

Computational and Experimental Studies into Concentration Limits of Associated Petroleum Gas Combustion

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

Perm National Research Polytechnic University
Perm, Russian Federation

Abstract. The issue of utilizing associated petroleum gas from low-yield fields in gas turbine power plants has become relevant recently. To develop universal power plants ensuring steady combustion of dissimilar in composition and highly ballast gases from different fields, reliable information on their combustion limits under real operating conditions is required. Composition analysis of associated petroleum gases from various fields of the Russian Federation shows that the volume fraction of ballast components can be as high as 90 %, heavy hydrocarbons up to 10 %, hydrogen sulfide-up to 6 %. This work is aimed to theoretical determination and experimental confirmation of combustion concentration limits of associated petroleum gas. Another purpose is to work out recommendations for selection of the excess air ratio in the primary zone of the chamber at the design stage. This is achieved by theoretical determination of the air access coefficient on the upper and lower combustion limits using phlegmatization methods and experimental substantiation of the computational results. The first experimental results were obtained in the process of burning petroleum gases collected directly in the fields with the volume fraction of ballast components 26 % and 40 %. To clearly determine the presence of combustion in the chamber, a synchronous video recording of the process was conducted. Computational and experimental studies into concentration limits of associated alternated composition petroleum gas combustion resulted in some recommendations on organizing stable diffusion and homogeneous combustion in one-, two- or three-zone combustion chambers.

Keywords: associated petroleum gases, flammability limits, excess air ratio, ballasting components, experimental setup.

DOI: 10.5281/zenodo.3367068

Calculule și studiile experimentale ale limitelor de concentrație de ardere a gazelor petroliere asociate

Bachev N.L., Matyunin O.O., Bulbovici R.V., Betinskaya O.A., Șilova A.A.

Universitatea națională tehnică de cercetare din Perm
Perm, Federația Rusă

Rezumat. În ultimii ani problema utilizării gazelor petroliere asociate în câmpurile cu randament redus, folosind centrale electrice cu turbină este foarte de actualitate. Pentru a elabora camere universale de combustie ale unor astfel de instalații, care să asigure o combustie stabilă a compoziției eterogene și a gazelor puternic balastate pe diferite câmpuri, este necesară informație fiabilă cu privire la limitele combustiei lor în condiții de operare reale. O analiză a compoziției gazelor petroliere asociate din diferite domenii ale Federației Ruse a arătat că conținutul de componente necombustibile (azot, dioxid de carbon, vapori de apă) poate ajunge la 90%, hidrocarburi grele (pentan și mai mari) - până la 10%, hidrogen sulfurat - până la 6%. Scopul acestei lucrări este determinarea teoretică și confirmarea experimentală a limitelor de concentrație ale combustiei gazelor petroliere asociate balastate, precum și elaborarea recomandărilor pentru alegerea coeficientului de aer în exces în zona primară a camerei în faza de proiectare. Obiectivul este realizat prin determinarea teoretică a coeficientului de aer în exces la limitele superioare și inferioare ale combustiei, folosind metode de flegmatizare și confirmarea experimentală a rezultatelor calculate. Pentru prima dată, rezultatele experimentale au fost obținute în procesul de ardere a gazelor petroliere prelevate direct pe câmpuri, cu un conținut de componente de balastare de 26% și 40%. În procesul studiilor experimentale, au fost determinați coeficienții de exces de aer în limitele de combustie superioare și inferioare și profilurile longitudinale de temperatură în flacără de-a lungul axei arzătorului.

Cuvinte-cheie: gaze petroliere asociate, limite de ardere de concentrație, coeficientul de exces al aerului, componente balastate, instalație experimentală.

Расчетно-экспериментальные исследования концентрационных пределов горения попутных нефтяных газов

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

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Пермь, Российская Федерация

Аннотация. Вопрос об утилизации попутных нефтяных газов на малодебитных месторождениях с

использованием газотурбинных энергоустановок в последние годы является весьма актуальным. Для разработки универсальных камер сгорания таких установок, которые бы обеспечивали устойчивое горение разнородных по составу и сильно забалластированных газов на разных месторождениях, требуется достоверная информация по пределам их горения в реальных условиях эксплуатации. Анализ составов попутных нефтяных газов различных месторождений Российской Федерации показал, что содержание негорючих компонентов (азот, углекислый газ, пары воды) может достигать 90 %, тяжелых углеводородов (пентан и выше) – до 10 %, сероводорода – до 6 %. Целью данной работы является теоретическое определение и экспериментальное подтверждение концентрационных пределов горения забалластированных попутных нефтяных газов, а также разработка рекомендаций по выбору коэффициента избытка воздуха в первичной зоне камеры на этапе проектирования. Поставленная цель достигается теоретическим определением коэффициента избытка воздуха на верхнем и нижнем пределах горения с использованием методов флегматизации и экспериментальным подтверждением расчетных результатов. Впервые экспериментальные результаты получены в процессе сжигания нефтяных газов, отобранных непосредственно на месторождениях, с содержанием балластирующих компонентов 26 % и 40 %. В процессе экспериментальных исследований определялись коэффициенты избытка воздуха на верхнем и нижнем пределах горения и продольные профили температуры в пламени по оси горелки. О положении фронта пламени в камере можно судить по показаниям термопар в зоне пламени и кадрам видеосъемки внутрикамерного процесса. Расчетно-экспериментальные исследования пределов горения забалластированных разнородных по составу нефтяных газов позволили выработать рекомендации по организации стабильного диффузионного или гомогенного горения в первичных зонах камер сгорания утилизационных микрогазотурбинных энергоустановок.

Ключевые слова: попутные нефтяные газы, концентрационные пределы горения, коэффициент избытка воздуха, балластирующие компоненты, экспериментальная установка.

ВВЕДЕНИЕ

При утилизации разнородных по составу и забалластированных попутных нефтяных газов (ПНГ) в газотурбинных установках (ГТУ) непосредственно на малодобитных месторождениях особую актуальность приобретают вопросы по организации устойчивого горения ПНГ в универсальных камерах сгорания (КС). ПНГ имеют переменный состав в зависимости от месторождения, времени года и даже времени суток.

Для организации устойчивого горения забалластированных ПНГ разных месторождений требуется задание универсального значения коэффициента избытка воздуха в утилизационной КС. Для его задания необходимо знать нижний и верхний пределы горения ПНГ.

Пределы горения различных топливных композиций, в том числе, содержащих балластирующие компоненты изучались теоретически и экспериментально, прежде всего, с точки зрения гарантированной безопасности в промышленных и бытовых условиях.

В [1] проведен подробный литературный обзор пределов воспламеняемости горючих смесей для систематизации теоретических и практических знаний и проанализированы методы экспериментального определения нижнего и верхнего пределов воспламенения.

Пределы воспламенения чаще всего определяются с использованием правила Ле-Шателье. Однако экспериментальные исследования [2] показали, что с его помощью можно корректно оценить только нижний предел воспламенения. А в работе [3] показано, что при высоком содержании балластирующих компонентов данный метод дает некорректные результаты и по нижним, и по верхним пределам воспламенения.

Поэтому в работах [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10] предложены разные теоретические модели определения концентрационных пределов воспламенения. В [3] с использованием уравнения теплового баланса рассмотрены потенциалы нагрева и гашения, которые учитывают двойной вклад каждого компонента. Этот метод эквивалентен правилу Ле-Шателье, но обладает повышенной гибкостью при учете балластирующих компонентов. В [9] использовано уравнение энергетического баланса, что дало возможность при расчете пределов горения не использовать экспериментальные данные. В [10] с использованием уравнений сохранения массы и энергии получены выражения для коэффициентов флегматизации, которые зависят от концентрации балластирующих компонентов и позволяют учесть их влияние на пределы горения.

Среди экспериментальных исследований по воспламеняемости газовых топливных

смесей с воздухом следует отметить работы [11, 12, 13, 14]. Эксперименты показали, что диапазон воспламеняемости расширяется с увеличением начальных температуры и давления. Верхний предел зависит от давления по логарифмическому закону, нижний предел от давления не зависит, а от температуры оба предела зависят линейно. Увеличение влажности воздуха в составе смеси с метаном приводит к снижению пределов воспламенения и увеличению риска взрыва.

Результаты экспериментальных исследований по воспламеняемости жидкофазных горючих с воздухом содержатся в [1, 2, 15, 16, 17, 18, 19].

Обзор имеющихся результатов показал отсутствие теоретических и экспериментальных данных по пределам воспламенения сильно забалластированных, разнородных по составу ПНГ. Целью данной работы является выработка рекомендаций для организации устойчивого горения ПНГ в утилизационных КС ГТУ, полученных на основе теоретических и экспериментальных исследований по воспламенению сильно забалластированных ПНГ.

КОНЦЕНТРАЦИОННЫЕ ПРЕДЕЛЫ ГОРЕНИЯ

В последние годы особенно остро стоит вопрос утилизации нефтяных газов (НГ) на малодебитных месторождениях Российской Федерации. С этой целью предложено создание отечественных микротурбинных установок мощностью до 200 кВт. Основным агрегатом таких установок является универсальная КС, которая должна обеспечивать устойчивое горение разнородных по составу и теплопроизводительности НГ разных месторождений. Поэтому целесообразным является определение коэффициента избытка воздуха на концентрационных пределах горения НГ различных месторождений и выбор универсального коэффициента в зоне горения одно-, двух- или трехзонной КС.

Исследования показали, что концентрационные пределы горения горючих и забалластированных топливных газов по коэффициенту избытка воздуха очень сильно отличаются друг от друга.

В таблице 1 представлены пределы горения индивидуальных горючих и природного газов.

Таблица 1¹

Пределы горения стандартных топливных и природного газов.²

	L_B , об. % (vol. %)	L_H , об. % (vol. %)	K_{m0}	K_{v0}	α_B	α_H
H ₂ S	45,0	4,5	6,10	7,28	0,17	2,92
C ₆ H ₁₄	8,0	1,0	15,27	45,52	0,25	2,18
C ₅ H ₁₂	7,8	1,5	15,36	38,32	0,31	1,84
C ₄ H ₁₀	8,6	1,8	15,49	32,46	0,33	1,68
C ₃ H ₈	9,5	2,3	15,71	24,40	0,39	1,74
C ₂ H ₆	12,5	3,2	16,13	16,95	0,41	1,78
CH ₄	15,0	5,0	17,28	9,60	0,59	1,98
H ₂	71,4	6,2	34,56	2,41	0,17	6,28
Природный газ (Natural Gas)	14,8	4,8	16,62	2,46	0,64	2,21

Здесь: K_{m0} , K_{v0} – массовое и объемное стехиометрические соотношения компонентов; L_B , L_H – верхний и нижний пределы горения в объемных процентах горючего; α_B , α_H – коэффициенты избытка воздуха на верхнем и нижнем пределах горения соответственно.

(Here: K_{m0} , K_{v0} – mass and volumetric stoichiometric ratio; L_B , L_H – upper and lower combustion limits; α_B , α_H – air excess factor on upper and lower combustion limits.)

Анализ данных в таблице 1 показывает, что при сжигании индивидуальных топливных и природного газов возможна организация богатого, бедного или богато-бедного горения.

В таблице 2 приведены компонентные составы исследуемых НГ различных месторождений Российской Федерации [20].

Компонентный состав нефтяных газов.⁴

Компонент, об. % (Component, vol. %)	Нефтяные газы (Petroleum gases)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CH ₄	72,7	49,2	39,5	52,5	58,0	28,0	18,7	5,1	8,4	4,2
C ₂ H ₆	3,9	15,8	20,6	14,7	7,2	13,2	15,2	3,1	5,1	2,0
C ₃ H ₈	8,7	16,8	20,0	10,5	8,5	17,5	15,9	5,5	4,2	2,3
C ₄ H ₁₀	8,9	9,4	7,6	7,4	7,0	9,8	7,4	9,8	1,7	1,5
C ₅ H ₁₂	4,2	5,6	3,5	3,7	5,8	4,8	1,3	5,2	1,2	0,7
C ₆ H ₁₄	0	0	0	0	0	0	0,3	0	0,4	0,2
H ₂ S	0	0	0,4	0	0	0	0,3	0	0	0
CO ₂	0,6	0,7	3,2	3,0	3,0	0,5	0,9	4,7	0,3	0
N ₂	1,0	2,5	5,2	8,2	10,5	26,2	40,3	66,6	78,7	89,0
Объемное содержание негорючих компонентов, об. % (Ballast components concentration, vol. %)	1,6	3,2	8,4	11,2	13,5	26,7	41,2	71,3	79,0	89,0

Здесь: 1 – Мамонтовское месторождение (Ханты-Мансийский автономный округ); 2 – Усинское месторождение (Республика Коми); 3 – Уршакское месторождение (Республика Башкортостан); 4 – Зимняя Ставка (Ставропольский край); 5 – Старогрозненское месторождение (Чеченская республика); 6 – Елабужское месторождение (Республика Татарстан); 7 – Шемети (Пермский край); 8 – Салаушское месторождение (Тульская область); 9 – Гремихинское месторождение (Удмуртская Республика.); 10 – Чугырское месторождение (Удмуртская Республика)

(Here: 1 – Mamontovskoye field (Khanty-Mansi Autonomous Area); 2 – Usinskoye field (Komi Republic); 3 – Urshakskoye field (Republic of Bashkortostan); 4 – Zimnyaya Stavka field (Stavropol krai); 5 – Starogroznskoye field (Chechen Republic); 6 – Elabuzhskoye field (Republic of Tatarstan); 7 – Shemeti field (Perm region); 8 – Salaushskoye field (Tula region); 9 – Gremikhinskoye field (Udmurtia); 10 – Chutyrskoye field (Udmurtia))

С увеличением содержания негорючих компонентов (N₂, CO₂, H₂O) возрастают проблемы по организации устойчивого горения. Тяжелые углеводороды (пентан и выше) при условиях подачи в утилизационную камеру ГТУ могут находиться в конденсированном состоянии.

Для их исключения следует применять сепараторы или подогреватели топливного газа в составе энергоустановки.

Содержание сероводорода в составе НГ увеличивает концентрацию серосодержащих соединений SO_x и серной кислоты H₂SO₄ в составе продуктов сгорания, что приводит к коррозионному уносу конструктивных элементов по «горячему» тракту установки.

Массовые стехиометрические соотношения между воздухом и топливным газом определялись по формуле (1).

Объемные стехиометрические соотношения между воздухом и топливным газом определялись по формуле (2)

На рисунке 1 приведены графические зависимости нижнего и верхнего пределов горения в объемных процентах топливного газа от содержания негорючих компонентов.

Здесь и далее содержание негорючих компонентов соответствует составам реальных ПНГ, представленных в таблице 2.

Нижние и верхние пределы горения определены с использованием теоретической модели, основанной на коэффициентах флегматизации [10].

С увеличением содержания балластирующих компонентов в топливном газе требуется подводить большее количество топливного газа на единицу объема топливо-воздушной смеси.

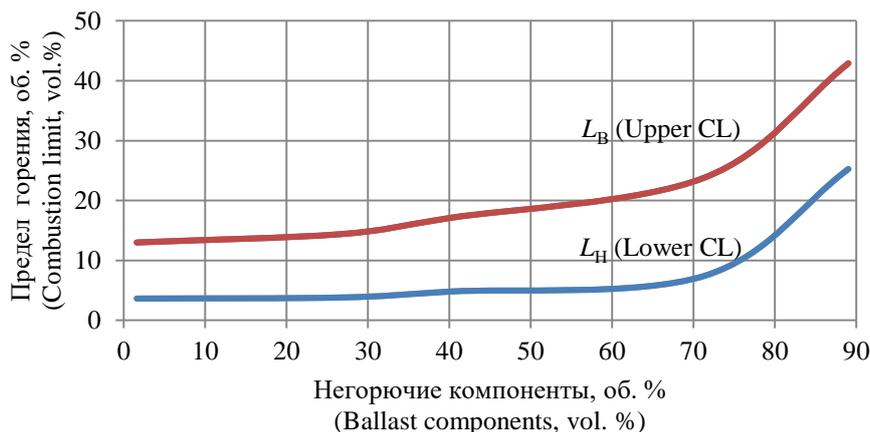


Рис. 1. Зависимости верхнего и нижнего концентрационных пределов горения НГ от содержания негорючих компонентов.⁵

$$K_{m0} = \frac{\frac{8}{3} \cdot g_C^{\text{гор}} + 8 \cdot g_H^{\text{гор}} + g_S^{\text{гор}} - g_O^{\text{гор}}}{g_O^{\text{ок}} - \frac{8}{3} \cdot g_C^{\text{ок}} + 8 \cdot g_H^{\text{ок}} - 8 \cdot g_S^{\text{ок}}}, \quad (1)$$

$$K_{v0} = \frac{\rho_{\text{гор}}}{\rho_{\text{ок}}} \cdot K_{m0}, \quad (3)$$

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

Массовые доли i -го элемента

$$g_i = \frac{A_i \cdot m_i}{\sum A_i \cdot m_i}, \quad (2)$$

где A_i – атомная масса i -го элемента; m_i – количество атомов i -го элемента в условной химической формуле воздуха или ПНГ.

где $\rho_{\text{гор}}, \rho_{\text{ок}}$ – плотности горючего и окислителя соответственно.

На рисунке 2 приведены графические зависимости массового K_{m0} и объемного K_{v0} стехиометрических соотношений от содержания негорючих компонентов.

Уменьшение K_{m0} и K_{v0} объясняется тем, что с увеличением доли подводимого горючего уменьшается доля подводимого окислителя

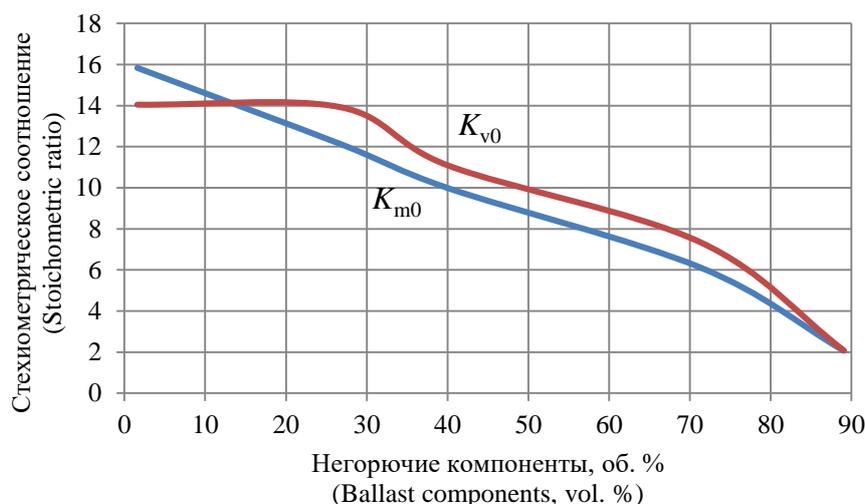


Рис. 2. Зависимости массового и объемного стехиометрических соотношений от содержания негорючих компонентов.⁶

Коэффициент избытка воздуха на верхнем или нижнем пределах горения в данной работе определялся по соотношению

$$\alpha = \frac{1}{K_{v0}} \cdot \frac{100-L}{L}, \quad (4)$$

где L – верхний или нижний предел горения ПНГ, об. %.

С другой стороны

$$\alpha = \frac{1}{K_{m0}} \cdot \frac{\dot{G}_{ок}}{\dot{G}_{гор}}, \quad (5)$$

где $\dot{G}_{ок}$, $\dot{G}_{гор}$ – массовые расходы воздуха и топливного газа.

Из анализа рисунка 2 и приведенной формулы для определения α видно, что в процессе эксплуатации утилизационной ГТУ коэффициент избытка воздуха в камере зависит не только от расходов, но и от состава топливного газа.

На рисунке 3 приведены графические зависимости коэффициента избытка воздуха на нижнем и верхнем пределах горения от содержания негорючих компонентов в топливном газе.

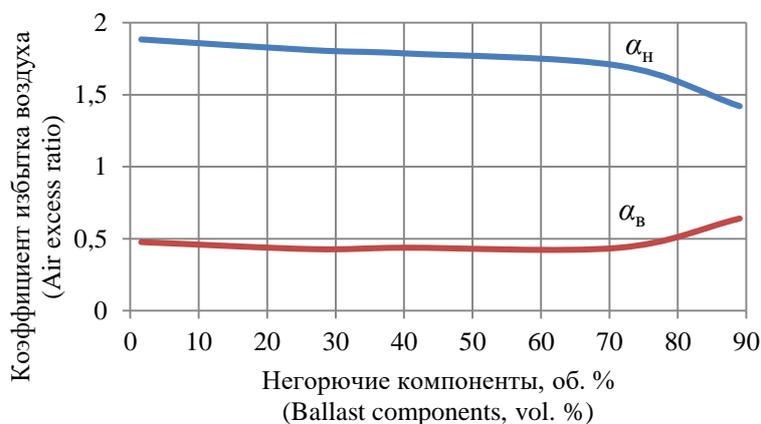


Рис. 3. Зависимости коэффициентов избытка воздуха на верхнем и нижнем пределах горения от содержания негорючих компонентов.⁷

Анализ рисунка 3 показывает, что при проектировании утилизационных КС коэффициент избытка воздуха в зоне горения должен находиться примерно в диапазоне (0,44 – 1,70).

Теоретически показано, что ПНГ с содержанием балластирующих компонентов 89,0 об. % будет устойчиво гореть в диапазоне от 0,64 до 1,42. Однако авторам известны неудачные попытки воспламенения подобных ПНГ. Самой вероятной причиной этих неудач является несоответствие скорости движения смеси в КС и скорости турбулентного горения, но данное утверждение требует дополнительных исследований.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования закономерностей горения забалластированных ПНГ проводились на

экспериментальном стенде, фото которого приведено на рисунке 4.

В конструкции экспериментальной КС предусмотрена сменная форсуночная головка с целью исследования влияния различных типов и схем расположения форсунок на параметры рабочего процесса. В данной серии экспериментов использовалась струйная форсунка топливного газа диаметром 0,001 м, расположенная в центре головки. Подача воздуха в КС осуществлялась от ресивера через четыре струйных форсунки диаметром 0,003 м, расположенных по окружности диаметром 0,018 м с углом наклона к оси 25 град. Цилиндрическая боковая стенка также является сменной с целью исследования различных схем подвода вторичного воздуха на характеристики горения. В данной серии экспериментов осуществлялось однозонное горение без подвода вторичного воздуха через боковые отверстия.

В процессе экспериментальных исследований определялись температуры, давления и расходы по линиям подачи воздуха и НГ. Температуры в зоне пламени по оси камеры определялись с помощью

четырёх хромель-алюмелевых термопар. Все параметры регистрировались и записывались с помощью измерительного комплекса «МЕРА».



Рис. 4. Экспериментальный стенд.⁸

Экспериментальные исследования проводились с использованием отобранного в баллоны НГ непосредственно на месторождении.

Данные по плотности воздуха и топливного газа получены по уравнению состояния

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

где P , T – измеряемые давления и температуры по линии подачи воздуха и НГ соответственно; R – газовая постоянная воздуха и НГ соответственно.

Коэффициенты избытка воздуха

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

где $Q_{ок}$, $Q_{гор}$ – измеряемые объемные расходы воздуха и НГ соответственно.

Параметры подачи воздуха и топливного газа (расходы, давления и температуры) позволили обеспечить коэффициенты избытка воздуха в диапазоне от 0,40 до 1,32.

Показания термопар в зоне пламени и синхронная видеосъемка процесса позволили оценить наличие горения внутри камеры при установленном значении коэффициента избытка воздуха.

Экспериментальные данные по параметрам подачи воздуха и нефтяного газа и температурам в зоне пламени по оси горелки представлены в таблице 3.

Таблица 3⁹

Данные экспериментальных исследований.¹⁰

α	$Q_{гор}$, л/мин (lpm)	$Q_{ок}$, л/мин (lpm)	L , об. % (vol.%)	$\rho_{гор}$, кг/м ³ (kg/m ³)	$\rho_{ок}$, кг/м ³ (kg/m ³)	Показания термопар в зоне пламени, К (Flame zone thermocouple readings, K)			
						$x/l=0,111$	$x/l=0,225$	$x/l=0,480$	$x/l=0,682$
0,40	1,9	8,5	18,2	1,328	1,253	615	633	563	491
0,54	2,3	13,7	14,4	1,315	1,253	633	767	676	586
0,97	5,8	84,0	6,4	1,566	1,264	893	1303	1203	1103
1,17	3,2	56,0	5,4	1,566	1,264	789	1233	1138	1043
1,32	3,4	6,8	4,8	1,566	1,264	703	913	863	813

На рисунке 5 представлены экспериментальные значения температуры в

зоне пламени вдоль оси горелки при разных значениях коэффициента избытка воздуха.

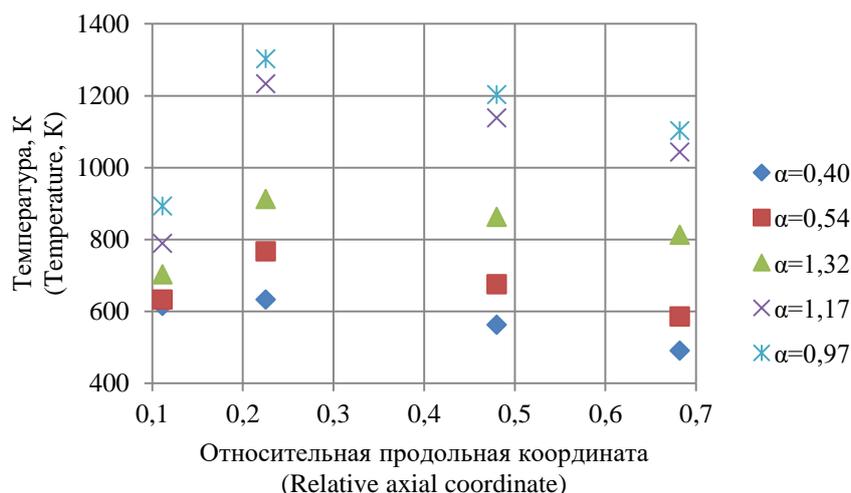


Рис. 5. Экспериментальные значения температуры в зоне пламени.¹¹

ВЫВОДЫ

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования позволили определить диапазоны воспламеняемости забалластированных НГ по коэффициенту избытка воздуха от 0,40 до 1,70. Указанный диапазон можно реализовать в разных утилизационных камерах следующим образом

1) диффузионное бедное горение в охлаждаемой двухзонной камере с коэффициентами избытка воздуха в первичной зоне в пределах от 1,00 до 1,70;

2) диффузионное богато-бедное горение в охлаждаемой двухзонной камере с коэффициентами избытка воздуха в первичной зоне в пределах от 0,44 до 1,00. Такой тип горения позволяет значительно снизить эмиссию вредных веществ;

3) гомогенное бедное горение предварительно подготовленной топливо-воздушной смеси в первичной зоне охлаждаемой двухзонной КС с коэффициентом избытка воздуха в пределах от 1,00 до 1,70;

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

^{1,2}Table 1. Standard fuel and natural gases combustion limits.

^{3,4}Table 2. Oil gases component composition.

⁵Fig. 1. Upper and lower combustion limits dependencies on ballast components concentration.

⁶Fig. 2. Mass and volume stoichiometric ratios dependencies on ballast components concentration.

⁷Fig. 3. Excess air coefficients dependence on the ballast components concentration on the upper and lower combustion limits.

⁸Fig. 4. Experimental setup.

^{9,10}Table 3. Experimental data.

¹¹Fig. 5. Flame zone experimental temperature values.

Литература (References)

- [1] Coronado C.J., Carvalho J.A. Jr., Andrade J.C., Cortez E.V., Carvalho F.S., Santos J.C., Mendiburu A.Z. Flammability limits: A review with emphasis of ethanol for aeronautical applications and description of the experimental procedure. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, vol. 241-242, pp. 32-54.
- [2] Cauê Cainã Mohler dos Santos, Everton Zanoelo. Flammability limits of iso-butanol/iso-octane/n-heptane blends. *Fire Safety Journal*, 2017, vol. 88, pp. 40-44.
- [3] Tingguang Ma. A thermal theory for estimating the flammability limits of a mixture. *Fire Safety Journal*, 2011, vol. 46, Issue 8, pp. 558-567.
- [4] Elkin I. Gutiérrez Velásquez, Christian J.R. Coronado, Juan C. Quintero Cartagena, João A. Carvalho Jr., Andrés Z. Mendiburu, José C. Andrade, Ely V. Cortez, José C. Santos. Prediction of flammability limits for ethanol-air blends by the Kriging regression model and response surfaces. *Fuel*, 2017, vol. 210, pp. 410-424.
- [5] Andrés Z. Mendiburu, João A. de Carvalho Jr., Christian R. Coronado. Determination of upper flammability limits of CHO compounds in air at reference temperature and atmospheric pressure. *Fuel*, 2017, vol. 188, pp. 212-222.
- [6] Andrés Z. Mendiburu, Joao Carvalho, Christian R. Coronado, German Raul Chumpitaz Ayala. Determination of lower flammability limits of C-H-O compounds in air and study of initial temperature dependence. *Chemical Engineering Science*, 2016, vol. 144, pp. 188-200.
- [7] Andrés Z. Mendiburu, João A. de Carvalho Jr., Christian R. Coronado, Justo J. Roberts. Flammability limits temperature dependence of pure compounds in air at atmospheric pressure. *Energy*, 2017, vol. 118, pp. 414-424.

- [8] Mingqiang Wu, Gequn Shu, Hua Tian, Xueying Wang, Yuewei Liu. The thermal theory based equation for correlation between temperature and flammability limits of hydrocarbons. *Fuel*, 2018, vol. 214, pp. 55-62.
- [9] Horng-Jang Liaw, Kuan-Yu Chen. A model for predicting temperature effect on flammability limits. *Fuel*, 2016, vol. 178, pp. 179-187.
- [10] Andrés Z.M., João A. de C. Jr., Christian R.C. Method for determination of flammability limits of gaseous compounds diluted with N₂ and CO₂ in air. *Fuel*, 2018, vol. 226, pp. 65-80.
- [11] Liao S.Y., Cheng Q., Jiang D.M., Gao J. Experimental study of flammability limits of natural gas-air mixture. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, vol. 119, Issues 1-3, pp. 81-84.
- [12] Gan C., Zili L., Chao Y. Experimental study of flammability limits of methane/air mixtures at low temperatures and elevated pressures. *Fuel*, 2016, vol. 181, pp. 1074-1080.
- [13] Wang T., Luo Z., Wen H., Cheng F., Deng J., Zhao J., Guo Z., Lin J., Kang K., Wang W. Effects of flammable gases on the explosion characteristics of CH₄ in air. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, vol. 49, Part B, pp. 183-190.
- [14] Zamashchikov V.V. On the Flammability Limit. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 2018, vol. 54, Issue 4, pp. 393-397.
- [15] Mishra D.P., Rahman A. An experimental study of flammability limits of LPG/air mixtures. *Fuel*, 2003, vol. 82, Issue 7, pp. 863-866.
- [16] Grabarczyk M.G., Porowski R., Teodorczyk A. Flammability characteristics of butanol fuel blends at various initial temperatures. *Archivum Combustionis*, 2014, vol. 34, pp. 49-70.
- [17] Bruna Maria Marmentini Vivas, Éverton Fernando Zanoelo. An Experimental Investigation of Flammability Limits and Autoignition Temperatures of Petrofuels and Biofuels in a Tubular Burner. *Combustion Science and Technology*, 2011, vol. 183, Issue 12, pp. 1433-1444.
- [18] Hamidi N., Ilminnafik N. Inert Effects on Flammability Limits and Flame Propagation of LPG by CO₂. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 664, pp. 226-230.
- [19] Liaw H.J., Chen C.C., Lin N.K., Shu C.M., Shen S.Y. Flammability Limits Estimation for Fuel-Air-Diluent Mixtures Tested in a Constant Volume Vessel. *Process Safety and Environmental Protection*, 2016, vol. 100, pp. 150-162.
- [20] Yermakov V.I., Zorkin L.M., Skorobogatov V.A., Staroselskiy V.I. *Geologiya i geokhimiya prirodnyh goryuchih gazov: Spravochnik [Geology and geochemistry of natural combustible gases: Handbook]*. Nedra, 1990, 315 p. (In Russian).

Сведения об авторах.



Бачев Николай Леонидович - к.т.н., доцент кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ПНИПУ. Область научных интересов: утилизационные газотурбинные установки.
E-mail: bn154@yandex.ru



Булбович Роман Васильевич – д.т.н., профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ПНИПУ. Область научных интересов: авиационное и ракетное двигателестроение.
E-mail: Bulbovich@pstu.ru



Матюнин Олег Олегович – старший преподаватель кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ПНИПУ. Область научных интересов: численное моделирование рабочих процессов в ЭУ.
E-mail: matoleg@gmail.com



Бетинская Оксана Андреевна – к.т.н., доцент кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ПНИПУ. Область научных интересов: турбомашин и комбинированные ЭУ.
E-mail: oksanochka_zueva@mail.ru



Шилова Алена Алексеевна - инженер кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ПНИПУ. Область научных интересов: рабочие процессы в КС ЭУ.
E-mail: alyona1203@gmail.com