the influence of the composition, temperature, and supply pressure of the components was taken into account. An analysis of the results showed that taking into account the parameters of air and oil gas at the outlet of the compressors expands the limits of combustion by the coefficient of excess air. An additional regenerative heating of the air between the compressor and the combustion chamber shifts the combustion stability region in terms of the excess air coefficient towards rich mixtures. Recuperative heating of fuel gas shifts the area of sustainable combustion towards lean mixtures. Simultaneous regenerative heating of fuel gas and air expands the area of sustainable combustion.

Keywords: fuel gas composition, supply parameters, combustion stability, coefficient of excess air, regenerative heating, experimental data.

Введение

Сжигание нефтяных газов в камерах сгорания (КС) микрогазотурбинных энергоустановок (МГТУ) непосредственно на малодебитных месторождениях остается на сегодняшний день очень актуальным вопросом [1–4]. КС

в составе МГТУ должна быть универсальной, т.е. должна обеспечивать устойчивое горение разнородных по составу, забалластированных нефтяных газов (НГ) на разных месторождениях в реальных условиях эксплуатации.

Основным методом при определении концентрационных пределов горения считается

правило Ле-Шателье [5, 6]. Однако при высоком содержании балластирующих компонентов указанный метод дает некорректные результаты и по нижнему, и по верхнему пределу воспламенения [7–9]. В данной работе концентрационные пределы горения определены с использованием метода флегматизации [7, 10].

При расчете коэффициентов избытка воздуха на нижнем и верхнем пределах горения (α_n и α_v соответственно) использовались массовое стехиометрическое K_{m0} и объемное стехиометрическое K_{v0} соотношения. Если K_{m0} определяется только составом топливного газа и воздуха, то K_{v0} зависит как от состава, так и от параметров подачи (давление, температура) воздуха и топливного газа.

В данной работе рассмотрено влияние состава НГ и параметров подачи НГ и воздуха на верхние и нижние пределы горения забалластированного НГ.

Математическая модель

Основные положения по определению нижнего и верхнего пределов горения забалластированных топливных газов методом флегматизации описаны в работах [7, 10] и сводятся к следующему:

- расчет количества молей воздуха в исходной топливно-воздушной смеси (ТВС);
- определение нижнего предела горения L_n в объемных процентах горючего;
- определение коэффициентов флегматизации горючей части балластирующими компонентами N_2 , CO_2 , H_2O ;
- расчет минимальных флегматизирующих концентраций балластирующих компонентов N_2 , CO_2 , H_2O ;
- определение верхних условных пределов распространения пламени для балластирующих компонентов N_2 , CO_2 , H_2O ;
- расчет верхнего предела распространения пламени забалластированного топливного газа L_v в объемных процентах горючего.

Расчет влияния условий подачи реализуется следующим образом.

По известному составу воздуха и НГ определяется стехиометрическое массовое соотношение [11]

$$K_{m0} = \frac{\frac{8}{3}g_C^{\text{гор}} + 8g_H^{\text{гор}} + g_S^{\text{гор}} - g_O^{\text{гор}}}{g_O^{\text{ок}} - \frac{8}{3}g_C^{\text{ок}} - 8g_H^{\text{ок}} - g_S^{\text{ок}}},$$

где $g_i^{\text{гор}}$, $g_i^{\text{ок}}$ – массовые содержания i -го элемента в составе НГ и воздуха соответственно.

Плотности воздуха и НГ определяются в соответствии с составом (газовая постоянная R) и параметрами подачи (давление P , температура T) по уравнению состояния

$$\rho = \frac{P}{RT}.$$

Объемное стехиометрическое соотношение зависит от состава, параметров подачи воздуха и НГ и определяется по соотношению

$$K_{v0} = K_{m0} \cdot \frac{\rho_{\text{гор}}}{\rho_{\text{ок}}},$$

где $\rho_{\text{гор}}$, $\rho_{\text{ок}}$ – значения плотности НГ и воздуха соответственно.

Увеличение температуры подачи компонентов линейно изменяет верхний и нижний пределы горения [12]:

$$L_{\text{нл}} = L_n \left(1 - \frac{t - 25}{1250} \right);$$

$$L_{\text{вл}} = L_v \left(1 + \frac{t - 25}{800} \right),$$

где t – температура подачи топливного газа, °С.

Коэффициенты избытка воздуха на верхнем или нижнем пределах горения

$$\alpha = \frac{1}{K_{v0}} \cdot \frac{100 - L}{L},$$

где L – верхний или нижний пределы горения НГ в объемных процентах горючего.

Анализ полученных результатов

По приведенной выше методике определены коэффициенты избытка воздуха на верхнем и нижнем пределах горения для забалластированных нефтяных газов (НГ), состав которых приведен в табл. 1.

На рис. 1–3 приведены диаграммы по коэффициенту избытка воздуха в области устойчивого горения забалластированных НГ.

Таблица 1

Компонентный состав нефтяных газов

Компонент	Состав НГ, об. %		
	НГ-1	НГ-2	НГ-3
CH ₄	28	18,68	5,1
C ₂ H ₆	13,2	15,18	3,1
C ₃ H ₈	17,5	15,92	5,5
C ₄ H ₁₀	9,8	7,38	9,8
C ₅ H ₁₂	4,8	1,29	5,2
C ₆ H ₁₄	0	0,32	0
H ₂ S	0	0,3	0
CO ₂	0,5	0,9	4,7
N ₂	26,2	40,3	66,6
Негорючие компоненты	26,7	41,2	71,3

Диаграммы 1 соответствуют концентрационным пределам горения при стандартных условиях $P_0 = 101\,325$ Па и $T_0 = 298$ К. Диаграммы 2 соответствуют компрессорной подаче воздуха и НГ со значениями давления и температуры на входе в КС при степени сжатия в компрессорах $\varepsilon = 5$. Диаграммы 3 и 4 соответствуют рекуперативному подогреву воздуха между компрессором и КС на 100 и 200 °С соответственно с целью снижения тепловых затрат на реакцию горения и увеличения КПД газотурбинной энергоустановки. Диаграммы 5 и 6 соответствуют рекуперативному подогреву НГ между компрессором и

КС на 100 и 200 °С соответственно с целью снижения тепловых затрат на реакцию горения и испарение конденсата тяжелых углеводородов (C₅H₁₂ и выше). Диаграммы 7 и 8 соответствуют одновременному рекуперативному подогреву и воздуха, и НГ на 100 и 200 °С соответственно.

Концентрационные пределы горения без учета условий подачи (диаграммы 1) практически не зависят от содержания балластирующих компонентов и составляют в среднем $\alpha = 0,43$ на нижнем пределе и $\alpha = 1,77$ на верхнем пределе, а диапазон устойчивого горения $\Delta\alpha = 1,34$. Учет параметров подачи после компрессора без дополнительного подогрева компонентов (диаграммы 2) расширяет пределы горения на 18–20 %, причем α_v уменьшается на 15 %, а α_n увеличивается на 12 %. Подогрев воздуха в рекуперативном теплообменнике между компрессором и КС (диаграммы 3 и 4) сужает диапазон устойчивого горения $\Delta\alpha$ на 17 % и сдвигает его в сторону богатого горения на 18 % на каждые 100 °С подогрева по сравнению с диаграммами 2. Подогрев НГ выхлопными газами в рекуперативном теплообменнике (диаграммы 5 и 6) расширяет диапазон устойчивого горения на 29 % и сдвигает его в сторону бедного горения, причем α_v увеличивается на 6 %, а α_n на

№ п/п	$P_{ок}$, МПа	$T_{ок}$, К	$P_{гор}$, МПа	$T_{гор}$, К	α_v	α_n
1	0,1	288	0,1	288	0,427	1,810
2	0,5	431	0,5	433	0,365	2,045
3	0,5	531	0,5	433	0,289	1,660
4	0,5	630	0,5	433	0,244	1,399
5	0,5	431	0,5	531	0,387	2,758
6	0,5	431	0,5	630	0,410	3,637
7	0,5	531	0,5	531	0,314	2,239
8	0,5	630	0,5	630	0,280	2,488

Рис. 1. Влияние условий подачи на область устойчивого горения НГ-1

№ п/п	$P_{ок}$, МПа	$T_{ок}$, К	$P_{гор}$, МПа	$T_{гор}$, К	α_v	α_n
1	0,1	288	0,1	288	0,437	1,788
2	0,5	431	0,5	433	0,363	2,025
3	0,5	531	0,5	433	0,295	1,644
4	0,5	630	0,5	433	0,248	1,385
5	0,5	431	0,5	531	0,392	2,733
6	0,5	431	0,5	630	0,413	3,607
7	0,5	531	0,5	531	0,318	2,218
8	0,5	630	0,5	630	0,283	2,467

Рис. 2. Влияние условий подачи на область устойчивого горения НГ-2

№ п/п	$P_{ок}$, МПа	$T_{ок}$, К	$P_{гор}$, МПа	$T_{гор}$, К	α_v	α_n
1	0,1	288	0,1	288	0,436	1,703
2	0,5	431	0,5	433	0,355	1,935
3	0,5	531	0,5	433	0,288	1,570
4	0,5	630	0,5	433	0,243	1,324
5	0,5	431	0,5	531	0,378	2,617
6	0,5	431	0,5	630	0,392	3,462
7	0,5	531	0,5	531	0,307	2,124
8	0,5	630	0,5	630	0,268	2,368

Рис. 3. Влияние условий подачи на область устойчивого горения НГ-3

25 % на каждые 100 °С подогрева по сравнению с диаграммами 2. Дополнительный подогрев и воздуха, и НГ одновременно в рекуператорах (диаграммы 7 и 8) расширяет диапазон устойчивого горения на 13 %, при этом α_v уменьшается на 12 %, а α_n увеличивается на 9 % на каждые 100 °С подогрева по сравнению с диаграммами 2.

Таким образом, в широком диапазоне содержания балластирующих компонентов в сос-

таве НГ и при разных режимах подачи воздуха и НГ в КС сохраняется возможность организации устойчивого горения как в богатой ($0,4 < \alpha < 1,0$), так и бедной ($1,0 < \alpha < 1,3$) области.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Для экспериментального изучения процессов горения забалластированных серосодержащих НГ был разработан модельный ряд

экспериментальных горелок, работающих на реальных НГ, отбираемых в баллоны непосредственно на месторождениях. Описание конструктивных особенностей горелок и методики проведения экспериментов даны в работах [13–15]. На рис. 4 представлен чертеж одной из утилизационных горелок.

На рис. 5 в качестве примера представлена рабочая карта испытаний для НГ-1 с содержанием балластирующих компонентов 26,7 % при $\rho_{\text{ок}} = 1,264 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\text{гор}} = 1,566 \text{ кг/м}^3$; $K_{m0} = 12,1$; $K_{v0} = 15,0$.

Была разработана и реализована следующая методика проведения испытаний:

- с помощью редуктора по показаниям расходомера устанавливается объемный расход воздуха $Q_{\text{ок}}$ по магистрали подвода воздуха;
- назначается режим испытания для выбранного значения коэффициента избытка воздуха α ;
- по рабочей карте испытаний (см. рис. 5) выбирается расход топливного газа $Q_{\text{гор}}$ в соответствии с выбранным значением α ;
- с помощью редуктора по показаниям расходомера устанавливается объемный рас-

ход топливного газа $Q_{\text{гор}}$ по магистрали подвода топливного газа;

- по команде «зажигание» происходит воспламенение топливно-воздушной смеси с помощью высоковольтной свечи зажигания;
- измеряются значения температуры, давления, расхода по линиям подачи воздуха и НГ и температуры на оси горелки вдоль пламени;
- регистрация экспериментальных данных осуществляется с помощью программного комплекса «МЕРА»;
- производится видеосъемка положения пламени в горелке.

Коэффициент избытка воздуха определяется по соотношению

$$\alpha = \frac{1}{K_{m0}} \cdot \frac{\rho_{\text{ок}} Q_{\text{ок}}}{\rho_{\text{гор}} Q_{\text{гор}}},$$

где $Q_{\text{ок}}$, $Q_{\text{гор}}$ – объемный расход окислителя и горючего соответственно.

Значения плотности окислителя и горючего определяются в соответствии с составом (газовая постоянная R) и параметрами подачи (давление P , температура T) по уравнению состояния.

Рис. 4. Чертеж утилизационной горелки

Рис. 5. Рабочая карта испытаний

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований

№ п/п	$\rho_{\text{ок}}, \text{кг/м}^3$	$\rho_{\text{г}}, \text{кг/м}^3$	$Q_{\text{ок}}, \text{л/мин}$	$Q_{\text{гор}}, \text{л/мин}$	$L, \%$	α
1	1,26	1,57	82,0	3,2	3,7	1,73
2	1,26	1,57	68,0	3,4	4,8	1,32
3	1,26	1,57	56,0	3,2	5,4	1,17
4	1,26	1,57	52,0	3,4	6,1	1,02
5	1,26	1,57	54,0	2,0	3,6	1,78
6	1,25	1,33	8,50	1,9	18,2	0,40
7	1,25	1,32	8,55	1,4	15,0	0,51
8	1,25	1,31	13,70	2,3	14,4	0,54

Рис. 6. Верификация экспериментальных и теоретических данных

Для регистрации процессов воспламенения и горения использовались показания термопар, расположенных по оси КС вдоль пламени, и материалы видеосъемки.

В табл. 2 представлены результаты экспериментальных исследований для НГ-1 с содержанием балластирующих компонентов 26,7 %.

На рис. 6 показаны экспериментальные значения α при устойчивом горении и теоретические значения $\alpha_{\text{в}} = 0,44$ на верхнем пределе и $\alpha_{\text{н}} = 1,79$ на нижнем пределе горения для НГ с содержанием балластирующих компонентов 26,7 %.

Анализ рис. 6 показывает, что экспериментальные точки в основном расположены внутри диапазона устойчивого горения. Отличие экспериментальных и теоретических значений α на верхнем пределе составило 10 %, а на нижнем пределе горения – 1 %.

Проведенные расчетные и экспериментальные исследования позволили выработать следующие рекомендации для организации устойчивого горения в первой зоне многозонной КС утилизационных энергоустановок:

- диффузионное бедное горение с $1,0 < \alpha < 1,3$ в первой зоне охлаждаемой двухзонной КС;

- диффузионное богато-бедное горение в охлаждаемой двухзонной КС. В зоне богатого горения необходимо обеспечивать устойчивый рабочий процесс с $0,4 < \alpha < 1,0$. В зоне бедного дожига горение обеспечивается при $1 < \alpha < 1,3$. Такой тип горения позволяет значительно снизить эмиссию вредных веществ;

- гомогенное бедное горение с $1,0 < \alpha < 1,3$ в первой зоне охлаждаемой двухзонной КС. Такой тип горения позволяет еще значительно снизить эмиссию вредных веществ по сравнению с диффузионным богато-бедным горением.

Библиографический список

1. Способы увеличения ресурса работы микрогазотурбинного энергетического агрегата при утилизации попутного нефтяного газа / О.А. Зуева, Н.Л. Бачев, Р.В. Бульбович, А.М. Клещевников // Газовая промышленность. – 2013. – № 692, спецвып. – С. 30–34.
2. Выбор геометрических, режимных и тепловых параметров высокоресурсной камеры сгорания для утилизации ПНГ / О.А. Зуева, Н.Л. Бачев, Р.В. Бульбович, А.М. Клещевников // Газовая промышленность. – 2013. – № 698. – С. 94–97.
3. Разработка газотурбинной установки для утилизации нефтяного газа с выработкой электрической и тепловой энергии на малодебитных месторождениях / О.А. Зуева, Н.Л. Бачев, Р.В. Бульбович, А.М. Клещевников // Нефтяное хозяйство. – 2014. – Вып. 1084. – С. 98–101.

4. Бетинская О.А. Организация рабочего процесса в универсальной камере сгорания газотурбинной установки для утилизации попутного нефтяного газа: дис. ... канд. тех. наук: 05.04.12. – Пермь, 2017. – 146 с.
5. Зуева О.А., Бачев Н.Л., Бульбович Р.В. Пределы устойчивого горения нефтяных газов // Нефтяное хозяйство. – 2014. – Вып. 1089. – С. 64–66.
6. Зуева О.А. Концентрационные пределы горения попутных нефтяных газов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 37. – С. 140–153.
7. Шилова А.А., Бачева Н.Ю. Определение коэффициентов избытка воздуха на верхнем и нижнем пределах горения забалластированных нефтяных газов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2018. – № 53. – С. 77–85.
8. Tingguang Ma. A thermal theory for estimating the flammability limits of a mixture // Fire Safety J. – 2011. – Vol. 46, iss. 8. – P. 558–567.
9. Сабденев К.О. Нахождение концентрационных пределов горения на основе анализа диффузионно-тепловой неустойчивости пламени. Смесь метан/воздух/разбавитель // Физика горения и взрыва. – 2016. – Т. 52, № 4. – С. 24–35.
10. Andres Z.M., Joao A. de C.Jr., Christian R.C. Method for determination of flammability limits // Fuel. – 2018. – Vol. 226. – P. 65–80.
11. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 488 с.
12. Сафонов С.К. Методы расчета показателей пожарной опасности газов и жидкостей / УВАУ ГА. – Ульяновск, 2005. – 42 с.
13. Разработка экспериментальной установки для изучения процессов горения забалластированных газов / О.О. Матюнин, Н.Л. Бачев, Р.В. Бульбович, М.Ю. Храмцов // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации: тез. докл. XIV Всерос. науч.-техн. конф., г. Пермь, 20–21 ноября 2013 г. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – С. 141–144.
14. Расчетные и экспериментальные исследования рабочего процесса в утилизационной горелке / Н.Л. Бачев, О.О. Матюнин, О.А. Бетинская, Н.Ю. Бачева, Р.В. Бульбович // Инженерно-физический журнал. – 2019. – Т. 92, № 1. – С. 227–235.
15. Бачев Н.Л., Бетинская О.А., Бульбович Р.В. Численное моделирование рабочего процесса в камере сгорания для утилизации попутного нефтяного газа // Инженерно-физический журнал. – 2016. – Т. 89, № 1. – С. 212–220.

Reference

1. Betinskaya O.A. (Zuyeva O.A.), N.L. Bachev, R. V. Bulbovich, A. M. Kleshchevnikov. Sposoby uvelicheniya resursa raboty mikrogazoturbinnogo energeticheskogo agregata pri utilizatsii poputnogo neflyanogo gaza [Ways to increase the service life of a microgas turbine power unit during the utilization of associated petroleum gas]. Gas Industry Magazine, 2013, vol. 692, pp. 30-34.
2. Betinskaya O.A. (Zuyeva O.A.), Bachev N.L., Bul'bovich R.V., Kleshchevnikov A.M. Vybora geometricheskikh, rezhimnykh i teplovykh parametrov vysokoresursnoy kamery sgoraniya dlya autilizatsii PNG [The choice of geometric, regime and thermal parameters of a high-resource combustion chamber for utilization of associated petroleum gas]. Gas Industry Magazine, 2013, no. 698, pp. 94-97.
3. Betinskaya O.A. (Zueva O.A.), Bachev N.L., Bulbovich R.V., Kleshchevnikov A.M. Razrabotka gazoturbinnoy ustanovki dlya utilizatsii neflyanogo gaza s vyработкой elektricheskoy iteplovoy energii na malodebitnykh mestorozhdeniyakh [Development of a gas turbine plant for utilization of associated petroleum gas for gathering electrical and thermal energy at marginal fields]. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2014, no. 1084, pp. 98-101.
4. Betinskaya O.A. Organizatsiya rabocheho protsesssa v universalnoy kamere sgoraniya gazoturbinnoy ustanovki dlya utilizatsii poputnogo neflyanogo gaza [Organization of the working process in the universal combustion chamber of a gas turbine unit for utilization of associated petroleum gas. Abstract of Ph. D. thesis. Perm, 2017, 146 p.
5. Betinskaya O.A. Predely ustoychivogo goreniya neflyanykh gazov [Limits of sustained combustion of petroleum gases]. *Neftyanoye khozyaystvo*, 2014, no. 1089, pp. 64-66.
6. Betinskaya O.A. (Zuyeva O.A.). Kontsentratsionnyye predely goreniya poputnykh neflyanykh gazov [Concentration limits of combustion of associated petroleum gases]. PNRPU Aerospace Engineering Bulletin, Perm, 2014, no. 37, pp. 140-153.
7. A.A. Shilova, N.YU. Bacheva. Opredeleniye koeffitsiyentov izbytkha vozdukha na verkhnem i nizhnem predelakh goreniya zaballastirovannykh neflyanykh gazov [Determination of the excess air coefficients at the upper and lower combustion limits of ballasted oil gases]. PNRPU Aerospace Engineering Bulletin, 2018, no. 53, pp. 77-85.

8. Tingguang Ma. A thermal theory for estimating the flammability limits of a mixture. *Fire Safety Journal*, 2011, vol. 46, Issue 8, pp. 558-567.
9. Sabdenov K.O. Nakhozhdeniye kontsentratsionnykh predelov goreniya na osnove analiza diffuzionno-teplovoy neustoychivosti plameni. Smes' metan/ vozdukh/razbavitel' [The determination of the concentration limits of combustion on the basis of an analysis of the diffusion-thermal instability of the flame. Mixture of methane / air / diluent.]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2016, vol. 52, no. 4, 24-35 p.
10. Andres Z.M., Joao A. de C. Jr., Christian R.C. Method for determination of flammability limits. *Fuel*, 2018, vol. 226, pp. 65-80.
11. Dobrovolskiy M.V. Zhidkostnyye raketnyye dvigateli [Liquid rocket engines]. Moscow: MSTU named by N.E. Bauman, 2005, 488 p.
12. Safonov S.K. Metody rascheta pokazateley pozharnoy opasnosti gazov i zhidkostey [Methods for calculating fire hazard indicators for gases and liquids]. Ulyanovsk: UVAU GA, 2005, 42 p.
13. Matyunin O.O., Bachev N.L., Bulbovich R.V., Khramtsov M.Yu. Razrabotka eksperimentalnoy ustanovki dlya izucheniya protsessov goreniya zaballastirovannykh gazov [Development of an experimental setup for studying the combustion processes of ballasted gases]. *Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii*: abstracts of the XIV All-Russian Scientific and Technical Conference (Perm, November 20-21, 2013), Perm: PNRPU, 2014., vol. 34, pp. 141-144.
14. Bachev N. L., Matyunin O.O., Betinskaya O. A., Bacheva N.YU., Bulbovich R. V. Raschetnyye i eksperimentalnyye issledovaniya rabocheho protsessa v utilizatsionnoy gorelke [Design and experimental studies of the working process in a waste burner]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2019, vol. 92, no. 1, pp. 227-235.
15. Bachev N. L., Betinskaya O. A., Bulbovich R. V. Chislennoye modelirovaniye rabocheho protsessa v kamere sgoraniya dlya utilizatsii poputnogo neftyanogo gaza [Numerical simulation of the working process in the combustion chamber for utilization of associated petroleum gas]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2016, vol. 89, no. 1, pp. 212-220.

Об авторах

Шилова Алена Алексеевна (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: alyona1203@gmail.com).

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: Bulbovich@pstu.ru).

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

Матюнин Олег Олегович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: matoleg@gmail.com).

About the authors

Alyona A. Shilova (Perm, Russian Federation) – PhD Student of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: alyona1203@gmail.com).

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

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

Oleg O. Matyunin (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: matoleg@gmail.com).