

DOI: 10.15593/2224-9982/2015.42.08

УДК 665.612.2

Р.А. Воеводин, Н.Л. Бачев, Г.С. Арзамасова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

КОНЦЕНТРАЦИОННЫЕ ПРЕДЕЛЫ ГОРЕНИЯ ОТХОДОВ ГАЗОВОГО КОНДЕНСАТА

В технологических процессах транспортировки природного газа после его очистки от примесей на компрессорных станциях образуются нефтесодержащие отходы, состоящие из углеводородов, воды и различных видов примесей. Известно, что содержание нефтепродуктов в них может достигать 98 %. Для утилизации этих отходов термическими методами необходимо исследовать условия устойчивого горения при разных соотношениях расходов окислителя и горючего. Продукты сгорания таких отходов могут быть использованы в качестве рабочего тела для привода турбины в газотурбинных установках для выработки электрической энергии, горячего теплоносителя в теплообменных аппаратах с целью подогрева воды для бытовых нужд и в пиролизных установках для сжигания бытовых и производственных отходов.

Рассмотрены вопросы определения концентрационных пределов устойчивого горения отходов газовых конденсатов при их сжигании в утилизационных камерах сгорания. В результате анализа экспериментальной кривой температуры выкипания получены наиболее вероятные составы жидкофазных отходов. Разработан алгоритм определения условной химической формулы по компонентному составу и определены массовое и объемное стехиометрическое соотношения при сжигании жидкофазных отходов в воздухе. С использованием кинетических соотношений горения получены нижние и верхние концентрационные пределы горения тяжелых углеводородов. Также получены нижний и верхний пределы горения жидкофазных отходов.

Ключевые слова: нижний и верхний пределы горения, отходы газовых конденсатов, кривая выкипания, жидкофазные составы, условная химическая формула, объемное и массовое стехиометрическое соотношения, устойчивое горение.

R.A. Voevodin, N.L. Bachev, G.S. Arzamasova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

THE CONCENTRATION LIMITS OF THE COMBUSTION OF GAS CONDENSATE WASTE

After cleaning transported natural gas on compressor stations the oil-contain wastes remain. They contain heavy hydrocarbons, water and different kind of admixtures. At the same time the content of oil products in wastes can reach up to 98%. To utilize the wastes directly in the compressor station it is necessary to investigate the condition of the stable combustion in the presence of different rations of the oxidizer and fuel consumptions. The combustion products of the wastes can be used as the actuating medium for the turbine drive in gas-turbine installations, which generate the electric energy, the hot heat-transfer agent in heat-exchange apparatuses to warm up the water for daily living needs and in pyrolysis plants for combustion of domestic and industrial wastes.

The article considers the problems of determining the concentration limits of stable combustion of gas condensate wastes during their combustion in the utilizing combustion chambers. The most likely liquid-phase compositions of wastes was obtained as a result of analysis the experimental curve of the boiling temperature. An algorithm to determine the conditional chemical formula on the fractional analysis was developed and the volume and mass stoichiometric ratio for combustion of liquid-phase wastes in the air were established. The lower and upper limits of heavy hydrocarbon combustion were obtained with kinetic combustion ratio. The lower and upper limits of combustion of liquid-phase waste were determined.

Keywords: lower and upper limits of combustion, gas condensate wastes, boil-off curve, liquid-phase compositions, conditional chemical formula, volume and mass stoichiometric ratio, stable combustion.

Природный газ, транспортируемый по магистральным газопроводам, может содержать различные твердые и жидкие частицы, которые являются источниками преждевременного износа трубопроводов, запорной арматуры и технологических узлов компрессорных станций. В связи с этим очистка природного газа на линейных компрессорных станциях от примесей является неотъемлемым технологическим процессом его транспортировки, обеспечивающим безопасность и надежность оборудования.

В результате процесса очистки образуются нефтесодержащие отходы – отходы очистки природного газа на компрессорных станциях (отходы газового конденсата – ОГК).

Ежегодно на газотранспортном предприятии может образовываться до 700 т ОГК. При этом наращивание объемов транспортировки газа и развитие системы магистральных газопроводов приводит к постоянному росту объемов образования ОГК, что определяет возрастающую актуальность их переработки и рационального использования.

В зависимости от компонентного состава ОГК можно выделить три основных направления утилизации ОГК: термическое обезвреживание (технологии сжигания, пиролиза, термодесорбции) в стационарных и мобильных установках, утилизация в установках биологического обезвреживания, а также применение различных технологий химической и физико-химической обработки.

В современной практике преимущественное распространение получили технологии термического обезвреживания, а именно сжигание и извлечение ценных углеводородов с последующим использованием в качестве топлива.

В данной работе приводится методика и результаты расчета концентрационных пределов горения с целью организации устойчивого сжигания ОГК в утилизационных камерах сгорания. Результаты дан-

ных исследований могут быть успешно применены в разработках по использованию сжиженного природного газа в жидкостных ракетных и авиационных двигателях.

Проведенные исследования по содержанию основных компонентов ОГК, отобранных на пяти различных компрессорных станциях, показали, что содержание нефтепродуктов в них достигает 98 % и они имеют утяжеленный фракционный состав. На рисунке показана температура разложения ОГК одной из компрессорных станций [1].

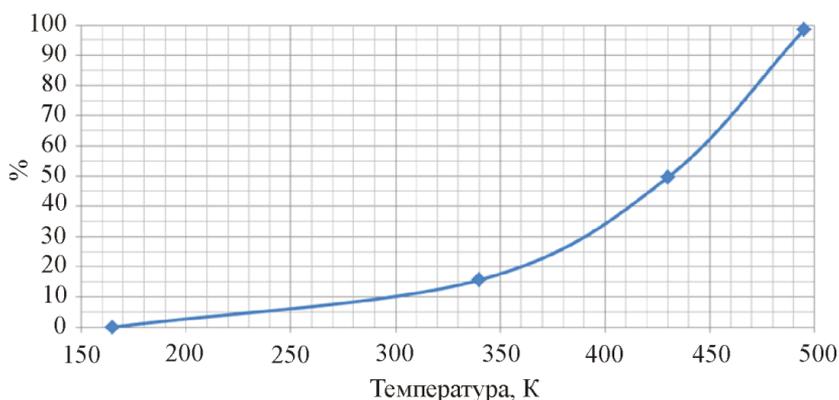


Рис. Температура выкипания ОГК

В результате анализа кривой термического разложения по температурам кипения жидких углеводородов [2–4] получены наиболее вероятные жидкофазные составы ОГК, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Жидкофазные составы ОГК

№ п/п	Состав 1		Состав 2	
	Компоненты	σV_j	Компоненты	σV_j
1	C_5H_{12}	0,015	$C_{11}H_{24}$	0,015
2	C_8H_{18}	0,015	$C_{14}H_{30}$	0,015
3	$C_{12}H_{26}$	0,035	$C_{18}H_{38}$	0,07
4	$C_{11}H_{16}$	0,035	$C_{25}H_{52}$	0,24
5	$C_{18}H_{30}$	0,24	$C_{30}H_{64}$	0,66
6	$C_{25}H_{44}$	0,66	–	–

Для определения стехиометрического соотношения ОГК и воздуха был разработан алгоритм определения элементарного состава жидкофазных отходов.

Молярная масса

$$M = \sum_j \sigma V_j \cdot M_j,$$

где σV_j , M_j – объемная доля и молярная масса j -го компонента в смеси.

Плотность

$$\rho = \sum_j \sigma V_j \cdot \rho_j,$$

где ρ_j – плотность j -го элемента в смеси.

Массовая доля j -го компонента

$$\sigma m_j = \frac{\sigma V_j \cdot \rho_j}{\rho}.$$

Массовое содержание i -го элемента ($i = \text{C}, \text{H}$) в j -м компоненте

$$\sigma m_{ij} = \frac{A_i \cdot z_{ij}}{M_j},$$

где A_i – атомная масса i -го элемента; z_{ij} – число атомов i -го элемента в j -м компоненте; M_j – атомная масса j -го компонента.

Массовое содержание i -го элемента в смеси

$$g_i = \sum \sigma m_{ij} \cdot \sigma m_j.$$

Количество атомов i -го элемента в условной химической формуле

$$z_i = \frac{g_i \cdot A_i}{M}.$$

Стехиометрическое массовое соотношение

$$K_{\text{M}0} = \frac{\frac{8}{3} \cdot g_{\text{C}}^{\text{r}} + 8 \cdot g_{\text{H}}^{\text{r}} - g_{\text{O}}^{\text{r}}}{g_{\text{O}}^{\text{ок}} - \frac{8}{3} \cdot g_{\text{C}}^{\text{ок}} - 8 \cdot g_{\text{H}}^{\text{ок}}},$$

где g_i^{r} , $g_i^{\text{ок}}$ – массовые доли i -го элемента в составе горючего и окислителя соответственно.

Стехиометрическое объемное соотношение

$$K_{V0} = K_{M0} \cdot \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{ок}}},$$

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

Результаты расчетов по приведенному алгоритму для двух составов ОГК приведены в табл. 2 и 3 соответственно.

Таблица 2

Характеристики и условная химическая формула ОГК-1

№ п/п	Состав 1	M_j , а.е.м.	ρ_i , кг/м ³	σm_j
1	C ₅ H ₁₂	72	626	0,011
2	C ₈ H ₁₈	114	703	0,012
3	C ₁₂ H ₂₆	170	750	0,030
4	C ₁₁ H ₁₆	147	855	0,034
5	C ₁₈ H ₃₀	246	850	0,235
6	C ₂₅ H ₄₄	344	895	0,678

Примечание. Молярная масса $M = 300$ кг/моль. Плотность $\rho = 871$ кг/м³. Условная химическая формула C_{21,8}H_{38,1}. Массовое стехиометрическое соотношение $K_{M0} = 14,4$. Объемное стехиометрическое соотношение $K_{V0} = 9650$.

Таблица 3

Характеристики и условная химическая формула ОГК-2

№ п/п	Состав 1	M_j , а.е.м.	ρ_i , кг/м ³	σm_j
1	C ₁₁ H ₂₄	156	756	0,012
2	C ₁₄ H ₃₀	198	762	0,012
3	C ₁₈ H ₃₈	254	776	0,059
4	C ₂₅ H ₅₂	352	879	0,230
5	C ₃₀ H ₆₄	424	951	0,685

Примечание. Молярная масса $M = 387$ кг/моль. Плотность $\rho = 916$ кг/м³. Условная химическая формула C_{27,4}H_{58,2}. Массовое стехиометрическое соотношение $K_{M0} = 14,9$. Объемное стехиометрическое соотношение $K_{V0} = 10500$.

Нижний (верхний) концентрационный предел распространения пламени – это минимальная (максимальная) концентрация горючего в окислителе, способная воспламениться от высокоэнергетического источника с последующим распространением горения на всю смесь.

Имеющиеся экспериментальные данные по концентрационным пределам горения получены в основном для индивидуальных газов, но даже в справочных данных для хорошо исследованных веществ имеются различия [5–7].

Нижний и верхний концентрационные пределы горения компонентов ОГК могут быть определены по аппроксимирующей формуле [8]

$$\varphi_{н(в)} = \frac{100}{\beta \cdot a + b},$$

где a и b – эмпирические константы; β – стехиометрический коэффициент при кислороде в уравнении химической реакции.



Значения коэффициентов применительно к исследуемым составам приведены в табл. 4.

Таблица 4

Таблица коэффициентов

Расчет предела горения		Значения коэффициентов	
		a	b
φ_n		0,0684	4,679
φ_v	$\beta \leq 7,5$	1,550	0,560
	$\beta > 7,5$	0,768	6,554

Рассчитанные значения концентрационных пределов горения паров жидких углеводородов приведены в табл. 5.

Для расчета нижнего и верхнего концентрационных пределов горения ОГК в воздухе используют правило Ле Шателье [9, 10]:

$$\varphi_n = \frac{1}{\sum_j \frac{\sigma V_j}{\varphi_{nj}}}, \quad \varphi_v = \frac{1}{\sum_j \frac{\sigma V_j}{\varphi_{vj}}},$$

где φ_{nj} , φ_{vj} – нижний и верхний пределы воспламенения пара j -го компонента.

Таблица 5

Концентрационные пределы горения паров жидких углеводородов

№ п/п	Состав 1			Состав 2		
	Компоненты	$\varphi_{н_j}$, об. %	$\varphi_{в_j}$, об. %	Компоненты	$\varphi_{н_j}$, об. %	$\varphi_{в_j}$, об. %
1	C_5H_{12}	1,349	7,875	$C_{11}H_{24}$	0,656	5,099
2	C_8H_{18}	0,883	6,190	$C_{14}H_{30}$	0,523	4,335
3	$C_{12}H_{26}$	0,605	4,816	$C_{18}H_{38}$	0,411	3,614
4	$C_{11}H_{16}$	0,59	4,729	$C_{25}H_{52}$	0,298	2,798
5	$C_{18}H_{30}$	0,442	3,826	$C_{30}H_{64}$	0,247	2,388
6	$C_{25}H_{44}$	0,315	2,924	–	–	–

Результаты расчетов нижнего и верхнего пределов горения жидкофазных отходов приведены в табл. 6.

Таблица 6

Пределы горения

Параметры	Ед. изм.	Состав 1	Состав 2
Нижний предел	об. %	0,4	0,3
Верхний предел	об. %	3,4	2,6
Объемное соотношение на нижнем пределе	–	249,0	332,3
Объемное соотношение на верхнем пределе	–	28,4	37,5

Следовательно, при сжигании жидкофазных ОГК в утилизационной камере сгорания целесообразно обеспечивать соотношение объемных расходов окислителя и горючего в диапазоне от 37,5 до 249,0.

В результате проведенных исследований можно сделать вывод о том, что ОГК можно сжигать в утилизационных камерах сгорания непосредственно в местах их накопления и образования.

Библиографический список

1. Арзамасова Г.С., Карманов В.В. Извлечение ценных углеводородов как способ повышения экологической безопасности обращения с нефтесодержащими отходами газотранспортных предприятий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. – 2013. – № 4. – С. 124–133.

2. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. – Л.: Химия, 1982. – 569 с.

3. Мищенко К.П., Равдель А.А. Краткий справочник физико-химических величин. – Л.: Химия, 1974. – 200 с.
4. Рабинович В.А., Хавин З.А. Краткий химический справочник. – Л.: Химия, 1978. – 392 с.
5. Померанцев В.В., Арефьев К.М., Адмедов Д.Б. Основы практической теории горения. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
6. Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства. – М.: Энергия, 1976. – 487 с.
7. Розловский А.И. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. – М.: Химия, 1980. – 324 с.
8. Лопанов А.Н., Хомченко Ю.В. Пожаровзрывозащита. – Белгород, 2010. – 41 с.
9. Зуева О.А. Концентрационные пределы горения попутных нефтяных газов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 37. – С. 140–153.
10. Блинов Е.А. Топливо и теория горения. – СПб.: Изд-во Сев.-Зап. техн. ун-та, 2007. – 119 с.

References

1. Arzamasova G.S., Karmanov V.V. Izvlechenie tsennykh uglevodородов 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. Rid R., Prausnitz Dzh., Shervud T. Svoystva gazov i zhidkostey [Properties of gases and liquids]. Leningrad: Khimiya, 1982. 569 p.
3. Mishchenko K.P., Ravdel A.A. Kratkiy spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin [Brief handbook on physico-chemical quantities]. Leningrad: Khimiya, 1974. 200 p.
4. Rabinovich V.A., Khavin Z.A. Kratkiy khimicheskiy spravochnik [Brief chemical handbook]. Leningrad: Khimiya, 1978. 392 p.
5. Pomerantsev V.V., Arefev K.M., Admedov D.B. Osnovy prakticheskoy teorii goreniya [Fundamentals of practical combustion theory]. Leningrad: Energoatomizdat, 1986. 312 p.

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

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

8. Lopanov A.N., Khomchenko Yu.V. Pozharovzryvozashchita [Fire and implosion protection]. Belgorod, 2010. 41 p.

9. Zueva O.A. Kontsentratsionnye predely goreniya poputnykh neftnyanykh gazov [Concentration limits of combustion of associated petroleum gases]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2014, no. 37, pp. 140-153.

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

Об авторах

Воеводин Роман Андреевич (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: roma_pk_@list.ru).

Бачев Николай Леонидович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: bnl54@yandex.ru).

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

About the authors

Roman A. Voevodin (Perm, Russian Federation) – Master's Degree 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: roma_pk_@list.ru).

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).

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

Получено 15.05.2015