DOI: 10.15593/2224-9982/2017.48.08

УДК 665.7.038.5

О.О. Матюнин, Н.Л. Бачев, Р.В. Бульбович, Н.Ю. Бачева

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНТИКОРРОЗИОННЫХ ПРИСАДОК ПРИ СЖИГАНИИ СЕРОСОДЕРЖАЩИХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ

При сжигании неочищенных серосодержащих углеводородных топлив возникает проблема газовой коррозии конструкционных материалов. Совместно с колебаниями коэффициента избытка воздуха и температуры продуктов сгорания в реальных условиях эксплуатации это может вызвать аварийный выход дорогостоящей установки из строя. В данной работе предлагается без изменения конструкции установки осуществлять впрыск антикоррозионных присадок в магистраль топливного газа. Получены и проанализированы параметры и составы продуктов сгорания (ПС) топливной пары «воздух + углеводородный газ сложного состава» без присадок и с использованием присадок типа анилин, триметиламин и диэтиламин. Показано, что концентрация коррозионно-активных веществ в составе ПС может быть уменьшена на 10–15 %. Для получения качественной топливной смеси «воздух + углеводородный газ + топливная присадка» необходимо подавать присадку в парообразном виде.

Ключевые слова: углеводородный газ сложного состава, сжигание, ресурс работы, антикоррозионные присадки, смеси, условная химическая формула, состав продуктов сгорания.

O.O. Matyunin, N.L. Bachev, R.V. Bulbovich, N.Yu. Bacheva

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

THE USE OF ANTI-CORROSION ADDITIVES DURING SULFUR-CONTAINING HYDROCARBON GASES COMBUSTION

A problem of gaseous corrosion of structural materials occurs during the combustion of raw sulfur-containing gases. Coupled with the fluctuations of excess air ratio and combustion temperature it can lead to accidental failure of expensive equipment. In this paper, it is suggested to inject anti-corrosion additives in the fuel gas without change of equipment design. Combustion products parameters and compositions of fuel “air + hydrocarbon gas with complex composition” without additives and with such additives as aniline, trimethylamine and diethylamine are obtained and analyzed. It is shown that the concentration of corrosive substances in the combustion products may be reduced by 10-15%. It is also shown, that to obtain high-quality fuel mixture “air + hydrocarbon gas + fuel additive” it is necessary to inject the additive in the gas phase.

Keywords: complex hydrocarbon gases, combustion, operational life, anti-corrosion additives, mixtures, conditional chemical formula, combustion product composition.

Введение

Для увеличения ресурса работы [1, 2] и снижения коррозионного уноса конструкционных элементов при воздействии коррозионно-активных веществ [3–5] предлагается использование антикоррозионных присадок при сжигании сложных по составу углеводородных газов путем их впрыска в паровой фазе в магистраль горючего.

Ингибиторы коррозии могут функционировать по одному из следующих механизмов [6]: образование защитной пленки на поверхности конструкционного материала; нейтрализация коррозионно-активных соединений, содержащихся в топливе или образующихся в процессе его горения.

Информационно-аналитический обзор [7] показал, что для увеличения ресурса работы камер сгорания целесообразно использовать присадки, характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Эксплуатационные и стоимостные характеристики антикоррозионных присадок

Название	Агрегатное состояние при НУ	Стоимость, руб./кг	Химическая формула	Плотность, кг/м ³	Температура застывания, °С	Температура кипения, °С
Анилин	Жидкость	628–1000	C ₆ H ₇ N	1039	6	184
Триметиламин	Газ	217	C ₃ H ₉ N	632	–117	3
Хинолин	Жидкость	621	C ₉ H ₇ N	1093	–15	238
Морфолин	Жидкость	340	C ₄ H ₉ NO	1007	–5	129
Диэтиламин	Жидкость	217	C ₄ H ₁₁ N	710	–48	56

Модель термохимических расчетов

Для определения состава и термодинамических параметров горения с использованием программы АСТРА 4 [8] требуется предварительное определение условных химических формул и энтальпий окислителя и горючего с учетом параметров подачи в КС. С этой целью разработан следующий алгоритм термохимических расчетов.

1. Определение показателей компонентов смеси.

1.1. Молярная масса j -го компонента в смеси

$$M_j = \sum_{i=1}^N A_i Z_i,$$

где A_i , Z_i – атомная масса и количество атомов i -го элемента; N – количество элементов в j -м компоненте.

1.2. Массовая доля i -го элемента в j -м компоненте

$$g_{ij} = \frac{A_i Z_i}{M_j}.$$

1.3. Энтальпия j -го компонента смеси на входе в КС

$$dh_0 = dh_0^{298} + \bar{c}_p (T_{\text{вх}} - 298) + \frac{P_{\text{вх}} - 101325}{\bar{p}},$$

где dh_0^{298} – энтальпия образования j -го компонента при $T_0 = 298$ К и $P_0 = 101325$ Па [9].

1.4. Средняя удельная изобарная теплоемкость j -го компонента

$$\bar{c}_p = \frac{c_p(T_{\text{вх}}, P_{\text{вх}}) + c_p(T_0, P_0)}{2}.$$

1.5. Средняя плотность j -го компонента [10, 11]

$$\bar{\rho} = \frac{\rho(T_{\text{вх}}, P_{\text{вх}}) + \rho(T_0, P_0)}{2}.$$

2. Определение показателей сухой смеси.

2.1. Молярная масса сухой смеси

$$M_{\text{сух}} = \sum_{j=1}^K M_j \sigma_j,$$

где σ_j – объемная доля j -го компонента в сухой смеси; K – количество компонентов в сухой смеси.

2.2. Массовая доля j -го компонента в сухой смеси

$$g_j = \frac{M_j}{M_{\text{сух}}} \sigma_j.$$

2.3. Массовое содержание i -го химического элемента в сухой смеси

$$g_i = \sum_{j=1}^K g_{ij} g_j.$$

2.4. Количество атомов i -го элемента в условной химической формуле сухой смеси [12]

$$Z_i = g_i \frac{M_{\text{сух}}}{A_i}.$$

2.5. Энтальпия сухой смеси на входе в КС

$$dh = \sum_{j=1}^K dh_j g_j.$$

2.6. Удельная изобарная теплоемкость сухой смеси на входе в КС

$$c_p = \sum_{j=1}^K c_{pj} g_j.$$

2.7. Плотность сухой смеси на входе в КС

$$\rho = \sum_{j=1}^K \rho_j \sigma_j.$$

3. Определение показателей водяного пара.

3.1. Давление насыщенных паров [13]

$$P_s = 611,21 \cdot \exp \left(\frac{\left(18,678 - \frac{t}{234,5} \right) t}{257,14 + t} \right),$$

где t – температура пара, °С.

3.2. Плотность насыщенного пара

$$\rho_s = \frac{P_s M}{R_0 T},$$

где M , T – молярная масса и температура пара; R_0 – универсальная газовая постоянная.

3.3. Плотность водяного пара

$$\rho = \phi \rho_s,$$

где ϕ – относительная влажность.

4. Определение показателей влажной смеси.

4.1. Влагосодержание d_n . Влагосодержание представляет собой отношение массы водяных паров к массе сухого газа [14, 15]:

$$d_n = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{сух}}}.$$

Массы водяного пара и сухого газа можно представить в виде

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = g_{\text{H}_2\text{O}} m_{\text{см}},$$

$$m_{\text{сух}} = g_{\text{сух}} m_{\text{см}},$$

где $m_{\text{см}}$ – масса влажной смеси.

Массовая доля водяного пара во влажной смеси

$$g_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{см}}} \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{см}}},$$

где $P_{\text{H}_2\text{O}}$, $M_{\text{H}_2\text{O}}$ – парциальное давление и молярная масса водяных паров; $P_{\text{см}}$, $M_{\text{см}}$ – давление и молярная масса влажной смеси.

Массовая доля сухого газа

$$g_{\text{сух}} = \frac{P_{\text{сух}}}{P_{\text{см}}} \frac{M_{\text{сух}}}{M_{\text{см}}},$$

где $P_{\text{сух}}$, $M_{\text{сух}}$ – парциальное давление и молярная масса сухого газа.

Следовательно, влагосодержание

$$d_n = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{сух}}} \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{сух}}} \frac{m_{\text{см}}}{m_{\text{см}}} = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{сух}}} \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{см}} - P_{\text{H}_2\text{O}}}.$$

Относительная влажность

$$\varphi = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{нас}}},$$

где $P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{нас}}$ – давление насыщенных паров водяного пара при температуре $T_{\text{см}}$.

Окончательно получаем расчетную формулу для определения влагосодержания:

$$d_n = \frac{\varphi P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{нас}}}{P_{\text{см}} - \varphi P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{нас}}} \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{сух}}}.$$

4.2. Массовая доля сухого газа во влажной смеси

$$g_{\text{сух}} = \frac{1}{1 + d_n}.$$

4.3. Массовая доля водяного пара во влажной смеси

$$g_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{d_n}{1 + d_n}.$$

4.4. Объемная доля сухого газа во влажной смеси

$$\sigma_{\text{сух}} = \frac{P_{\text{сух}}}{P_{\text{см}}} = \frac{P_{\text{см}} - \varphi P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{нас}}}{P_{\text{см}}}.$$

4.5. Объемная доля водяного пара во влажной смеси

$$\sigma_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{см}}} = \frac{\varphi P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{нас}}}{P_{\text{см}}}.$$

4.6. Молярная масса влажной смеси

$$M_{\text{см}} = \sigma_{\text{сух}} M_{\text{сух}} + \sigma_{\text{H}_2\text{O}} M_{\text{H}_2\text{O}}.$$

4.7. Массовая доля i -го элемента во влажной смеси

$$g_i = g_{\text{сух}} g_i^{\text{сух}} + g_{\text{H}_2\text{O}} g_i^{\text{H}_2\text{O}}.$$

4.8. Количество атомов i -го элемента в условной химической формуле влажной смеси

$$Z_i = g_i \frac{M_{\text{см}}}{A_i}.$$

5. Определение показателей топливного газа (ТГ) с учетом антикоррозионных присадок (ПР).

5.1. Молярная масса композиции «топливный газ + присадка»

$$M = M_{\text{т.г}} \sigma_{\text{т.г}} + M_{\text{пр}} \sigma_{\text{пр}},$$

где $\sigma_{\text{т.г}}$, $\sigma_{\text{пр}}$ – объемные доли влажного топливного газа и присадки; $M_{\text{т.г}}$, $M_{\text{пр}}$ – молярные массы влажного топливного газа и присадки.

5.2. Массовая доля влажного топливного газа

$$g_{\text{т.г}} = \frac{M_{\text{т.г}}}{M} \sigma_{\text{т.г}}.$$

5.3. Массовая доля присадки в топливном газе

$$g_{\text{пр}} = \frac{M_{\text{пр}}}{M} \sigma_{\text{пр}}.$$

5.4. Массовое содержание i -го химического элемента в топливном газе

$$g_i = g_{\text{т.г}} g_i^{\text{т.г}} + g_{\text{пр}} g_i^{\text{пр}}.$$

5.5. Количество атомов i -го элемента в условной химической формуле топливного газа

$$Z_i = g_i \frac{M}{A_i}.$$

Результаты терморасчетов и их анализ

С помощью разработанной модели были получены условные химические формулы и энтальпии окислителя (воздух влажностью 60 %) и топливных композиций (топливный газ влажностью 45 % + антикоррозионные присадки). Параметры горения и составы ПС при использовании антикоррозионных присадок получены при следующих условиях: параметры окислителя приведены в табл. 2, параметры топливных композиций приведены в табл. 3.

Таблица 2

Параметры влажного воздуха*

Параметр	Размерность	Значение
Давление на входе в КС	МПа	0,3
Температура на входе в КС	К	394
Энтальпия на входе	кДж/кг	207,3

* Условная химическая формула $\text{C}_{0,0003}\text{H}_{0,0202}\text{O}_{0,4254}\text{N}_{1,5459}\text{Ar}_{0,0092}$

Таблица 3

Параметры топливных композиций*

Топливная композиция	Условная химическая формула	Энтальпия на входе в КС, кДж/кг
100 % ТГ (топливный газ)	$C_{1,4072}H_{4,0372}O_{0,0272}N_{0,7253}He_{0,0001}S_{0,0066}$	-1904,9
99 % ТГ + 1 % анилин	$C_{1,4531}H_{4,0668}O_{0,0270}N_{0,7280}He_{0,0001}S_{0,0065}$	-1841,6
97 % ТГ + 3 % анилин	$C_{1,5450}H_{4,1261}O_{0,0264}N_{0,7335}He_{0,0001}S_{0,0064}$	-1721,8
95 % ТГ + 5 % анилин	$C_{1,6368}H_{4,1853}O_{0,0259}N_{0,7390}He_{0,0001}S_{0,0063}$	-1610,5
99 % ТГ + 1 % диэтиламин	$C_{1,4331}H_{4,1068}O_{0,0270}N_{0,7280}He_{0,0001}S_{0,0065}$	-1894,4
97 % ТГ + 3 % диэтиламин	$C_{1,4850}H_{4,2461}O_{0,0264}N_{0,7335}He_{0,0001}S_{0,0064}$	-1874,1
95 % ТГ + 5 % диэтиламин	$C_{1,5368}H_{4,3853}O_{0,0259}N_{0,7390}He_{0,0001}S_{0,0063}$	-1854,8
99 % ТГ + 1 % триметиламин	$C_{1,4231}H_{4,0868}O_{0,0270}N_{0,7280}He_{0,0001}S_{0,0065}$	-1883,7
97 % ТГ + 3 % триметиламин	$C_{1,4550}H_{4,1861}O_{0,0264}N_{0,7335}He_{0,0001}S_{0,0064}$	-1842,2
95 % ТГ + 5 % триметиламин	$C_{1,4868}H_{4,2853}O_{0,0259}N_{0,7390}He_{0,0001}S_{0,0063}$	-1802,1

* Давление на входе в КС 0,3 МПа; температура на входе в КС 288 К.

В табл. 4 приведены значения температуры горения топливных композиций «ТГ + анилин» при различных значениях коэффициента избытка воздуха α .

Таблица 4

Температуры горения топливных композиций «ТГ + анилин», К

α	100 % ТГ	99 % ТГ + 1 % анилин	97 % ТГ + 3 % анилин	95 % ТГ + 5 % анилин
0,6	1950,0	1950,0	1960,4	1967,7
0,8	2260,0	2260,0	2269,2	2276,5
1,0	2370,0	2370,0	2372,7	2377,2
3,0	1370,0	1370,0	1370,3	1372,1
5,0	1080,0	1080,0	1083,1	1084,1

В табл. 5 приведены значения температуры горения топливных композиций «ТГ + диэтиламин» при различных значениях коэффициента избытка воздуха α , в табл. 6 – значения температуры горения топливных композиций «ТГ + триметиламин» при различных значениях коэффициента избытка воздуха α .

Таблица 5

Температуры горения топливных композиций «ТГ + диэтиламин», К

α	100 % ТГ	99 % ТГ + 1 % диэтиламин	97 % ТГ + 3 % диэтиламин	95 % ТГ + 5 % диэтиламин
0,6	1950,0	1950,0	1954,2	1957,7
0,8	2260,0	2260,0	2262,2	2265,3
1,0	2370,0	2370,0	2368,4	2370,3
3,0	1370,0	1370,0	1368,7	1369,5
5,0	1080,0	1080,0	1082,2	1082,7

Таблица 6

Температуры горения топливных композиций «ТГ + триметиламин», К

α	100 % ТГ	99 % ТГ + 1 % триметиламин	97 % ТГ + 3 % триметиламин	95 % ТГ + 5 % триметиламин
0,6	1950,0	1950,0	1955,9	1960,6
0,8	2260,0	2260,0	2263,2	2266,9
1,0	2370,0	2370,0	2368,8	2371,1
3,0	1370,0	1370,0	1369,2	1370,5
5,0	1080,0	1080,0	1082,7	1083,5

Анализ данных, представленных в табл. 4–6, показывает, что включение добавок в количестве до 1 об. % не влияет на температуру горения топливной композиции. Максимальное изменение температуры составляет 0,9 % для топливной композиции «95 % ТГ + 5 % анилин»

Рис. Средняя зависимость $T(\alpha)$ для исследованных топливных композиций

при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 0,6$ (богатое горение). С увеличением α (бедное горение) наблюдается уменьшение отклонения температуры. Таким образом, добавление до 5 % антикоррозионных присадок не повлияет на тепловую мощность КС.

На рисунке приведен график зависимости температуры горения T от коэффициента избытка воздуха α , осредненный для исследованных топливных композиций.

Анализ приведенной графической зависимости показывает, что в энергоустановках с неохлаждаемой турбиной при горении углеводородных топлив с антикоррозионными добавками требуется организация бедного

горения с температурой рабочего тела на выходе из КС $T \leq 1200$ К, что соответствует коэффициенту избытка воздуха $\alpha \geq 4,0$.

В табл. 7 приведены объемные доли коррозионно-активных и вредных веществ в составе ПС при сжигании топливных композиций «ТГ + анилин».

Таблица 7

Содержание вредных веществ в ПС топливной композиции «ТГ + анилин»

Суммарная объемная доля вещества	Процент добавки	α						
		0,6	0,8	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
$\text{CO} \cdot 10^1$	0	1,13	0,598	0,125	$6,25 \cdot 10^{-5}$	$3,40 \cdot 10^{-7}$	$6,37 \cdot 10^{-9}$	–
	1	1,15	0,604	0,128	$6,45 \cdot 10^{-5}$	$3,51 \cdot 10^{-7}$	$6,56 \cdot 10^{-9}$	–
	3	1,18	0,616	0,132	$6,83 \cdot 10^{-5}$	$3,70 \cdot 10^{-7}$	$6,91 \cdot 10^{-9}$	–
	5	1,20	0,627	0,137	$7,20 \cdot 10^{-5}$	$3,90 \cdot 10^{-7}$	$7,25 \cdot 10^{-9}$	–
$\text{NO}_x \cdot 10^6$	0	2,08	164	2800	1830	472	157	64,9
	1	2,17	170	2840	1840	475	158	65,2
	3	2,36	184	2910	1870	481	160	66,0
	5	2,55	197	2970	1890	487	162	66,6
$\text{S}_x \cdot 10^6$	0	18,7	2,18	0,0463	–	–	–	–
	1	18,0	2,09	0,0455	–	–	–	–
	3	17,2	1,96	0,0445	–	–	–	–
	5	16,3	1,85	0,0435	–	–	–	–

Окончание табл. 7

Суммарная объемная доля вещества	Процент добавки	α						
		0,6	0,8	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
$\text{SO}_x \cdot 10^4$	0	1,73	5,79	5,03	2,68	1,83	1,38	1,11
	1	1,72	5,60	4,85	2,58	1,75	1,33	1,07
	3	1,71	5,31	4,59	2,44	1,66	1,26	1,01
	5	1,70	5,04	4,35	2,31	1,57	1,19	0,955
$\text{SH}_x \cdot 10^4$	0	4,82	0,0875	0,000327	–	–	–	–
	1	4,60	0,0814	0,000317	–	–	–	–
	3	4,28	0,0720	0,000302	–	–	–	–
	5	3,98	0,0641	0,000289	–	–	–	–
$\text{SH}_x\text{O}_y \cdot 10^8$	0	6,15	4,56	0,219	–	0,0384	0,222	0,798
	1	6,10	4,36	0,213	–	0,0362	0,209	0,754
	3	6,07	4,06	0,204	–	0,0327	0,190	0,686
	5	6,02	3,78	0,195	–	0,0297	0,173	0,626

В табл. 8 приведены объемные доли коррозионно-активных и вредных веществ в составе ПС при сжигании топливных композиций «ТГ + диэтиламин».

Таблица 8

Содержание вредных веществ в ПС топливной композиции «ТГ + диэтиламин»

Суммарная объемная доля вещества	Процент добавки	α						
		0,6	0,8	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
$\text{CO} \cdot 10^1$	0	1,13	0,598	0,125	$6,25 \cdot 10^{-5}$	$3,40 \cdot 10^{-7}$	$6,37 \cdot 10^{-9}$	–
	1	1,13	0,599	0,126	$6,31 \cdot 10^{-5}$	$3,44 \cdot 10^{-7}$	$6,43 \cdot 10^{-9}$	–
	3	1,14	0,600	0,127	$6,42 \cdot 10^{-5}$	$3,50 \cdot 10^{-7}$	$6,54 \cdot 10^{-9}$	–
	5	1,14	0,601	0,128	$6,53 \cdot 10^{-5}$	$3,56 \cdot 10^{-7}$	$6,65 \cdot 10^{-9}$	–
$\text{NO}_x \cdot 10^6$	0	2,08	164	2800	1830	472	157	64,9
	1	2,12	166	2820	1840	473	158	65,1
	3	2,21	171	2840	1840	476	158	65,4
	5	2,29	175	2860	1850	479	159	65,7
$\text{S}_x \cdot 10^6$	0	18,7	2,18	0,0463	–	–	–	–
	1	17,8	2,11	0,0453	–	–	–	–
	3	16,6	2,01	0,0438	–	–	–	–
	5	15,4	1,92	0,0424	–	–	–	–
$\text{SO}_x \cdot 10^4$	0	1,73	5,79	5,03	2,68	1,83	1,38	1,11
	1	1,69	5,61	4,86	2,59	1,76	1,34	1,07
	3	1,64	5,34	4,63	2,47	1,68	1,27	1,02
	5	1,59	5,09	4,41	2,35	1,60	1,21	0,972
$\text{SH}_x \cdot 10^4$	0	4,82	0,0875	0,000327	–	–	–	–
	1	4,65	0,0840	0,000318	–	–	–	–
	3	4,41	0,0789	0,000307	–	–	–	–
	5	4,18	0,0742	0,000296	–	–	–	–
$\text{SH}_x\text{O}_y \cdot 10^8$	0	6,15	4,56	0,219	–	0,0384	0,222	0,798
	1	6,04	4,41	0,214	–	0,0370	0,214	0,768
	3	5,88	4,21	0,206	–	0,0348	0,201	0,724
	5	5,73	4,02	0,198	–	0,0328	0,190	0,684

В табл. 9 приведены объемные доли коррозионно-активных и вредных веществ в составе ПС при сжигании топливных композиций «ТГ + триметиламин».

Таблица 9

Содержание вредных веществ в ПС топливной композиции «ТГ + триметиламин»

Суммарная объемная доля вещества	Процент добавки	α						
		0,6	0,8	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
$\text{CO} \cdot 10^1$	0	1,13	0,598	0,125	$6,25 \cdot 10^{-5}$	$3,40 \cdot 10^{-7}$	$6,37 \cdot 10^{-9}$	–
	1	1,13	0,598	0,126	$6,32 \cdot 10^{-5}$	$3,45 \cdot 10^{-7}$	$6,45 \cdot 10^{-9}$	–
	3	1,13	0,598	0,127	$6,46 \cdot 10^{-5}$	$3,52 \cdot 10^{-7}$	$6,60 \cdot 10^{-9}$	–
	5	1,13	0,599	0,128	$6,59 \cdot 10^{-5}$	$3,60 \cdot 10^{-7}$	$6,75 \cdot 10^{-9}$	–
$\text{NO}_x \cdot 10^6$	0	2,08	164	2800	1830	472	157	64,9
	1	2,14	167	2820	1840	474	158	65,1
	3	2,25	172	2840	1850	478	159	65,7
	5	2,37	177	2860	1860	481	160	66,1
$\text{S}_x \cdot 10^6$	0	18,7	2,18	0,0463	–	–	–	–
	1	18,0	2,12	0,0456	–	–	–	–
	3	17,1	2,05	0,0448	–	–	–	–
	5	16,2	1,99	0,0441	–	–	–	–
$\text{SO}_x \cdot 10^4$	0	1,73	5,79	5,03	2,68	1,83	1,38	1,11
	1	1,70	5,65	4,90	2,61	1,77	1,34	1,08
	3	1,68	5,43	4,71	2,51	1,71	1,29	1,04
	5	1,66	5,23	4,53	2,42	1,64	1,24	1,00
$\text{SH}_x \cdot 10^4$	0	4,82	0,0875	0,000327	–	–	–	–
	1	4,68	0,0845	0,000321	–	–	–	–
	3	4,46	0,0803	0,000315	–	–	–	–
	5	4,27	0,0763	0,000308	–	–	–	–
$\text{SH}_x\text{O}_y \cdot 10^8$	0	6,15	4,56	0,219	–	0,0384	0,222	0,798
	1	6,09	4,45	0,215	–	0,0371	0,215	0,772
	3	6,04	4,30	0,210	–	0,0352	0,204	0,734
	5	5,99	4,15	0,206	–	0,0335	0,194	0,699

Анализ данных, представленных в табл. 7–9, показывает, что с увеличением процентного содержания присадок концентрации CO и NO_x увеличиваются при одновременном снижении концентрации серосодержащих соединений.

В энергоустановках с неохлаждаемой турбиной ($T \leq 1200$ К, $\alpha \geq 4,0$) максимальное снижение концентрации серосодержащих веществ достигает 13,8 % при использовании присадки анилин в количестве до 5 об. %.

Таким образом, для снижения коррозионной активности продуктов сгорания серосодержащих углеводородных топлив предлагается применение антикоррозионной присадки анилин. Однако для его использования в паровой фазе при подаче в магистраль топливного газа в реальных условиях эксплуатации требуется его предварительный подогрев до $T_{\text{исп}} = 213$ °С при $P = 0,2$ МПа и до $T_{\text{исп}} = 255$ °С при $P = 0,5$ МПа.

Заключение

Проведенные исследования показали, что из рассмотренных антикоррозионных присадок наибольшее снижение содержания коррозионно-активных веществ в составе ПС наблюдается при использовании присадки анилин. Однако для подачи анилина в паровой фазе в топливную магистраль углеводородного газа требуется использование теплообменника-испарителя. Кроме того, с уменьшением концентрации серосодержащих соединений наблюдается увеличение концентрации вредных веществ.

Список литературы

1. Способы увеличения ресурса работы микрогазотурбинного энергетического агрегата при утилизации попутного нефтяного газа / О.А. Зуева, Н.Л. Бачев, Р.В. Бульбович, А.М. К्लещевников // Газовая промышленность. – 2013. – № 692. – С. 30–34.
2. Зуева О.А., Бачев Н.Л., Бульбович Р.В. Разработка высокоресурсной камеры сгорания для утилизации попутного нефтяного газа // Фундаментальная наука и технологии. Перспективные разработки: материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 28–29 нояб. 2013 г. – North Charleston: Academic, 2013. – Vol. 2. – С. 167–172.
3. Амирханова Н.А., Хамзина А.Р. Повышение коррозионной стойкости сплава ЭП648 к высокотемпературной газовой коррозии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 36. – С. 38–48.
4. Полетаева О.Ю., Мовсум-Заде Н.Ч., Бабаев Э.Р. Антикоррозионные присадки для транспорта, хранения, эксплуатации нефтепродуктов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2014. – № 1. – С. 34–36.
5. Зуева О.А., Бульбович Р.В., Бачева Н.Ю. Расчет выбросов загрязняющих и коррозионно-активных веществ при сжигании серосодержащего попутного нефтяного газа в микрогазотурбинных энергетических агрегатах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2012. – № 32. – С. 81–95.
6. Кулиев А.М. Химия и технология присадок к маслам и топливам. – Л.: Химия, 1985. – 312 с.
7. Алцыбеева А.И., Левин С.З. Ингибиторы коррозии металлов: справочник / под ред. проф. Л.И. Антроповой. – Л.: Химия, 1968. – 264 с.
8. Трусов Б.Г. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах (АСТРА.4/pc). – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1995. – 40 с.
9. Краткий справочник физико-химических величин / под ред. К.П. Мищенко, А.А. Равдель. – Л.: Химия, 1974. – 200 с.
10. Никольский Б.П. Справочник химика. – Л.: Химия, 1967. – Т. 6. – 1012 с.
11. Нефтепродукты: свойства, качество, применение: справочник / под ред. проф. Б.В. Лосикова. – М.: Химия, 1966. – 776 с.
12. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей: учебник / А.П. Васильев, В.М. Кудрявцев, В.А. Кузнецов [и др.] / под ред. В.М. Кудрявцева. – М.: Высш. шк., 1983. – 703 с.
13. Arden L. Buck. New equations for computing vapor pressure and enhancement factor // Journal of Applied Meteorology. – 1981. – Vol. 20. – P. 1527–1532.
14. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 407 с.
15. Кретчетов И.В. Сушка и защита древесины: учебник для техникумов. – М.: Лесн. пром-ть, 1987. – 328 с.

References

1. Zueva O.A., Bachev N.L., Bulbovich R.V., Kleshchevnikov A.M. Sposoby uvelicheniya resursa raboty mikrogaзoturbinnogo energeticheskogo agregata pri utilizatsii poputnogo neftyanogo gaza [The ways to increase operability of micro-gas-turbine generating unit when utilizing associated petroleum gases]. *Gazovaya promyshlennost*, 2013, no. 692, pp. 30-34.
2. Zueva O.A., Bachev N.L., Bulbovich R.V. Razrabotka vysokoresursnoy kamery sgoraniya dlya utilizatsii poputnogo neftyanogo gaza [Development of combustion chamber with high operability for utilizing associated petroleum gases]. *Fundamentalnaya nauka i tekhnologii perspektivnye razrabotki: materialy II mezhdunar. nauch.-prakt. konf.*, Moscow, Academic, 2013, vol. 2, pp. 167-172.
3. Amirkhanova N.A., Khamzina A.R. Povyshenie korrozionnoy stoykosti splava EP648 k vysokotemperaturnoy gazovoy korrozii [Increase of corrosion stability of alloy EP648 to high-temperature gas corrosion]. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2014, no. 36, pp. 38-48.
4. Poletaeva O.Yu., Movsum-Zade N.Ch., Babaev E.R. Antikorrozionnye prisadki dlya transporta, khraneniya, ekspluatatsii nefteproduktov [Anti-corrosion additives for transport, storage, exploitation of petroleum product]. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syrya*, 2014, no. 1, pp. 34-36.
5. Zueva O.A., Bulbovich R.V., Bacheva N.Yu. Raschet vybrosov zagryaznyayushchikh i korrozionno-aktivnykh veshchestv pri szhiganii serosoderzhashchego poputnogo neftyanogo gaza v mikrogaзoturbinnnykh

energeticheskikh agregatakh [The calculation of the contaminated and corrosive substances emission during combustion of sulphur-containing associated petroleum gas in the microgasturbine units]. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2012, no. 32, pp. 81-95.

6. Kuliev A.M. Khimiya i tekhnologiya prasadok k maslam i toplivam [Chemistry and technology of additives for oils and fuels]. Leningrad, Khimiya, 1985, 312 p.

7. Altsybeeva A.I., Levin S.Z. Ingibitory korrozii metallov: spravochnik [Inhibitors of metallic corrosion: handbook]. Ed. L.I. Antropova. Leningrad, Khimiya, 1968, 264 p.

8. Trusov B.G. Modelirovanie khimicheskikh i fazovykh ravnovesiy pri vysokikh temperaturakh (ASTRA.4/pc) [Modeling chemical and phase equilibria at high temperatures]. Moscow, Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet im. N.E. Bauman, 1995, 40 p.

9. Mishchenko K.P., Ravdel A.A. Kratkiy spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin: spravochnik [Brief handbook on physico-chemical quantities]. Leningrad, Khimiya, 1974, 200 p.

10. Nikol'skiy B.P. Spravochnik khimika: spravochnik. Leningrad: Khimiya, 1967, vol. 6, 1012 p.

11. Nefteprodukty: svoystva, kachestvo, primeneniye: spravochnik [Oil products: properties, quality, using. Handbook]. Ed. B.V. Losikov. Moscow, Khimiya, 1966, 776 p.

12. Vasilev A.P., Kudryavtsev V.M., Kuznetsov V.A. et al. Osnovy teorii i rascheta zhidkostnykh raketnykh dvigateley: uchebnyy [The fundamentals of the theory and calculation of liquid fuel motors: manual]. Ed. V.M. Kudryavtsev. Moscow, Vysshaya shkola, 1983, 703 p.

13. Arden L. Buck. New equations for computing vapor pressure and enhancement factor. *Journal of Applied Meteorology*. 1981, vol. 20, pp. 1527-1532.

14. Kirillin V.A., Sychev V.V., Sheyndlin A.E. Tekhnicheskaya termodinamika [Engineering thermodynamics]. Moscow, Energoatomizdat, 1983, 407 p.

15. Kretchetov I.V. Sushka i zashchita drevesiny [Drying and cover of the wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost, 1987, 328 p.

Об авторах

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).

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).

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

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

About the authors

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

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

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

Nadezhda Yu. Bacheva (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).