

УДК 621.122

О.А. Зуева, Р.В. Бульбович, Н.Ю. Бачева

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

**РАСЧЕТ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ
И КОРРОЗИОННО-AКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ СЖИГАНИИ
СЕРОСОДЕРЖАЩЕГО ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА
В МИКРОГАЗОТУРБИННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ АГРЕГАТАХ**

С целью уменьшения выбросов загрязняющих и коррозионно-активных веществ и получения электроэнергии при утилизации попутного нефтяного газа (ПНГ) рассматривается его использование в качестве горючего для микрогазотурбинного энергетического агрегата (МГТЭА). Еще на стадии проектирования необходимо предусмотреть влияние способов организации рабочего процесса в камере сгорания (КС) на уровень выбросов, а также использование соответствующих конструкционных материалов для увеличения ресурса работы МГТЭА. Приведены результаты исследования экологических показателей МГТЭА при различных условиях сжигания ПНГ.

Ключевые слова: параметры МГТЭА, ПНГ, загрязняющие и коррозионно-активные вещества, концентрация, выбросы.

O.A. Zueva, R.V. Bulbovich, N.Yu. Bacheva

Perm National Research Polytechnic University

**THE CALCULATION OF THE CONTAMINATED AND CORROSIVE
SUBSTANCES EMISSION DURING COMBUSTION
OF SULPHUR-CONTAINING ASSOCIATED PETROLEUM GAS
IN THE MICROGASTURBINE UNITS**

It is considered the application of associated petroleum gas in the utilization as the microgasturbine unit fuel to decrease the contaminated and corrosive substances emission and to generate electric power. Even at the planning stage it is necessary to provide for the influence of the organizing the working process in the combustion chamber on the level of emissions, as well as the use of appropriate construction materials for increase the working resource of microgasturbine unit. The investigation results of the microgasturbine unit ecological parameters in different conditions of combustion are presented.

Keywords: microgasturbine unit parameters, associated petroleum gas, contaminated and corrosive substances, concentration, emissions.

Современный микрогазотурбинный энергетический агрегат (МГТЭА) состоит из турбокомпрессора с электрогенератором, малоэмиссионной КС, рекуператора, топливной системы с дожимным компрессором, системы управления и запуска турбогенератора.

При сжигании ПНГ в КС МГТЭА образуются следующие загрязняющие и коррозионно-активные вещества: окись углерода CO , оксиды серы SO_x ($\text{SO}_2 + \text{SO}_3$), оксиды азота NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$), полициклические углеводороды (главным образом бензапирен $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$).

Расчет и сравнение выбросов загрязняющих и коррозионно-активных веществ проведены при различных условиях сжигания ПНГ в КС МГТЭА 1-го и 2-го поколений, режимные параметры которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры МГТЭА 1-го и 2-го поколений

Название параметра	Величина	
	МГТЭА 1-го поколения	МГТЭА 2-го поколения
Температура в КС $T_{\text{к}}$, К $^{\circ}\text{C}$	1223	1553
	950	1280
Коэффициент избытка окислителя α	16,5	7,5
Массовый расход горючего $G_{\text{гор}}$, кг/с	0,007	0,004
Объемный расход горючего $Q_{\text{гор}}$, $\text{нм}^3/\text{с}$	0,004	0,002
Содержание свободного кислорода в ПС σ_{O_2} , %	20,2	18,6
Объемный расход «сухих» ПС $Q_{\text{сух}}$, $\text{нм}^3/\text{с}$	0,423	0,167
Объемный расход «влажных» ПС $Q_{\text{вл}}$, $\text{нм}^3/\text{с}$	0,433	0,177
Температура воздуха на входе в КС $T_{\text{ок.вх}}$, К $^{\circ}\text{C}$	927	1110
	645	837

Методика расчета экологических показателей МГТЭА

Количество молей компонента i , образуемого на моль топливного газа, стехиометрически сжигаемого с воздухом,

$$n_i = \sum_{j=1}^N n_{\text{ист}} \sigma_{V_j}, \quad (1)$$

где N – количество компонентов в составе ПНГ; σ_{V_j} – объемная доля j -го компонента в составе ПНГ; n_{ict} – количество молей компонента i , образуемого на моль компонента j , стехиометрически сжигаемого с воздухом; $i = (\text{CO}_2; \text{H}_2\text{O}; \text{SO}_2)$.

Объемный расход компонента i , образующегося при стехиометрическом сжигании ПНГ с воздухом,

$$Q_{ict} = \frac{G_{гор} n_i \mu_i}{\mu_{гор} \rho_i}, \quad (2)$$

где $G_{гор}$ – массовый расход топливного газа; μ_i и $\mu_{гор}$ – молярная масса компонента i и топливного газа соответственно; ρ_i – плотность компонента i .

Молярный расход кислорода O_2 при стехиометрическом сжигании топливного газа с воздухом

$$M_{\text{O}_2\text{ст}} = \frac{G_{гор}}{\mu_{гор}} n_{\text{O}_2\text{ст}}, \quad (3)$$

где $n_{\text{O}_2\text{ст}}$ – количество молей O_2 , необходимого для стехиометрического сжигания 1 моля топливного газа.

Массовый расход кислорода O_2 при стехиометрическом сжигании топливного газа с воздухом

$$G_{\text{O}_2\text{ст}} = M_{\text{O}_2\text{ст}} \mu_{\text{O}_2}, \quad (4)$$

где μ_{O_2} – молярная масса кислорода O_2 .

Количество молей «свободного» кислорода O_2 , содержащегося в отработанном газе, в расчете на моль топливного газа

$$n_{\text{O}_2\text{св}} = \frac{\alpha M_0 K_{0\text{ок}}}{2}, \quad (5)$$

где α – коэффициент избытка окислителя; M_0 – молярное стехиометрическое соотношение; $K_{0\text{ок}}$ – количество атомов кислорода в условной молекулярной формуле воздуха.

Объемная доля «свободного» кислорода O_2 в составе отработанных газов

$$\sigma_{VO_2cb} = \frac{n_{O_2cb}}{1 + \alpha M_0}. \quad (6)$$

Массовый расход воздуха при коэффициенте избытка окислителя α

$$G_{ок} = \alpha K_{m0} G_{гор}, \quad (7)$$

где K_{m0} – массовое стехиометрическое соотношение топливного газа и воздуха.

Объемный расход азота N_2 в составе отработанного газа

$$Q_{N_2} = \frac{\left(\frac{G_{гор}}{\mu_{гор}} \sigma_{VN_2гор} + \frac{G_{ок}}{\mu_{ок}} \sigma_{VN_2ок} \right)}{\rho_{N_2}}, \quad (8)$$

где $\mu_{ок}$ – молярная масса воздуха; ρ_{N_2} – плотность азота N_2 ; $\sigma_{VN_2гор}$, $\sigma_{VN_2ок}$ – объемное содержание азота N_2 в топливном газе и воздухе соответственно.

Объемный расход свободного кислорода O_2 в составе отработанного газа

$$Q_{O_2} = \frac{\left(\frac{G_{ок}}{\mu_{ок}} \sigma_{VO_2ок} \mu_{O_2} - G_{O_2ст} \right)}{\rho_{O_2}}, \quad (9)$$

где $\sigma_{VO_2ок}$ – объемное содержание кислорода O_2 в составе воздуха; ρ_{O_2} – плотность кислорода O_2 .

Объемный расход «сухого» отработанного газа

$$Q_{сух} = Q_{CO_2ст} + Q_{SO_2ст} + Q_{N_2} + Q_{O_2}. \quad (10)$$

Объемный расход «влажного» отработанного газа

$$Q_{вл} = Q_{сух} + Q_{H_2Oст}. \quad (11)$$

Процесс накопления оксидов углерода СО при сжигании топлива происходит на начальном участке факела. Оксид углерода окажется в продуктах сгорания лишь в том случае, если в КС не будут созданы условия для его окисления до двуокиси углерода CO_2 .

Концентрация СО в составе ПС определяется по эмпирическому соотношению [1] (г/м³)

$$C_{\text{CO}} = q_3 R Q_{\text{HV}}, \quad (12)$$

где q_3 – потери теплоты вследствие химической неполноты сгорания, %; R – доля тепла с уходящими ПС, обусловленная наличием СО; Q_{HV} – объемная низшая теплота сгорания, МДж/м³.

При сжигании всех видов топлив в условиях высоких температур образуются оксиды азота NO_x в виде N_2O , NO , NO_2 . Гемоксид азота N_2O образуется в начальном участке факела, а затем окисляется до оксида азота NO , т.е. не выбрасывается в атмосферу с продуктами сгорания. В КС образуются преимущественно оксиды азота NO в количестве 95–98 % от NO_x . При движении по газовому тракту соотношение NO_x не изменяется, но при выбросе в атмосферу около 80 % NO превращается в более токсичный NO_2 . Концентрация NO_x в составе ПС определяется по эмпирическому соотношению [3] (г/м³)

$$C_{\text{NO}_x} = \frac{10^9}{Q_{\text{сух}}} Q_{\text{гор}} Q_{\text{HV}} K_{\text{NO}_x} \beta_K \beta_t \beta_\alpha (1 - \beta_p)(1 - \beta_\delta), \quad (13)$$

где $Q_{\text{гор}}$ – объемный расход топливного газа, м³/с; Q_{HV} – объемная низшая теплота сгорания, МДж/м³; $Q_{\text{сух}}$ – объемный расход «сухих» ПС, м³/с; K_{NO_x} – коэффициент удельного выброса NO_x , г/МДж. Коэффициенты β_K , β_t , β_α , β_p , β_δ учитывают особенности подачи топливного газа через форсунки, температуру воздуха на входе в КС, влияние избытка воздуха, рециркуляцию ПС в КС, ступенчатый подвод воздуха в КС соответственно и определены по рекомендациям [2].

При неполном сжигании топлив образуются несгоревшие углеводороды различных классов. Наибольшую экологическую опасность представляет бензапирен $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$. Концентрация бензапирена в составе ПС определяется по эмпирической зависимости [3] (мг/м³)

$$C_{\text{бп}} = 0,001 \frac{0,032 + 0,043 q_V}{e^{1,14(\alpha-1)}} K_D K_p K_{\text{ст}}, \quad (14)$$

где q_V – теплонапряженность КС, МВт/м³; коэффициенты K_D , K_p , $K_{ст}$ учитывают влияние нагрузки КС, рециркуляции ПС и ступенчатого сжигания соответственно и определены по эмпирическим данным [3].

Фактические выбросы CO, NO_x, C₂₀H₁₂ определены следующим образом:

$$\begin{aligned} G_{CO} &= C_{CO} Q_{сyx}; \\ G_{NO_x} &= C_{NO_x} Q_{сyx}; \\ G_{C_{20}H_{12}} &= C_{C_{20}H_{12}} Q_{сyx}. \end{aligned} \quad (15)$$

При сжигании серосодержащих топлив соединения серы образуются в виде сернистого ангидрида SO₂, серного ангидрида SO₃ и паров серной кислоты H₂SO₄. Оксиды серы объединяются в группу SO_x. В КС образуется преимущественно SO₂. Количество SO₂ составляет 98–99 % от SO_x, а SO₃ – всего 1–2 % от SO_x. Газообразный SO₃ при движении по газовому тракту в присутствии водяных паров H₂O образует пары серной кислоты H₂SO₄. Наиболее токсичным и коррозионно-активным из сернистых соединений является диоксид серы SO₂, выбросы и концентрация которого в составе ПС определяются по соотношениям

$$\begin{aligned} G_{SO_2} &= \frac{G_{гор} \sigma_{V_S} \mu_{SO_2}}{\mu_{гор}}; \\ C_{SO_2} &= \frac{G_{SO_2}}{Q_{сyx}}. \end{aligned} \quad (16)$$

где σ_{V_S} – объемное содержание серы в составе топливного газа; μ_{SO_2} – молярная масса диоксида серы SO₂.

Физические свойства окислителя и горючего

В качестве горючего рассматривается серосодержащий попутный нефтяной газ, который имеет различный компонентный состав в зависимости от месторождения. Более того, на одном и том же месторождении состав ПНГ является различным в разные периоды времени. Примерный компонентный состав ПНГ и свойства компонентов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Состав и свойства компонентов ПНГ

№ п/п	Название компонента	Химическая формула	σ_v	μ , кг/кмоль	ρ , кг/м ³	H , кДж/моль	σ_m
1	Азот	N ₂	0,018	28,016	1,250	0	0,013
2	Двуокись углерода	CO ₂	0,018	44,011	1,977	0	0,021
3	Метан	CH ₄	0,42	16,043	0,718	802,82	0,174
4	Этан	C ₂ H ₆	0,15	30,070	1,355	1429,12	0,117
5	Изопропан	iC ₃ H ₈	0,05	44,097	2,011	2043,71	0,058
6	Пропан	C ₃ H ₈	0,11	44,097	2,011	2043,71	0,128
7	Изобутан	iC ₄ H ₁₀	0,03	58,124	2,697	2658,45	0,047
8	Бутан	C ₄ H ₁₀	0,06	58,124	2,706	2658,45	0,094
9	Изопентан	iC ₅ H ₁₂	0,03	72,151	3,426	3272,45	0,059
10	Пентан	C ₅ H ₁₂	0,018	72,151	3,452	3272,45	0,036
11	Гексаны и выше	C ₆ H ₁₄	0,06	86,177	4,290	3887,71	0,148
12	2-метилпен- тан	C ₅ H ₁₀ (CH ₃) ₂	0,01	86,177	3,842	3880,09	0,022
13	3-метилпен- тан	C ₅ H ₉ (CH ₃) ₃	0,01	86,177	3,842	3882,72	0,022
14	Сероводород	iC ₅ H ₁₂	0,07	34,082	1,535	517,87	0,062

Примечание. σ_m – массовая доля компонента в составе ПНГ; H – молярная низшая теплота сгорания компонента.

В процессе проведения термохимических расчетов определены физические свойства горючего: $\mu_{гор} = 37,575$ кг/кмоль; $\rho_{гор} = 1,735$ кг/м³; $Q_{н.м} = 1,622$ МДж/моль; $Q_{нт} = 43,2$ МДж/кг; $Q_{нV} = 74,9$ МДж/м³. Также получена условная химическая формула C_{2,307}H_{6,5777}S_{0,0683}N_{0,035}O_{0,035}.

В качестве окислителя рассматривается воздух с влажностью 60 %, состав и свойства компонентов которого приведены в табл. 3.

Таблица 3

Состав и свойства компонентов воздуха

Название компонента	Химическая формула	σ_v	ρ , кг/м ³	μ , кг/кмоль
Кислород	O ₂	0,238	1,429	32,000
Азот	N ₂	0,761	1,250	28,016
Водород	H ₂	0,001	2,016	2,000

В процессе проведения термохимических расчетов определены физические свойства окислителя: $\rho_{\text{ок}} = 1,735 \text{ кг/м}^3$; $\mu_{\text{ок}} = 37,575 \text{ кг/кмоль}$. Также получена условная химическая формула $\text{O}_{0,431}\text{N}_{1,572}\text{H}_{0,028}$.

Кроме того, определены молярное и массовое стехиометрические соотношения ПНГ и воздуха: $M_0 = 19,194$ и $K_{m0} = 14,779$.

Анализ полученных результатов. Рекомендации по улучшению экологических показателей МГТЭА

На рис. 1 представлены результаты расчетов концентраций и выбросов СО, полученных при $R = 0,01$.

Представленные на рис. 1 результаты позволяют сформулировать следующие выводы:

1) выбросы СО в МГТЭА 2-го поколения на 61 % меньше по сравнению с выбросами МГТЭА 1-го поколения из-за малых расходов топливного газа;

2) прогнозируемые величины концентрации и выбросов СО согласуются с нормативными данными (для новых газовых турбин $C_{\text{СО}} = 5 \dots 100 \text{ мг/м}^3$) [4];

3) содержание СО у газопоршневых установок находится на уровне $600\text{--}630 \text{ мг/м}^3$, что больше в 4–5 раз по сравнению с МГТЭА 1-го и 2-го поколений;

4) концентрация СО в составе ПС зависит от неполноты сгорания топливного газа. При общем избытке O₂ при некачественной подготовке топливовоздушной смеси могут создаваться микрозоны с дефицитом O₂.

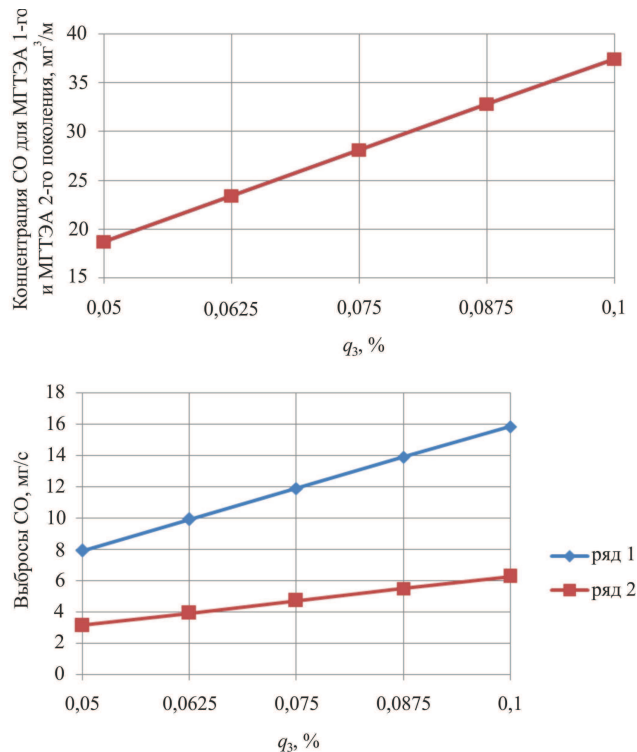


Рис. 1. Концентрации и выбросы СО в МГТЭА 1-го и 2-го поколений:
 ряд 1 – МГТЭА 1-го поколения; ряд 2 – МГТЭА 2-го поколения;
 q_3 – химическая неполнота сгорания

Неполнота сгорания топливного газа может быть уменьшена интенсификацией процесса смесеобразования путем турбулизации потока в зоне горения. Наиболее доступным методом турбулизации является внедрение струй топливного газа под углом к потоку воздуха.

Значения концентраций и выбросов NO_x получены при $K_{\text{NO}_x} = 0,068$ г/МДж; $\beta_K = 1$ (напорная форсунка); $\beta_\alpha = 1,225$; $\beta_t = 1 + 0,002(t_{\text{ок.вх}} - 30)$; $\beta_r = 0,16\sqrt{r}$; $\beta_\delta = 0,022\delta$. Результаты расчета концентраций и выбросов NO_x представлены на рис. 2.

Представленные на рис. 2 результаты позволяют сформулировать следующие выводы:

- 1) ступенчатый подвод воздуха в КС (20 % в первую зону) снижает концентрацию и выбросы NO_x на 44 %;
- 2) рециркуляция ПС в КС ($r=20$ %) снижает концентрацию выбросов NO_x на 72 %;

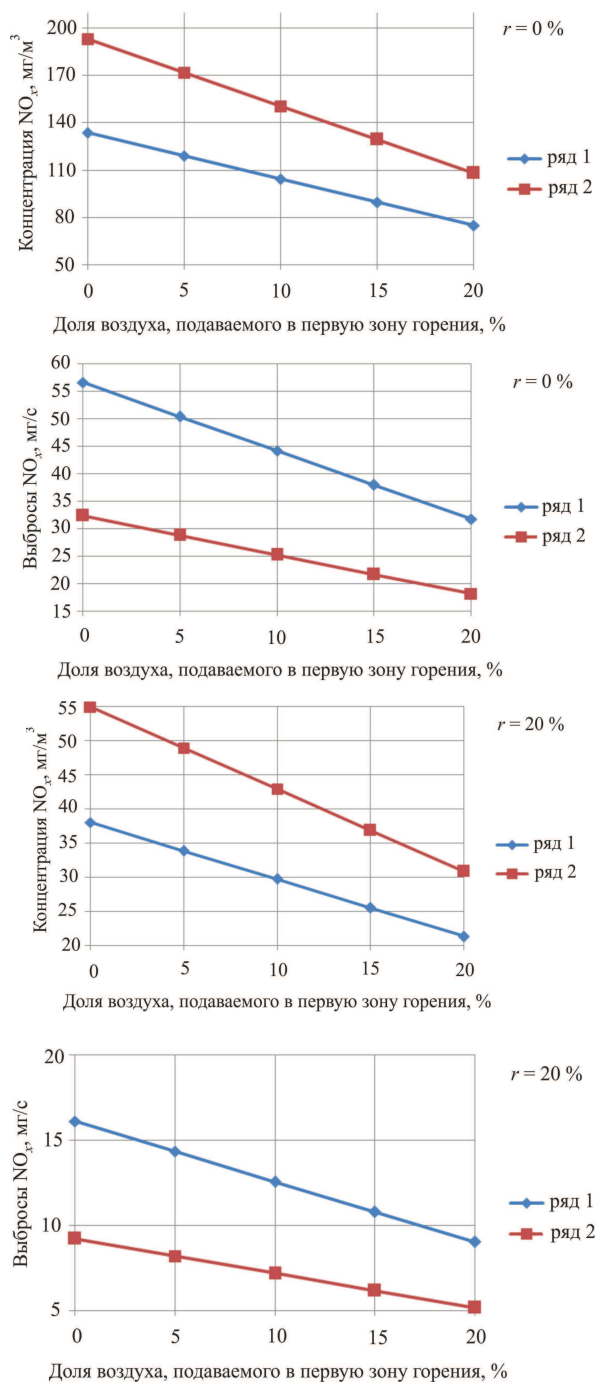


Рис. 2. Концентрации и выбросы NO_x в МГТЭА 1-го и 2-го поколений:
ряд 1 – МГТЭА 1-го поколения; ряд 2 – МГТЭА 2-го поколения; r –
степень рециркуляции

3) концентрация NO_x в МГТЭА 2-го поколения на 38 % больше по сравнению с МГТЭА 1-го поколения, однако выбросы NO_x на 36 % меньше из-за малых расходов топливного газа;

4) прогнозируемые величины концентрации и выбросов NO_x согласуются с нормативными данными (для новых газовых турбин $C_{\text{NO}_x} = 20 \dots 50 \text{ мг/м}^3$);

5) содержание NO_x у газопоршневых установок находится на уровне $250\text{--}500 \text{ мг/м}^3$, что в 3–4 раза больше, чем в МГТЭА 1-го и 2-го поколений.

Результаты расчета концентраций и выбросов бензапирена $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$ при $q_V = 15,3 \text{ МВт/м}^3$ представлены на рис. 3.

Представленные на рис. 3 результаты позволяют сформулировать следующие выводы:

1) ступенчатый ввод воздуха в КС (20 % в первую зону) увеличивает концентрацию и выбросы бензапирена на 58 %;

2) рециркуляция ПС в КС ($r = 20 \%$) увеличивает концентрацию и выбросы на 45 %;

3) концентрации и выбросы бензапирена в МГТЭА 2-го поколения в миллион раз выше по сравнению с МГТЭА 1-го поколения, однако в 100 раз меньше среднесуточной ПДК;

4) расчеты выбросов бензапирена при различных условиях показывают, что в приземном слое воздуха содержание бензапирена не превышает $0,05 \text{ ПДК}_{\text{СС}}$, поэтому выбросы бензапирена не подлежат учету и нормированию.

Концентрация и выбросы SO_x получены при $\sigma_{V_s} = 0,046$. Расчеты показали, что для МГТЭА 1-го поколения $C_{\text{SO}_x} = 1,429 \text{ г/м}^3$; $G_{\text{SO}_x} = 0,604 \text{ г/с}$, а для МГТЭА 2-го поколения $C_{\text{SO}_x} = 2,068 \text{ г/м}^3$; $G_{\text{SO}_x} = 0,345 \text{ г/с}$.

Нормативные данные по концентрации и выбросам SO_x в ГТУ отсутствуют. Известно, что для нового котельного оборудования в России допускается максимальная концентрация $C_{\text{SO}_x} = 700 \text{ мг/м}^3$. В Европейском Союзе приняты более жесткие нормы: $C_{\text{SO}_x} = 200 \dots 400 \text{ мг/м}^3$ (Directive 2001/80/EC).

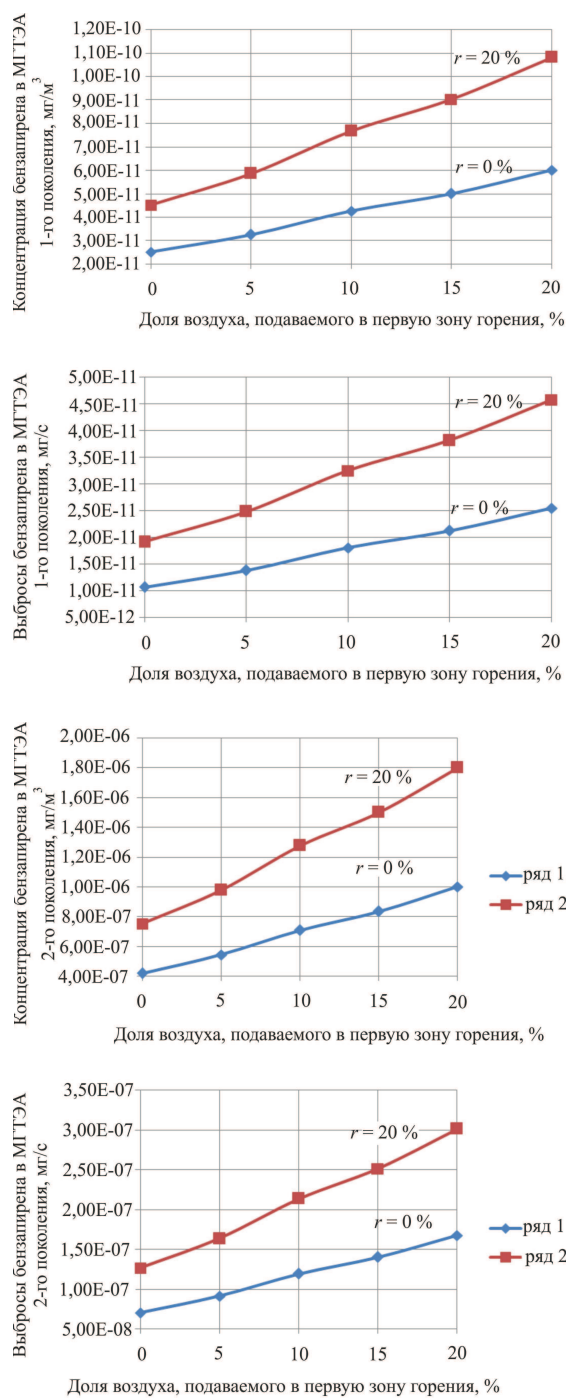


Рис. 3. Концентрации и выбросы бензапирена $C_{20}H_{12}$

Различные мероприятия по улучшению способов сжигания серо-содержащего ПНГ при заданном α не будут влиять на концентрацию и выбросы SO_x . Выбросы G_{SO_x} зависят от расхода топливного газа и количества H_2S в его составе, а концентрация C_{SO_x} – от выбросов G_{SO_x} и объемного расхода ПС $Q_{сух}$.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. При сжигании попутного нефтяного газа с содержанием сероводорода до 7 % меньшие выбросы загрязняющих веществ в атмосферу обеспечивают МГТЭА 2-го поколения. Все выбросы, за исключением оксидов серы SO_x , согласуются с нормами, утвержденными в РФ.

2. По концентрации коррозионно-активных веществ SO_x , от которых зависит ресурс работы МГТЭА, предпочтение имеют МГТЭА 1-го поколения.

3. Для уменьшения выбросов токсичных веществ в атмосферу (особенно SO_x) целесообразно применение устройств очистки или каталитических нейтрализаторов в потоке выхлопных газов.

4. Для увеличения ресурса работы МГТЭА при сжигании серосодержащего ПНГ необходимо использование материалов 15Х25Т для ненагруженных деталей и Х36Н40 для нагруженных деталей [5]. Срок службы этих материалов составит примерно 2–3 года при толщинах конструктивных элементов 2–3 мм.

5. С целью максимального снижения воздействия агрессивных ПС на элементы конструкции рекомендуется уделить пристальное внимание схеме МГТЭА с внешним сгоранием.

Библиографический список

1. Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива: справ. пособие. – Л.: Недра, 1987. – 336 с.
2. Ассад М. Продукты сжигания жидких и газообразных топлив: образование, расчет, эксперимент. – Минск: Изд-во Нац. акад. наук Беларуси, 2010. – 305 с.
3. Ахмедов Р.Б. Технология сжигания горючих газов и жидких топлив. – Л.: Недра, 1984. – 283 с.
4. ГОСТ 29328–92. Установки газотурбинные для привода турбогенераторов.

5. Воробьева Г.Я. Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств. – М.: Химия, 1975. – 816 с.

References

1. Isserlin A.S. *Osnovy szhiganiya gazovogo topliva: Spravochnoe posobie* [Fundamentals of gas fuel burning: reference book]. Leningrad: Nedra, 1987. 336 p.

2. Assad M. *Produkty szhiganiya zhidkikh i gazoobraznykh topliv: obrazovanie, raschet, eksperiment* [Products of liquid and gaseous fuels burning: formation, calculation, experiment]. Minsk, Natsionalnaya akademiya nauk Belorusi, 2010, 305 p.

3. Akhmedov R.B. *Tekhnologiya szhiganiya goryuchikh gazov i zhidkikh topliv* [The technology of combustion of combustible gases and liquid fuels]. Leningrad: Nedra, 1984, 283 p.

4. GOST 29328–92. *Ustanovki gazoturbinnye dlya privoda turbogeneratorov*. GOST 29328–92. Installation of gas turbine to drive turbine generators.

5. Vorobeва G.Ya. *Korroziionnaya stoykost materialov v agressivnykh sredakh khimicheskikh proizvodstv* [Corrosion stability of materials in hostile environment of chemical manufactures]. Moscow: Khimiya, 1975, 816 pp.

Об авторах

Зуева Оксана Андреевна (Пермь, Россия) – студентка кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: oksa-nochka_zueva@mail.ru).

Бульбович Роман Васильевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки», декан аэрокосмического факультета, ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: dekan_akf@pstu.ru).

Бачева Надежда Юрьевна (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Прикладная физика» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: bnl54@yandex.ru).

About the authors

Zueva Oksana Andreevna (Perm, Russian Federation) – Student Department of Rocket and Space Technology, Generating Units, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: oksanochka_zueva@mail.ru).

Bulbovich Roman Vasilyevich (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Rocket and Space Technology, Generating Units, Dean of Aerospace Faculty, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: dekan_akf@pstu.ru).

Bacheva Nadezhda Yuryevna (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Applied Physics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: bnl54@yandex.ru).

Получено 2.04.2012