

DOI: 10.15593/2224-9982/2016.46.11

УДК 665.612.2

Н.Л. Бачев, Н.Ю. Бачева, А.С. Ковырзина, Г.С. Арзамасова

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГОРЕНИЯ ОТХОДОВ ГАЗОВОГО КОНДЕНСАТА

В процессе очистки транспортируемого природного газа на компрессорных станциях образуются жидкофазные нефтесодержащие отходы, состоящие из углеводородов, воды и различных примесей. Известно, что содержание нефтепродуктов в указанных отходах может достигать 98 %. Показано, что отходы газового конденсата целесообразно сжигать в утилизационных камерах сгорания непосредственно в местах их накопления и образования как самостоятельное горючее или как добавку к стандартным горючим нефтяного происхождения. Полученные продукты сгорания могут быть использованы в качестве рабочего тела для привода турбогенератора, горячего теплоносителя в различных теплообменных аппаратах и в пиролизных установках для сжигания бытовых и производственных отходов непосредственно на компрессорных станциях.

Для изучения процессов горения жидкофазных отходов газового конденсата были проведены экспериментальные исследования по их сжиганию в утилизационной камере сгорания с принудительной подачей воздуха от компрессора с измерением температуры пламени, давления, температуры и расхода компонентов на входе в камеру сгорания. С помощью газоанализаторов получены экспериментальные данные по составу продуктов сгорания.

Ключевые слова: отходы газового конденсата, утилизационная камера сгорания, устойчивое горение, газоанализация, горелка, экспериментальная установка, пневматическая схема, карта испытаний.

N.L. Bachev, N.Yu. Bacheva, A.S. Kovyrzina, G.S. Arzamasova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

EXPERIMENTAL RESEARCH OF BURNING PROPERTIES OF GAS CONDENSATE WASTE

Oily liquid waste consisting of hydrocarbons, water and various impurities is formed during the purification process of the transported natural gas at the compressor station. It is known that the oil content in the above mentioned waste can be up to 98%. It is shown that advisable to burn the gas condensate waste in the utilizing combustion chambers directly in the places of its accumulation and formation as an independent fuel or as an additive to the conventional fuels obtained from fuel material. The obtained combustion products can be used as the working fluid to drive the turbine generator, the hot coolant in heat exchangers and pyrolysis plants for the incineration of municipal and industrial waste on-site at the compressor stations.

Experimental studies on the utilization burning in the combustion chamber with forced air supply from the compressor with the measurement of the flame temperature, pressure, temperature and flow

rate of components in the combustor inlet were conducted to study the combustion processes of gas condensate waste. Experimental data of the content of the combustion products was obtained by gas analyzers.

Keywords: gas condensate waste, salvaging combustion chamber, steady burning, gas analyzing, fuel burner, test facility, pneumatic circuit, test card.

Нефтеcодержащие жидкофазные отходы газовых конденсатов (ОГК), получаемые при очистке транспортируемого природного газа, могут быть использованы в качестве самостоятельного горючего или в качестве добавки к топливам нефтяного происхождения в горелочных устройствах различного типа [1]. В связи с этим возникает необходимость экспериментального подтверждения теоретических данных [2] по процессам горения в реальных условиях эксплуатации на компрессорных станциях. На испытательном стенде лаборатории кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» Пермского национального исследовательского политехнического университета получены экспериментальные зависимости температуры горения и состава продуктов сгорания от коэффициента избытка воздуха в области устойчивого горения ОГК.

Горелка, изображенная на рис. 1, представляет собой сварную конструкцию, состоящую из трубы 1, перегородки 2, штуцера 3 со струйной форсункой 4 диаметром 1,2 мм для подвода горючего и штуцера 5 для подвода воздуха в горелку. В перегородке 2 обеспечена система из шести отверстий диаметром 1,5 мм, просверленных под углом 45° к оси горелки.

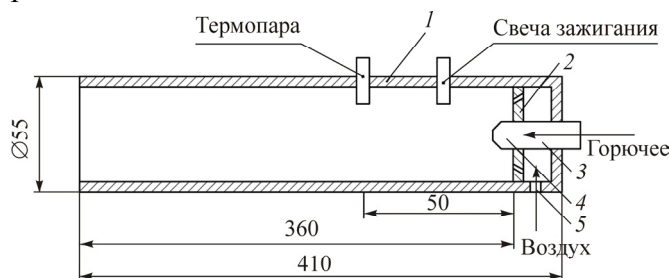
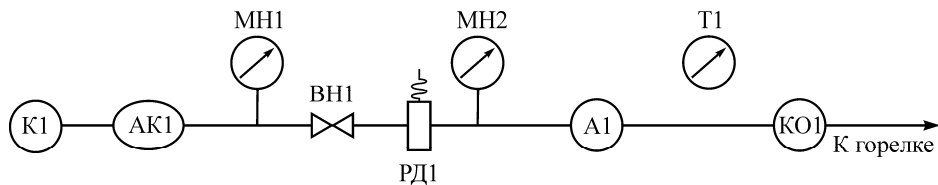


Рис. 1. Эскиз камеры сгорания

Жидкое горючее поступает в горелку через штуцер 3 и форсункой 4 распыляется на капли. Воздух через штуцер 5 и систему отверстий в перегородке 2 внедряется под углом 45° в струю жидких капель. Подготовленная таким образом топливно-воздушная смесь воспламеняется с помощью высоковольтной свечи зажигания.

Об адекватной организации внутрикамерного процесса можно судить по экспериментальным значениям температуры пламени и состава продуктов сгорания. Температура пламени на расстоянии 50 мм от перегородки 2 регистрировалась хромель-копелевой термопарой. Отбор проб для определения состава продуктов сгорания осуществлялся на расстоянии 60 мм вверх по течению от среза выхлопной трубы.

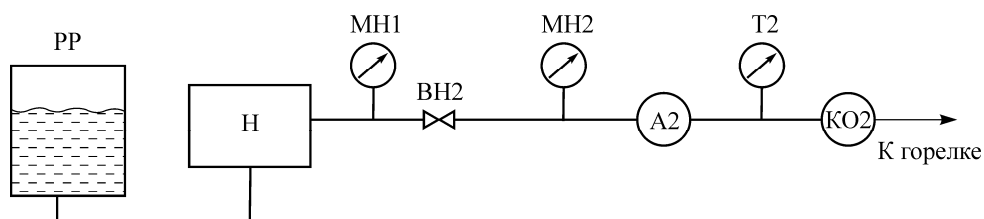
На рис. 2 представлена пневматическая схема и применяемое оборудование по линии подачи воздуха. Поршневой компрессор К1 сжимает воздух, пополняя запасы рабочего тела в горизонтальном ресивере АК1, давление в котором может достигать 10 атм. Величина давления воздуха в АК1 контролируется манометром МН1. С помощью вентиля ВН1 и редуктора РД1 устанавливаются необходимые давление и расход воздуха на входе в горелку, значения которых регистрируются датчиком давления МН2 и вихревым расходомером А1. Термодатчик Т1 измеряет температуру воздуха на входе в горелку. Обратный клапан КО1, установленный перед горелкой, перекрывает подачу поступающего воздуха в случае внештатного увеличения давления в горелке.



Обозначение	Название	Примечание
AK1	Горизонтальный ресивер компрессора	–
K1	Компрессор	ВК5 Е-8
MN1	Манометр	ДУ = 25 мм
VN1	Вентиль	ДУ = 25 мм
RD1	Редуктор	ДКП-1-65
MN2	Датчик давления	ДД 415 Ех
A1	Датчик расхода	ВПРГ-010
T1	Датчик температуры	ТПСР 1500
KO1	Клапан обратный	ДУ = 25 мм

Рис. 2. Пневматическая схема по линии подачи воздуха

На рис. 3 представлена пневматическая схема и применяемое оборудование по линии подачи жидкого горючего. Жидкое горючее к горелке подается из расходного резервуара РР шестеренчатым насосом Н. Давление на выходе из насоса контролируется показанием манометра МН1. Потребный расход горючего устанавливается с помощью вентиля ВН2 по показаниям турбинного расходомера А2. Датчик давления МН2 и датчик температуры Т2 измеряют давление и температуру горючего на входе в горелку. Обратный клапан КО2, установленный перед горелкой, перекрывает подачу поступающего горючего в случае внештатного увеличения давления в горелке.



Обозначение	Название	Примечание
PP	Расходный резервуар	V = 10 л
Н	Насос шестеренчатый	ЕА-88
МН1	Манометр	ДУ = 10 мм
ВН2	Вентиль	ДУ = 10 мм
МН2	Датчик давления	ДД 415 Ex
А2	Датчик расхода	NuFLo 3/8
Т2	Датчик температуры	ТПСР 1500
КО2	Клапан обратный	ДУ = 25 мм

Рис. 3. Пневматическая схема по линии горючего

Для изучения режимов горения при различных значениях коэффициента избытка воздуха α необходимо установить опытным путем определенные расходы окислителя и жидкого горючего. С этой целью была построена рабочая карта испытаний для ОГК, представленная на рис. 4. Режимная линия на карте испытаний описывается формулой

$$\frac{Q_{\text{ок}}}{Q_{\text{гор}}} = \frac{\alpha K_{\text{то}} \rho_{\text{гор}}}{\rho_{\text{ок}}},$$

где $Q_{ок}$, $Q_{гор}$ – объемные расходы окислителя и горючего соответственно; α – коэффициент избытка окислителя; K_{mo} – массовое стехиометрическое соотношение количеств, $K_{mo} = 15,5$ [3]; $\rho_{гор}$ – плотность жидкого горючего, $\rho_{гор} = 850 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{ок}$ – плотность газообразного окислителя по условиям подачи, $\rho_{ок} = 4 \text{ кг/м}^3$ [2].

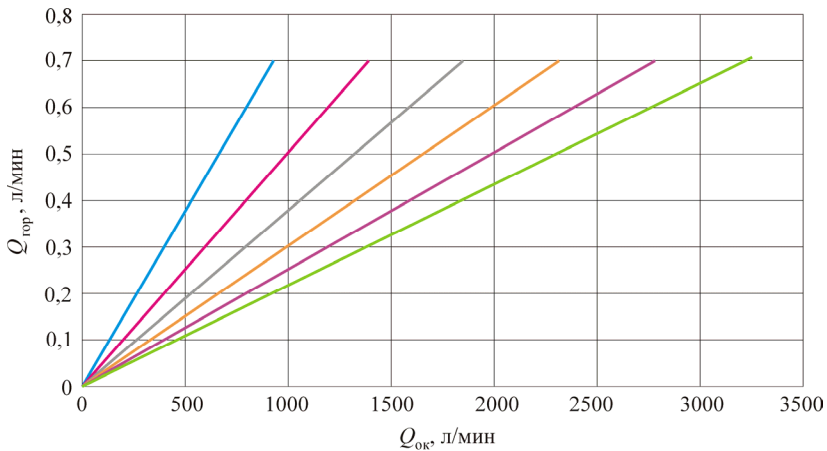


Рис. 4. Рабочая карта испытаний: — $\alpha = 0,4$; — $\alpha = 0,6$;
— $\alpha = 0,8$; — $\alpha = 1,0$; — $\alpha = 1,2$; — $\alpha = 1,4$

В работе [2] по методике, изложенной в статье [4], определены нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени $\varphi_n = 0,3 \text{ об. } \%$ и $\varphi_v = 3,4 \text{ об. } \%$, что соответствует коэффициенту избытка воздуха α в диапазоне от 0,4 до 2,4 для топливной пары ОГК + воздух. Экспериментальные исследования режимов горения проводились в области α от 0,58 до 1,38.

В процессе проведения экспериментов замерялись давление $p_{ок}$, температура $T_{ок}$ и объемный расход $Q_{гор}$ на входе в горелку по линии воздуха, а также давление $p_{гор}$, температура $T_{гор}$ и объемный расход $Q_{гор}$ на входе в горелку по линии жидкого горючего. Внутри горелки проводились измерения температуры T в зоне сформировавшегося пламени.

По параметрам подачи рассчитывалась плотность воздуха

$$\rho_{ок} = \frac{p_{ок}}{R_{ок} T_{ок}},$$

где $R_{ок}$ – газовая постоянная, $R_{ок} = 287 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$.

Плотность жидкого горючего была определена предварительно экспериментальным путем и составила $\rho_{гор} = 850 \text{ кг/м}^3$.

По экспериментальным значениям объемных расходов и плотностей определялся коэффициент избытка воздуха

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

где стехиометрическое массовое соотношение $K_{mo} = 15,5$ [2].

Экспериментальные данные по режимам горения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные данные по режимам горения

Воздух				Жидкость				Горение	
$P_{ок}$, кПа	$T_{ок}$, °С	$\rho_{ок}$, кг/м ³	$Q_{ок}$, л/мин	$P_{гор}$, кПа	$T_{гор}$, °С	$\rho_{гор}$, кг/м ³	$Q_{гор}$, л/мин	α	T , °С
393,4	23,1	4,63	1632,8	222	15,7	850	1,000	0,58	496
310,4	14,8	3,90	2538,5	223	15,9	850	1,000	0,76	743
173,1	16,2	2,10	6457,1	221	16,2	850	1,000	1,04	752
34302	15,1	4,10	3878,1	225	17,1	850	1,000	1,22	480
401,9	30,0	5,40	3333,3	224	16,7	850	1,000	1,38	472

На рис. 5 приведена экспериментальная зависимость температуры продуктов сгорания от коэффициента избытка воздуха при расположении термопары внутри горелки на расстоянии 50 мм от перегородки (см. рис. 1). Максимальная температура $T_{max} = 778 \text{ °С}$ получена при $\alpha = 0,92$, что соответствует полному сгоранию жидкого горючего.

При повышении коэффициента избытка воздуха температура пламени в горелке понижается, так как продукты сгорания разбавляются воздухом и отдают ему часть тепла для его нагрева, поэтому на этих режимах топливо горит менее активно, сгорание может быть неполным и наблюдается удлинение факела пламени [5, 6].

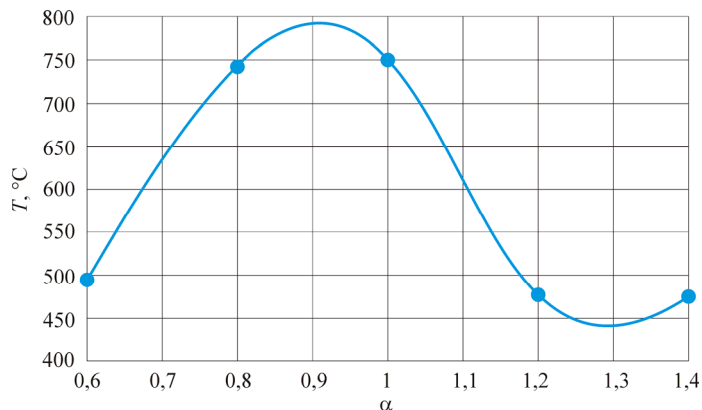


Рис. 5. График зависимости температуры от коэффициента избытка воздуха

При понижении коэффициента избытка воздуха температура пламени в горелке также понижается, так как в реакцию горения вступает только часть имеющегося горючего. Эти режимы характеризуются большой неполнотой сгорания топлива и пониженными КПД горелки.

В реальных процессах трудно достигнуть полного сгорания горючего без избытка воздуха, поэтому при горении ОГК рекомендуется подавать в зону горения воздуха больше, чем в стехиометрическом варианте. Этот избыток воздуха необходим для лучшего перемешивания воздуха с топливом с целью более качественного протекания реакции горения [7, 8].

При использовании ОГК в качестве самостоятельного горючего или добавки к стандартным горючим нефтяного происхождения огромный интерес представляет выброс загрязняющих и коррозионно-активных веществ из установки [9–11]. В процессе экспериментальных исследований также определялось влияние режимов горения на состав продуктов сгорания ОГК в воздухе. С этой целью на выхлопе из установки в поток продуктов сгорания при температуре $T = 440...470$ °C были установлены пробоотборники для основного газоанализатора ГИАМ-315 и резервного газоанализатора Testo-340.

Экспериментально были измерены концентрации углекислого газа CO_2 , оксидов азота NO_x и серы SO_x , оксидов углерода CO , водяных паров H_2O и несгоревших углеводородов CH .

В табл. 2 и на рис. 6 представлены зависимости состава продуктов сгорания ОГК от коэффициента избытка воздуха на различных режимах горения.

Таблица 2

Экспериментальные данные по составу ПС, мас. %

α	CO ₂	CO	H ₂ O	NO _x	SO _x	CH
0,58	4,10	17,42	5,51	0,82	1,39	4,50
0,76	5,19	12,10	5,10	1,57	1,94	7,01
1,04	5,56	9,03	4,50	2,11	2,05	5,21
1,22	5,38	8,24	4,20	2,23	1,96	4,16
1,38	5,26	7,67	3,99	4,94	1,89	0,51

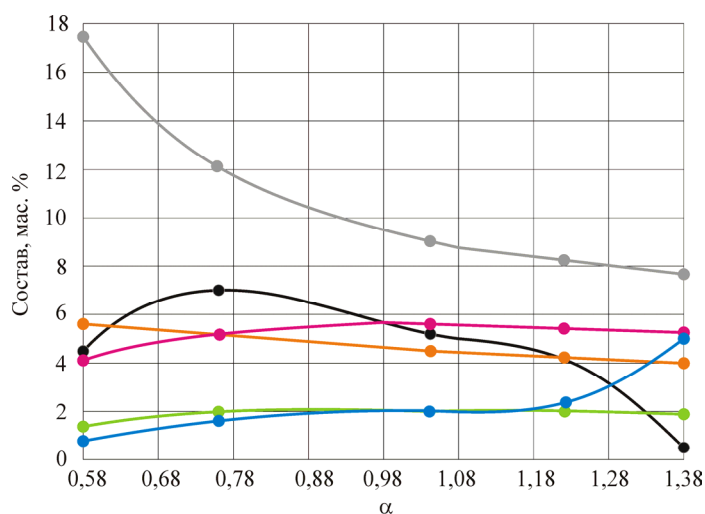


Рис. 6. График зависимости состава продуктов сгорания от коэффициента избытка воздуха: —●— CO₂; —●— CO; —●— H₂O; —●— NO_x; —●— SO_x; —●— CH

Серосодержащие соединения в составе ПС вызывают коррозию рабочих поверхностей [12], а попадая в атмосферу, вредно действуют на живые организмы и растительность [13]. Сернистые газы, попадая в рабочие помещения, могут вызвать отравление обслуживающего персонала.

Исследования показали, что на всех режимах горения содержание SO_x практически равно 2 мас. %. Это говорит о том, что уровень эмиссии SO_x не зависит от способов организации внутрикамерных процессов. Единственным способом обеспечить ресурс камеры на достаточно высоком уровне является тщательный выбор дорогостоящих хромоникелевых сплавов в качестве конструкционных материалов¹ [14].

Снижения выбросов соединений серы в составе ПС при сжигании ОГК можно достичь только двумя способами: очисткой от соединений серы ПС или удалением серы из топливного газа до его сжигания.

При изменении коэффициента избытка воздуха в диапазоне $\alpha = 0,58...1,38$ содержание паров H_2O уменьшается лишь на 2 мас. %. Наличие паров H_2O в составе ПС уменьшает ресурс работы конструкционного материала [10, 12]. Кроме того, водяные пары H_2O при соединении с SO_x способствуют образованию паров серной кислоты H_2SO_x , которые резко усиливают скорость коррозионного уноса конструкционных материалов [12].

В области устойчивого горения ОГК при увеличении коэффициента избытка воздуха концентрация оксида углерода CO и несгоревших углеводородов CH уменьшается в процессе обеднения смеси, однако на верхнем пределе устойчивого горения сохраняются на уровне 8 и 0,5 % соответственно.

Процесс накопления оксида углерода CO и несгоревших углеводородов CH при сжигании топлива происходит на начальном участке факела. Они сохраняются в составе ПС лишь в том случае, если в КС не будут созданы условия для их полного окисления. Концентрации CO и CH в составе ПС зависят от неполноты сгорания топливного газа. При общем избытке кислорода при некачественной подготовке топливовоздушной смеси могут создаваться микрозоны с дефицитом кислорода.

Эмиссии CO и CH можно довести до минимального уровня только организацией качественного перемешивания окислителя и горючего в объеме горелки.

Содержание углекислого газа CO_2 и окислов азота NO_x не влияет на ресурс работы установки, однако оксиды азота, образующиеся

¹ ГОСТ 29328–92. Установки газотурбинные для привода турбогенераторов.

вследствие окисления азота в ядре факела пламени всех видов топлива, являются очень токсичными соединениями.

Особенностью образования NO_x является малая зависимость от вида и состава топлива, но большая зависимость от режима горения и организации внутрикамерного процесса. Существенное влияние на образование NO_x оказывает также концентрация кислорода, определяемая избытком воздуха в КС. Одним из наиболее легко реализуемых режимных мероприятий является снижение избытка воздуха в КС, в результате чего концентрация NO_x может быть уменьшена на 10–30 %. В результате уменьшения содержания кислорода в зоне горения происходит подавление образования как термических, так и топливных NO_x . В работе [14] показано, что влияние избытка воздуха на образование NO_x описывается экспериментальной зависимостью с максимумом концентрации при $\alpha = 1,15 \dots 1,25$. Причем максимальное содержание NO_x в ПС соответствует такому значению α , при котором в данных условиях достигается наиболее полное сгорание топлива. Минимальные значения концентрации 80–120 мг/м³ наблюдаются при $\alpha = 0,8 \dots 0,9$. Это и является в настоящее время минимальным уровнем концентрации NO_x при применении внутрикамерных мероприятий. Однако необходимо учитывать, что при $\alpha < 1$ увеличивается концентрация угарного газа и несгоревших углеводородов.

Полученные экспериментальные данные по концентрации CO_2 и NO_x отличаются от ранее опубликованных данных, что объясняется замерами температуры на начальном участке факела. Для более детального изучения процесса требуется установка нескольких термопар по длине фронта пламени.

Таким образом, экспериментально показана возможность устойчивого горения отходов газового конденсата при принудительной подаче воздуха. Экспериментально определена концентрация загрязняющих и коррозионно-активных веществ в составе продуктов сгорания. Исследования показали, что отходы газового конденсата могут использоваться и как самостоятельное углеводородное топливо, и в качестве топливной добавки к ракетным и авиационным топливам типа керосин.

Библиографический список

1. Арзамасова Г.С., Карманов В.В. Извлечение ценных углеводов как способ повышения экологической безопасности обращения с нефтесодержащими отходами газотранспортных предприятий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. – 2013. – № 4. – С. 124–133.
2. Воеводин Р.А., Бачев Н.Л., Арзамасова Г.С. Концентрационные пределы горения отходов газового конденсата // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2015. – № 42. – С. 104–113.
3. Зуева О.А. Концентрационные пределы горения попутных нефтяных газов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 37. – С. 140–153.
4. Зуева О.А., Бачев Н.Л., Бульбович Р.В. Пределы устойчивого горения нефтяных газов // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 6. – С. 64–66.
5. Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства. – М.: Энергия, 1976. – 487 с.
6. Померанцев В.В., Арефьев К.М. Основы практической теории горения. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
7. Блинов Е.А. Теория горения и взрыва. – СПб.: Изд-во Сев.-Зап. техн. ун-та, 2007. – 119 с.
8. Корольченко А.Я. Процессы горения и взрыва. – М.: Пожнаука, 2007. – 266 с.
9. Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива: справ. пособие. – Л.: Недра, 1987. – 336 с.
10. Ассад М. Продукты сжигания жидких и газообразных топлив: образование, расчет, эксперимент. – Минск: Изд-во Нац. акад. наук Беларуси, 2010. – 305 с.
11. Ахмедов Р.Б. Технология сжигания горючих газов и жидких топлив. – Л.: Недра, 1984. – 283 с.
12. Воробьева Г.Я. Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств. – М.: Химия, 1975. – 816 с.
13. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. – Л.: Недра, 1988. – 312 с.

14. Зуева О.А., Бульбович Р.В., Бачева Н.Ю. Расчет выбросов загрязняющих и коррозионно-активных веществ при сжигании серосодержащего попутного нефтяного газа в микротурбинных энергетических агрегатах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2012. – № 32. – С. 81–95.

References

1. Arzamasova G.S., Karmanov V.V. Izvlechenie tsennykh uglevododov kak sposob povysheniya ekologicheskoy bezopasnosti obrashcheniya s neftesoderzhashchimi otkhodami gazotransportnykh predpriyatiy [Reuse as a way to improve environmental safety of gas companies oily waste]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Urbanistika*, 2013, no. 4, pp. 124-133.

2. Voevodin R.A., Bachev N.L., Arzamasova G.S. Kontsentratsionnye predely goreniya otkhodov gazovogo kondensata [The concentration limits of the combustion of gas condensate waste]. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2015, no. 42, pp. 104-113.

3. Zueva O.A. Kontsentratsionnye predely goreniya poputnykh neftyanykh gazov [Concentration limits of combustion of associated petroleum gases]. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2014, no. 37, pp. 140-153.

4. Zueva O.A., Bachev N.L., Bulbovich R.V. Predely ustoychivogo goreniya neftyanykh gazov [Limits of stable combustion of petroleum gases]. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2014, no. 6, pp. 64-66.

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

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

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

8. Korolchenko A.Ya. Protsessy goreniya i vzryva [Processes of combustion and bursting]. Moscow: Pozhnauka, 2007. 266 p.

9. Isserlin A.S. Osnovy szhiganiya gazovogo topliva [Fundamentals of gas fuel burning]. Leningrad: Nedra, 1987. 336 p.

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

11. 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.

12. Vorobeva G.Ya. Korroziionnaya stoykost materialov v agresivnykh sredakh khimicheskikh proizvodstv [Corrosion stability of materials in hostile environment of chemical manufactures]. Moscow: Khimiya, 1975. 816 p.

13. Sigal I.Ya. Zashchita vozdušnogo basseyna pri szhiganii topliva [Impedance of air basin by fuel combustion]. Leningrad: Nedra, 1988. 312 p.

14. Zueva O.A., Bulbovich R.V., Bacheva N.Yu. Raschet vybrosov zagryaznyayuschikh i korroziionno-aktivnykh veschestv pri szhiganii serosoderzhashego poputnogo neftyanogo gaza v mikroturbinnnykh energeticheskikh agregatakh [The calculation of the contaminated and corrosive substance emission during combustion of sulphur-containing associated petroleum gas in the microgasturbine units]. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2012, no. 32, pp. 81-95.

Об авторах

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).

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).

Ковырзина Александра Станиславовна (Пермь, Россия) – студентка, ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: aleksa.kovyrzina@gmail.com).

Арзамасова Галина Сергеевна (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Охрана окружающей среды» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: arzamasova_g@mail.ru).

About the authors

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).

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).

Aleksandra S. Kovyrzina (Perm, Russian Federation) – Student, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: aleksa.kovyrzina@gmail.com).

Galina S. Arzamasova (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: arzamasova_g@mail.ru).

Получено 27.04.2016