

УДК 665.612.2

**О.А. Зуева**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия

## **КОНЦЕНТРАЦИОННЫЕ ПРЕДЕЛЫ ГОРЕНИЯ ПОПУТНЫХ НЕФТЯНЫХ ГАЗОВ**

Рассмотрены вопросы определения диапазонов коэффициента избытка воздуха, обеспечивающего устойчивое горение разнородных по составу попутных нефтяных газов (ПНГ) с высоким содержанием азота при их утилизации в газотурбинных установках (ГТУ) с выработкой электрической энергии на малодобитных месторождениях. Концентрационные пределы горения при реальных режимах подачи окислителя и горючего в многозонную камеру сгорания (КС) получены по методу Ле Шателье и методу с учетом кинетики реакции горения. Сравнение полученных результатов показало, что с достаточной точностью для принятия технических решений применим менее трудоемкий метод Ле Шателье. Расчеты показали, что с увеличением содержания балластирующих компонентов в составе ПНГ диапазон устойчивого горения по коэффициенту избытка воздуха значительно сужается. Для обеспечения устойчивого горения сильно забалластированных ПНГ требуется увеличение расхода горючего. С повышением температуры подачи утилизируемого ПНГ диапазон устойчивого горения по коэффициенту избытка воздуха расширяется, поскольку в топливную смесь вносится внешнее физическое тепло. Для увеличения ресурса работы неохлаждаемой турбины температура продуктов сгорания на выходе из КС не должна превышать 950 °С, поэтому в многозонной КС предусмотрены зоны горения (устойчивое горение) и зоны разбавления (получение ПС с допустимой температурой). При разработке унифицированной многозонной КС в составе ГТУ организация процесса горения в первой зоне должна осуществляться при коэффициентах избытка воздуха из полученных диапазонов. Концентрационные пределы горения получены для ПНГ с содержанием азота до 60 %, добываемых ОАО «ЛУКОЙЛ-Пермь» и ТПП «Ритек-Уралойл» на месторождениях Пермского края.

**Ключевые слова:** попутный нефтяной газ, верхний и нижний концентрационные пределы горения, принцип Ле Шателье, кинетика реакции горения, балластирующий компонент, коэффициент избытка воздуха, условия подачи, компонентный состав, устойчивость горения, многозонная КС.

**O.A. Zueva**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **CONCENTRATION LIMITS OF COMBUSTION OF ASSOCIATED PETROLEUM GASES**

The questions on defining ranges of air excess factor are considered. The factor provides steady combustion of dissimilar in composition associated petroleum gases (APG) with a high content of nitrogen at their disposal in gas-turbine units (GTU) for electricity production in marginal fields. Concentration limits of combustion under real conditions of oxidizer and fuel supply in the multi-zone combustion chamber (CC) are obtained by Le Chatelier principle and the method of account the kinetics of

combustion reaction. Comparing the obtained results Le Chatelier's principle appears to be less time-consuming and sufficiently accurate for the adoption of technical solutions. The calculations show that with increase of the content of ballasting components in APG the range of steady combustion on the air excess factor is significantly narrowed. To provide steady combustion of ballasted APG increase of the fuel consumption is required. When increasing the supply temperature of recyclable APG the range of steady combustion on the air excess factor widens because the external physical heat is added to the fuel mixture. To increase the service life of non-cooled turbine the temperature of the combustion products at the outlet from the CC should not exceed 950 °C. Thus in a multi-zone CC it is provided for the combustion zone (steady combustion) and dilution zone (getting combustion products with valid temperature). When developing of a unified multi-zone CC in the composition of the GTU the combustion process structure in the first zone should be implemented with the excess air coefficients from the obtained ranges. Concentration limits of combustion are obtained for the APG with content of nitrogen up to 60 % produced by JSC "LUKOIL-Perm" and territorial and production enterprise "RITEK-Uraloil" on deposits of Perm region.

**Keywords:** associated petroleum gas, upper and lower concentration limits of combustion, Le Chatelier's principle, kinetics of combustion reaction, ballasting component, air excess factor, supply condition, component structure, stability of combustion, multizonal combustion chamber.

В газотурбинных установках (ГТУ) для утилизации попутных нефтяных газов (ПНГ) с выработкой электрической и тепловой энергии температура газа перед неохлаждаемой турбиной обычно принимается 700–950 °C исходя из работоспособности лопаток турбины [1, 2]. При таких условиях становится невозможной организация устойчивого горения. В многозонной КС устойчивое горение обеспечивается в зоне горения при соотношении компонентов, близком к стехиометрическому, а допустимая температура на входе в турбину достигается в зонах дожигания подводом вторичного воздуха [3–5]. Это позволяет обеспечить высокий ресурс ГТУ при утилизации разнородных по составу неподготовленных ПНГ различных месторождений.

При удалении состава топливной смеси от стехиометрического возрастают потери тепла из зоны пламени на нагрев избытка компонента. Это приводит к снижению теплового эффекта реакции, прогрессирующему охлаждению зоны горения и уменьшению скорости распространения пламени. При снижении количества горючего (бедные смеси) или окислителя (богатые смеси) больше критического пламя гаснет на некотором расстоянии от места его инициирования либо невозможно поджечь такую смесь внешним импульсом тепла. Для смесей окислителя и горючего принято различать верхнюю и нижнюю предельные концентрации горючего. Концентрационные пределы горения не являются физико-химическими константами данного топлива, а зависят от состава топлива, начальной температуры и давления газозвушной смеси [6, 7]. С повышением начальной температуры концентрационный диапазон воспламенения увеличивается, поскольку в смесь вно-

сится внешнее физическое тепло. При подогреве смеси до температуры воспламенения смесь загорается при любом соотношении газа и воздуха. Изменение начального давления смеси влияет на концентрационные пределы воспламенения по-разному.

Имеющиеся экспериментальные данные по концентрационным пределам горения получены в основном для индивидуальных газов, кроме того, даже в справочных данных для хорошо исследованных веществ имеются различия по концентрационным пределам [8]. Для разнородных по составу ПНГ различных месторождений можно использовать такие расчетные методы, как правило Ле Шателье [9] и метод с учетом кинетики реакции горения<sup>1</sup>.

Рассмотренные методы расчета концентрационных пределов горения могут быть также успешно применены в ракетно-космической технике при исследовании устойчивых режимов работы в КС жидкостных ракетных двигателей на компонентах кислород + сжиженный природный газ.

### Метод Ле Шателье

Пределы воспламенения сложных газов, состоящих из нескольких горючих газов, зависят от пределов воспламенения составных частей и могут быть определены по методу Ле Шателье [9].

Нижний или верхний пределы воспламенения горючей части ПНГ (об. %)

$$L = \frac{r_1 + r_2 + \dots + r_n}{\frac{r_1}{L_1} + \frac{r_2}{L_2} + \dots + \frac{r_n}{L_n}},$$

где  $r_1, r_2, \dots, r_n$  – содержание горючих компонентов в ПНГ, об. %;  $L_1, L_2, \dots, L_n$  – верхние или нижние пределы воспламенения горючих компонентов.

Для забалластированного ПНГ верхний или нижний пределы воспламенения (об. %)

---

<sup>1</sup> ГОСТ 12.1.039–82. Пожарная безопасность. Методы расчета концентрационных пределов воспламенения газов и паров. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 17 с.

$$L_6 = \frac{1 + \frac{r_6}{1 - r_6}}{100 + L \cdot \frac{r_6}{1 - r_6}} \cdot 100,$$

где  $r_6$  – содержание балластирующих компонентов в составе ПНГ, об. доли.

Коэффициент избытка воздуха на верхнем или нижнем пределах воспламенения для горючей части ПНГ и забалластированного ПНГ

$$\alpha = \left( \frac{100}{L} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_{v0}}, \quad \alpha_6 = \left( \frac{100}{L_6} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_{v0}}.$$

Стехиометрическое объемное соотношение воздуха и ПНГ

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

где  $K_{m0}$  – стехиометрическое массовое соотношение компонентов;  $\rho_{гор}$ ,  $\rho_{ок}$  – плотности горючего и окислителя соответственно, вычисляемые по уравнению состояния идеального газа.

При температурах подачи ПНГ в КС энергоустановки от 25 до 150 °С нижний и верхний пределы распространения пламени (об. %) вычисляются по формулам [10]

$$L'_н = L_{н.б} \cdot \left( 1 - \frac{t - 25}{1250} \right),$$

$$L'_в = L_{в.б} \cdot \left( 1 - \frac{t - 25}{800} \right),$$

где  $L_{н.б}$ ,  $L_{в.б}$  – нижний и верхний пределы воспламенения забалластированного ПНГ соответственно;  $t$  – температура подачи ПНГ, °С.

### Метод с учетом кинетики реакции горения

Более точные значения концентрационных пределов горения по сравнению с методом Ле Шателье могут быть получены при анализе кинетики реакции горения [10].

Число атомов углерода в горючей части ПНГ

$$N_C = \frac{\sum r_j \cdot N_{Cj}}{\sum r_j},$$

где  $j$  – горючий компонент в составе ПНГ ( $j$ :  $\text{CH}_4$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8$ ;  $i$ - $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ;  $n$ - $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ;  $i$ - $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ;  $n$ - $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ;  $\text{C}_6\text{H}_{14}$ ;  $\text{H}_2$ ;  $\text{H}_2\text{S}$ );  $N_{Cj}$  – количество атомов углерода в  $j$ -м соединении.

Число атомов водорода в горючей части ПНГ

$$N_H = \frac{\sum r_j \cdot N_{Hj}}{\sum r_j},$$

где  $N_{Hj}$  – количество атомов водорода в  $j$ -м соединении.

Число атомов серы в горючей части ПНГ

$$N_S = \frac{\sum r_j \cdot N_{Sj}}{\sum r_j},$$

где  $N_{Sj}$  – количество атомов серы в  $j$ -м соединении.

Стандартная теплота образования горючей части ПНГ

$$\Delta H_r^0 = \frac{\sum r_j \cdot \Delta H_j^0}{\sum r_j},$$

где  $\Delta H_j^0$  – стандартная теплота образования  $j$ -го горючего компонента, кДж/моль.

Молярная масса горючей части ПНГ

$$M = \frac{\sum r_j \cdot M_j}{\sum r_j},$$

где  $M_j$  – молярная масса  $j$ -го горючего компонента.

Флегматизирующее содержание азота (%)

$$(\varphi_\Phi)_{N_2} = 100 \cdot \frac{0,00865 \cdot \Delta H_r^0 + 1,256 + 2,528 \cdot N_C + 0,759 \cdot N_H}{1,8 + 5,94 \cdot N_C + 1,486 \cdot N_H}.$$

Флегматизирующее содержание двуокиси углерода (%)

$$(\varphi_{\phi})_{\text{CO}_2} = 100 \cdot \frac{0,00736 \cdot \Delta H_r^0 + 0,584 + 1,292 \cdot N_C + 0,427 \cdot N_H}{1,02 + 4,642 \cdot N_C + 1,16 \cdot N_H}.$$

Флегматизирующее содержание паров воды (%)

$$(\varphi_{\phi})_{\text{H}_2\text{O}} = 100 \cdot \frac{0,00802 \cdot \Delta H_r^0 + 0,78 + 1,561 \cdot N_C + 0,527 \cdot N_H}{1,236 + 5,0 \cdot N_C + 1,25 \cdot N_H}.$$

Флегматизирующее содержание всех инертных компонентов (%)

$$\varphi_{\phi} = \frac{(\varphi_{\phi})_{\text{N}_2} \cdot r_{\text{N}_2} + (\varphi_{\phi})_{\text{CO}_2} \cdot r_{\text{CO}_2} + (\varphi_{\phi})_{\text{H}_2\text{O}} \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{r_{\text{N}_2} + r_{\text{CO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}}}.$$

Коэффициент флегматизации азота

$$(K_{\phi})_{\text{N}_2} = \frac{\Sigma r_j}{\frac{r_{\text{H}_2}}{0,003} + \frac{r_{\text{CO}}}{0,002} + \frac{(\Sigma r_j)'}{0,1}},$$

где  $(\Sigma r_j)'$  – суммарное содержание углеводородных соединений в составе ПНГ, об. %.

Коэффициент флегматизации двуокиси углерода

$$(K_{\phi})_{\text{CO}_2} = \frac{\Sigma r_j}{\frac{r_{\text{H}_2}}{0,018} + \frac{r_{\text{CO}}}{0,096} + \frac{(\Sigma r_j)'}{0,19}}.$$

Коэффициент флегматизации паров воды

$$(K_{\phi})_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,16 \cdot \Sigma r_j}{(\Sigma r_j)'}$$

Общий коэффициент флегматизации

$$K_{\phi} = \frac{(K_{\phi})_{\text{N}_2} \cdot r_{\text{N}_2} + (K_{\phi})_{\text{CO}_2} \cdot r_{\text{CO}_2} + (K_{\phi})_{\text{H}_2\text{O}} \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{r_{\text{N}_2} + r_{\text{CO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}}}.$$

### Коэффициенты

$$A = \frac{\sum r_j}{L_{hj}}; B = \frac{\sum r_j}{L_{bj}},$$

где  $L_{hj}$ ,  $L_{bj}$  – нижний и верхний пределы воспламенения  $j$ -го горючего компонента.

Нижний и верхний пределы воспламенения забалластированного ПНГ (об. %):

$$L_{н.б} = \frac{100}{1 + A - 0,01 \cdot (0,988 \cdot r_{N_2} + 1,59 \cdot r_{CO_2} + 1,247 \cdot r_{H_2O} + r_{O_2} + \sum r_j)},$$

$$L_{в.б} = \frac{100}{B + \frac{(r_{N_2} + r_{CO_2} + r_{H_2O}) \cdot \left(1 - \frac{B}{A}\right) \cdot (1 - K_\phi)}{\Phi_\phi}}.$$

Коэффициенты избытка воздуха при сжигании забалластированного ПНГ на нижнем и верхнем пределах воспламенения  $\alpha_{н.б}$  и  $\alpha_{в.б}$  (стандартная температура) и  $\alpha'_{н.б}$  и  $\alpha'_{в.б}$  (температура подачи) вычисляются аналогично методу Ле Шателье.

### Анализ полученных результатов

ПНГ различных месторождений заметно отличаются по составу. Анализ компонентных составов ПНГ 15 месторождений Пермского края показал, что содержание балластирующих компонентов ( $N_2$ ,  $CO_2$ , He) может достигать 60 % в основном за счет содержания азота. В качестве примера в табл. 1 приведены компонентные составы четырех месторождений. Здесь же приведены нижний  $L_{н}$  и верхний  $L_{в}$  пределы воспламенения горючих компонентов ПНГ.

В табл. 2 приведены результаты расчета концентрационных пределов горения по методу Ле Шателье на примере газа ПНГ-4 с содержанием балластирующих компонентов 40,6 об. %, которые получены при  $K_{m0} = 14,7$ ;  $K_{v0} = 15,6$ ;  $t = 60$  °С.

Таблица 1

Компонентный состав ПНГ

Компонентный состав	$\Delta H_j^0$ , кДж/кг	$L_H$ , об. %	$L_B$ , об. %	Объемное содержание, %			
				ПНГ-1	ПНГ-2	ПНГ-3	ПНГ-4
CH <sub>4</sub>	-4650,0	5,0	15,0	18,68	12,44	12,56	23,19
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	-2815,8	3,2	12,5	15,18	6,32	26,01	11,81
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-2355,0	2,3	9,5	15,92	6,09	36,78	14,77
<i>i</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	-2314,0	1,8	8,4	2,89	2,82	3,65	2,34
<i>n</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	-2169,5	1,7	8,5	4,49	5,31	10,18	4,82
<i>i</i> -C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	-2023,8	1,5	7,8	0,91	2,23	2,20	1,12
<i>n</i> -C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	-2023,8	1,4	7,8	0,38	1,46	2,14	0,79
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	-1991,3	1,0	8,0	0,32	0,92	5,39	0,36
H <sub>2</sub> S	-604,4	4,5	45,0	0,3	0,31	0,07	0,07
H <sub>2</sub>	0	6,2	71,4	–	–	–	0,05
N <sub>2</sub>	0	–	–	40,03	61,21	0,90	38,84
CO <sub>2</sub>	-8932,8	–	–	0,90	0,84	0,13	1,75
He	0	–	–	0,04	0,05	–	–

Таблица 2

Концентрационные пределы горения по методу Ле Шателье

Параметр	Обозначение	Величина
Нижний концентрационный предел горючей части ПНГ, об. %	$L_H$	2,88
Верхний концентрационный предел горючей части ПНГ, об. %	$L_B$	11,44
Коэффициент избытка воздуха на нижнем концентрационном пределе горючей части	$\alpha_H$	2,156
Коэффициент избытка воздуха на верхнем концентрационном пределе горючей части	$\alpha_B$	0,495
Нижний концентрационный предел забалластированного ПНГ, об. %	$L_{H,б}$	4,77
Верхний концентрационный предел забалластированного ПНГ, об. %	$L_{B,б}$	17,90
Коэффициент избытка воздуха на нижнем концентрационном пределе забалластированного ПНГ	$\alpha_{H,б}$	1,277
Коэффициент избытка воздуха на нижнем концентрационном пределе забалластированного ПНГ	$\alpha_{B,б}$	0,293
Нижний концентрационный предел забалластированного ПНГ при температуре подачи, об. %	$L_H^t$	4,64
Верхний концентрационный предел забалластированного ПНГ при температуре подачи, об. %	$L_B^t$	17,12
Коэффициент избытка воздуха на нижнем концентрационном пределе забалластированного ПНГ при температуре подачи	$\alpha_H^t$	1,316
Коэффициент избытка воздуха на нижнем концентрационном пределе забалластированного ПНГ при температуре подачи	$\alpha_B^t$	0,310

Анализ данных, приведенных в табл. 2, позволяет сделать следующие выводы:

Содержание балластирующих компонентов в составе ПНГ приводит к увеличению  $L_n$  и  $L_b$  на 40 и 36 % соответственно или к уменьшению  $\alpha_n$  и  $\alpha_b$  на 41 %. Таким образом, диапазон устойчивого горения  $\Delta\alpha$  уменьшился на 41 % и для обеспечения устойчивого горения требуется увеличение расхода горючего.

Учет температуры подачи забалластированного ПНГ приводит к уменьшению  $L_n$  и  $L_b$  на 3 и 4 % соответственно или к увеличению  $\alpha_n$  и  $\alpha_b$  на 3 и 5 % соответственно. Диапазон устойчивого горения  $\Delta\alpha$  увеличивается на 2 %, следовательно, для обеспечения устойчивого горения требуется некоторое уменьшение расхода горючего.

При этом стехиометрическое соотношение компонентов  $\alpha=1$  находится в диапазоне устойчивого горения.

В табл. 3 приведены результаты расчета концентрационных пределов с учетом кинетики реакции горения на примере газа ПНГ-4, которые получены при  $K_{m0} = 14,7$ ;  $K_{v0} = 15,6$ ;  $t = 60$  °С.

Таблица 3

Концентрационные пределы горения с учетом кинетики реакции горения

Параметр	Обозначение	Величина
Число атомов углерода в горючей части	$N_C$	2,245
Число атомов водорода в горючей части	$N_H$	6,490
Число атомов серы в горючей части	$N_S$	$1,172 \cdot 10^{-3}$
Стандартная теплота образования горючей части газа, кДж/моль	$\Delta H_r^0$	-119,7
Молярная масса горючей части газа, кг/моль	$M$	0,033
Флегматизирующее содержание инертных компонентов, об. %	$\Phi_\phi$	25,6
Общий коэффициент флегматизации	$K_\phi$	0,104
Нижний предел распространения пламени забалластированного ПНГ при стандартных условиях, об. %	$L_{n.б}$	4,90
Верхний предел распространения пламени забалластированного ПНГ при стандартных условиях, об. %	$L_{b.б}$	16,00
Коэффициент избытка воздуха на нижнем концентрационном пределе забалластированного ПНГ	$\alpha_{n.б}$	1,234
Коэффициент избытка воздуха на верхнем концентрационном пределе забалластированного ПНГ	$\alpha_{b.б}$	0,333

Окончание табл. 3

Параметр	Обозначение	Величина
Нижний предел распространения пламени забалластированного ПНГ при температуре подачи, об. %	$L_{\text{н}}^t$	4,61
Верхний предел распространения пламени забалластированного ПНГ при температуре подачи, об. %	$L_{\text{в}}^t$	17,55
Коэффициент избытка воздуха на нижнем концентрационном пределе забалластированного ПНГ при температуре подачи	$\alpha_{\text{н}}^t$	1,320
Коэффициент избытка воздуха на нижнем концентрационном пределе забалластированного ПНГ при температуре подачи	$\alpha_{\text{в}}^t$	0,300

Сравнение данных, полученных методом Ле Шателье (см. табл. 2) и с учетом кинетики реакции горения (см. табл. 3), показало, что коэффициенты избытка воздуха при стандартной температуре отличаются на 3–12 %, а с учетом температуры подачи горючего на 0,5–3,0 %. Поэтому с достаточной для принятия технических решений точностью в дальнейшем целесообразно применение менее трудоемкого метода Ле Шателье.

В табл. 4 представлены результаты расчета концентрационных пределов горения ПНГ-1, ПНГ-2 и ПНГ-3 с содержанием балластирующих компонентов 1,03–62,10 об. %, полученные методом Ле Шателье при температуре подачи 60 °С, давлении подачи окислителя 0,43 МПа и давлении подачи горючего 0,5 МПа [3].

Таблица 4

Концентрационные пределы горения  
при реальных условиях подачи

Параметр	Величина			
	Обозначение	ПНГ-1	ПНГ-2	ПНГ-3
Содержание балластирующих компонентов, об. %	$r_{\text{б}}$	40,97	62,10	1,03
Массовое стехиометрическое соотношение компонентов	$K_{m0}$	14,546	14,804	15,195
Объемное стехиометрическое соотношение компонентов	$K_{v0}$	18,227	18,890	25,118
Нижний концентрационный предел горючей части ПНГ, об. %	$L_{\text{н}}$	2,83	2,47	2,30
Верхний концентрационный предел горючей части ПНГ, об. %	$L_{\text{в}}$	11,32	10,73	10,25
Коэффициент избытка воздуха на нижнем концентрационном пределе горючей части	$\alpha_{\text{н}}$	1,887	2,087	1,692
Коэффициент избытка воздуха на верхнем концентрационном пределе горючей части	$\alpha_{\text{в}}$	0,430	0,44	0,348

Окончание табл. 4

Параметр	Величина			
	Обозначение	ПНГ-1	ПНГ-2	ПНГ-3
Нижний концентрационный предел забалластированного ПНГ, об. %	$L_{н.б}$	4,69	6,27	2,32
Верхний концентрационный предел забалластированного ПНГ, об. %	$L_{в.б}$	17,78	24,08	10,35
Коэффициент избытка воздуха на нижнем концентрационном пределе забалластированного ПНГ	$\alpha_{н.б}$	1,114	0,791	1,675
Коэффициент избытка воздуха на верхнем концентрационном пределе забалластированного ПНГ	$\alpha_{в.б}$	0,254	0,167	0,345
Нижний концентрационный предел забалластированного ПНГ при температуре подачи, об. %	$L'_{н.б}$	4,56	6,10	2,26
Верхний концентрационный предел забалластированного ПНГ при температуре подачи, об. %	$L'_{в.б}$	16,99	23,03	9,90
Коэффициент избытка воздуха на нижнем концентрационном пределе забалластированного ПНГ при температуре подачи	$\alpha'_{н.б}$	1,148	0,815	1,724
Коэффициент избытка воздуха на верхнем концентрационном пределе забалластированного ПНГ при температуре подачи	$\alpha'_{в.б}$	0,268	0,177	0,362

Анализ данных, представленных в табл. 4, позволяет сделать вывод о том, что для создания унифицированной многозонной КС для утилизации ПНГ различных месторождений с содержанием балластирующих компонентов до 60 % целесообразна организация рабочего процесса в зоне горения при  $\alpha = 0,4 \dots 0,8$ .

На основе полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. Для принятия технических решений при разработке многозонной КС для утилизации ПНГ применим метод Ле Шателье.
2. Для утилизации ПНГ с содержанием балластирующих компонентов до 60 % целесообразна организация рабочего процесса в первой зоне КС при  $\alpha = 0,4 \dots 0,8$ .

### 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. – С. 30–34.

2. Разработка газотурбинной установки для утилизации нефтяного газа с выработкой электрической и тепловой энергии на малодобитных месторождениях / О.А. Зуева, Н.Л. Бачев, Р.В. Бульбович, А.М. Клещевников // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 1084. – С. 98–101.

3. Выбор геометрических и режимных параметров камеры сгорания для утилизации попутного нефтяного газа / О.А. Зуева, Н.Л. Бачев, Р.В. Бульбович, А.М. Клещевников // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2013. – № 34. – С. 40–51.

4. Теплообмен в камере сгорания для утилизации попутного нефтяного газа / О.А. Зуева, Н.Л. Бачев, Р.В. Бульбович, А.М. Клещевников // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2013. – № 34. – С. 52–63.

5. 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.

6. Померанцев В.В., Арефьев К.М., Адмедов Д.Б. Основы практической теории горения. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.

7. Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства. – М.: Энергия, 1976. – 487 с.

8. Розловский А.И. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. – М.: Химия, 1980. – 324 с.

9. Блинов Е.А. Топливо и теория горения. – СПб.: Изд-во Сев.-Зап. техн. ун-та, 2007. – 119 с.

### References

1. Zueva O.A., Bachev N.L., Bulbovich R.V., Kleshchevnikov A.M. Sposoby uvelicheniya resursa raboty mikrogazoturbinnogo energeticheskogo agregata pri utilizatsii poputnogo neftyanogo gaza [Ways of increasing the resource of microgasturbine energy unit with associated petroleum gas utilization]. *Gazovaya promyshlennost*, 2013, no. 692, pp. 30-34.

2. Zueva O.A., Bachev N.L., Bulbovich R.V., Kleshchevnikov A.M. Razrabotka gazoturbinooy ustanovki dlya utilizatsii neftyanogo gaza s vyrobotkoy elektricheskoy i teplovoy 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.

3. Zueva O.A., Bachev N.L., Bulbovich R.V., Kleshchevnikov A.M. Vybor geometricheskikh i rezhimnykh parametrov kamery sgoraniya dlya utilizatsii poputnogo neftyanogo gaza [Choice of geometrical and regime parameters of the combustion chamber for utilization of associated petroleum gas]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2013, no. 34, pp. 40-51.

4. Zueva O.A., Bachev N.L., Bulbovich R.V., Kleshchevnikov A.M. Teploobmen v kamere sgoraniya dlya utilizatsii poputnogo neftyanogo gaza [Heat exchange in combustion chamber for utilization of associated petroleum gas]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2013, no. 34, pp. 52-63.

5. Zueva O.A., Bachev N.L., Bulbovich R.V., Kleshchevnikov A.M. Vybor geometricheskikh, rezhimnykh i teplovykh parametrov vysokoresursnoy kamery sgoraniya dlya utilizatsii PNG [The choice of geometric, operational and thermal parameters of high-resource combustion chambers for utilization of the associated petroleum gas]. *Gazovaya promyshlennost*, 2013, no. 698, pp. 94-97.

6. Pomerantsev V.V., Arefev K.M., Admedov D.B. Osnovy prakticheskoy teorii goreniya [Basics of practical combustion theory]. Leningrad: Energoatomizdat, 1986. 312 p.

7. Khzmalyan D.M., Kagan Ya.A. Teoriya goreniya i topochnye ustroystva [Theory of combustion and combustion devices]. Moscow: Energiya, 1976. 487 p.

8. Rozlovskiy A.I. Osnovy tekhniki vzryvobezopasnosti pri rabote s goryuchimi gazami i parami [The basics of explosion protection when working with flammable gases and vapors]. Moscow: Khimiya, 1980. 324 p.

9. Blinov E.A. Toplivo i teoriya goreniya [Fuel and combustion theory]. Saint Petersburg: Severo-zapadnyy tekhnicheskii universitet, 2007. 119 p.

Получено 10.03.2014

### **Об авторах**

**Зуева Оксана Андреевна** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: oksanochka\_zueva@mail.ru).

### **About the authors**

**Zueva Oksana Andreevna** (Perm, Russian Federation) – Doctoral 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: oksanochka\_zueva@mail.ru).