

Требования к подготовке растворенного газа для питания газопоршневых двигателей



С.С. Иванов, М.Ю. Тарасов, к.т.н.
(ОАО «Гипротюменнефтегаз»)

Requirements for the associated gas treatment for gas-cylinder engines supply

S.S. Ivanov, M.Yu. Tarasov (Giprotyumenneftegaz OAO)

The properties of the associated petroleum gas are considered. Power gas qualifying standards from producers of gas-cylinder engines, running on the associated gas, are analyzed. The necessity of developing standard or technical conditions, regulating the quality of the fuel gas, produced from the associated gas and determining possible ways of gas treatment for gas-cylinder engines, is shown.

Ключевые слова: растворенный газ, требования к подготовке топливного газа, метановый индекс (MN).
Адрес для связи: ivanov@gtng.ru

В связи с реализацией нефтяными компаниями программ энергосбережения и использования растворенного газа до уровня 95 % в последнее время все большее распространение получают газопоршневые двигатели ГПД (двигатели внутреннего сгорания), работающие на растворенном газе. Они используются в качестве силовых для генераторов (газопоршневые электростанции ПЭС), привода компрессоров и насосов. Опыт эксплуатации таких ГПД показывает, что иногда их устойчивая работа наблюдается при пониженной мощности – 60-70 % номинальной. При наборе двигателем нагрузки, близкой к номинальной, возникает детонация, вызывающая его аварийную остановку. Детонация может быть обусловлена несоответствием качества топливного газа требуемому.

Показатели качества топливного (растворенного) газа, источником которого является первая ступень сепарации нефти, можно разделить на два категории: зависящие от термобарических условий сепарации (содержание метана, влаги, метановый индекс MN, низшая теплота сгорания, плотность); зависящие от качества сепарации нефти и очистки газа (содержание капельной жидкости и механических примесей). Требования к качеству топливного газа задаются производителями ГПД и могут различаться в зависимости от типа и конструкции двигателя. Ниже приведены типичные требования, предъявляемые к качеству топливного газа в зависимости от его состава (единица измерения мг/м³ CH₄ нормализована к 1 м³ CH₄, где 1 м³ эквивалентен газу теплотворной способности 36,4 МДж) [1].

Содержание серы (общая сера в пересчете на сероводород), мг/м³ CH₄0-30
Объемное содержание углеводородного конденсата, ppm≤20

Относительная влажность, %80 со 100 %-ным удалением капель
Минимальное содержание метана, %70
Плотность газа, кг/м³0,7-1,2
Минимальный метановый индекс52
Минимальная теплотворная способность, МДж/м³30-36
Состав топливного газа, плотность

1. Содержание серы. Данное требование характеризует экологические свойства топливного газа, газ с высоким содержанием серы без специальной подготовки (обессеривания) сжигать нельзя.

2. Углеводородный конденсат. Под данным требованием понимается содержание углеводородов C_{5+высш}. Это требование косвенно характеризует детонационные свойства («тяжелые» углеводороды более подвержены детонации), а также возможность конденсации углеводородов в топливной аппаратуре, что ухудшает работу ГПД.

3. Относительная влажность. Данное требование характеризует возможность конденсации влаги в топливной аппаратуре, что негативно влияет на работу ГПД.

4. Содержание метана характеризует энергетические свойства топливного газа и обеспечение процесса сгорания топлива.

5. Плотность обеспечивает стехиометрическое соотношение топливо – воздух для создания условий для нормального горения топлива.

Метановый индекс. Метановый индекс (метановое число, индекс детонации) – это условный показатель, который характеризует способность газов к бездетонационному сгоранию. В отечественных нормативных документах, регламентирующих качество топливного газа, детонационное свойство представ-

лено расчетным октановым числом (РОЧ), указанным в ГОСТ 27577-2000 «Газ природный топливный компримированный для двигателей внутреннего сгорания. Технические условия», используемым при переводе двигателей с бензина на газовое топливо.

В работах [2, 3] на основе длительных исследований для оценки детонационных качеств газообразных топлив предложено использовать не октановую шкалу, в которой детонационные качества изооктана приняты за 100, гептана за 0, а метановую шкалу, в которой за 100 приняты детонационные качества метана, за 0 – детонационные качества водорода. Таким образом, метановое число 75 соответствует антидетонационным свойствам смеси, состоящей из 75 % (по объему) метана и 25 % водорода. Для определения антидетонационных свойств газов, более стойких, чем метан, в качестве эталона использовали его смеси с углекислотой, добавка которой оказывает сильный антидетонационный эффект. Метановое число, равное 125, соответствует смеси, состоящей из 80 % метана и 20 % углекислоты.

Для различных газов метановые числа определяли экспериментально на близкой к стандартной установке, служащей для определения октановых чисел, при частоте вращения $\omega=900 \text{ мин}^{-1}$, коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1$, угле опережения зажигания $\Theta=15^\circ$, температуре воздуха перед двигателем $t_s=20^\circ\text{C}$ и температуре охлаждающей жидкости на выходе из двигателя $t_w=80^\circ\text{C}$. Форма камеры сгорания ($S/D=92/96,8$) изменена по сравнению с той, которую применяют при определении антидетонационных качеств бензинов: свеча сдвинута к центру, камера куполообразная (более близкая по форме к применяемой в газовых двигателях). Метановые числа различных газов приведены в табл. 1, из которой следует, что с увеличением массы углеводорода снижается детонационная стойкость.

В настоящее время отсутствует единая методика расчета MN, почти у каждого изготовителя имеется своя методика [4], например, компания Waukesha ввела авторский индекс детонации WKI

Таблица 1

Компонент	Метановое число (индекс-MN)
Метан CH_4	100
Этан C_2H_6	44
Пропан C_3H_8	34
Изобутен $i\text{C}_4\text{H}_8$	27
<i>n</i> -Бутен $n\text{C}_4\text{H}_8$	21
Пропилен C_3H_6	20
Изобутан $i\text{C}_4\text{H}_{10}$	17
Этилен C_2H_4	16
<i>n</i> -Бутан $n\text{C}_4\text{H}_{10}$	10
Водород H_2	0

(Waukesha Knock Index), с помощью которого определяется способность топлива противостоять детонации. Для расчета метанового числа можно использовать следующие корреляционные зависимости.

1. Американским исследовательским институтом газа (American Gas Research Institute) предложены зависимости

$$\text{MON} = 137,78 \text{MCH}_4 + 29,948 \text{MC}_2\text{H}_6 - 18,193 \text{MC}_3\text{H}_8 - 167,062 \text{MC}_{4+} + 181,233 \text{MCO}_2 + 26,994 \text{MN}_2, \quad (1)$$

$$\text{MN} = 1,624 \text{MON} - 119,1, \quad (2)$$

где MON – октановое число газа; MCH_4 , MC_2H_6 , MC_3H_8 , MCO_2 , MN_2 – мольный объем соответственно метана, этана, пропана, углекислого газа и азота; MC_{4+} – суммарный мольный объем «тяжелых» фракций от C_4 и выше [5].

2. Расчетные формулы, приведенные в работе [6],

$$\text{MON} = -406,14 + 508,04 (\text{H/C}) - 173,55 (\text{H/C})^2 + 20,17 (\text{H/C})^3, \quad (3)$$

$$\text{MN} = 1,624 \text{MON} - 119,1, \quad (4)$$

где H/C – соотношение водород/углерод (энергетическое свойство газового топлива).

3. Диаграммы для приближенной оценки (см. рисунок) [7, 8].

Наиболее распространен расчет метанового индекса с помощью ПО AVL Methane (version 3.10a) производства AVL List GmbH, которым пользуются компании Cummins, GE Jenbacher, Deutz.

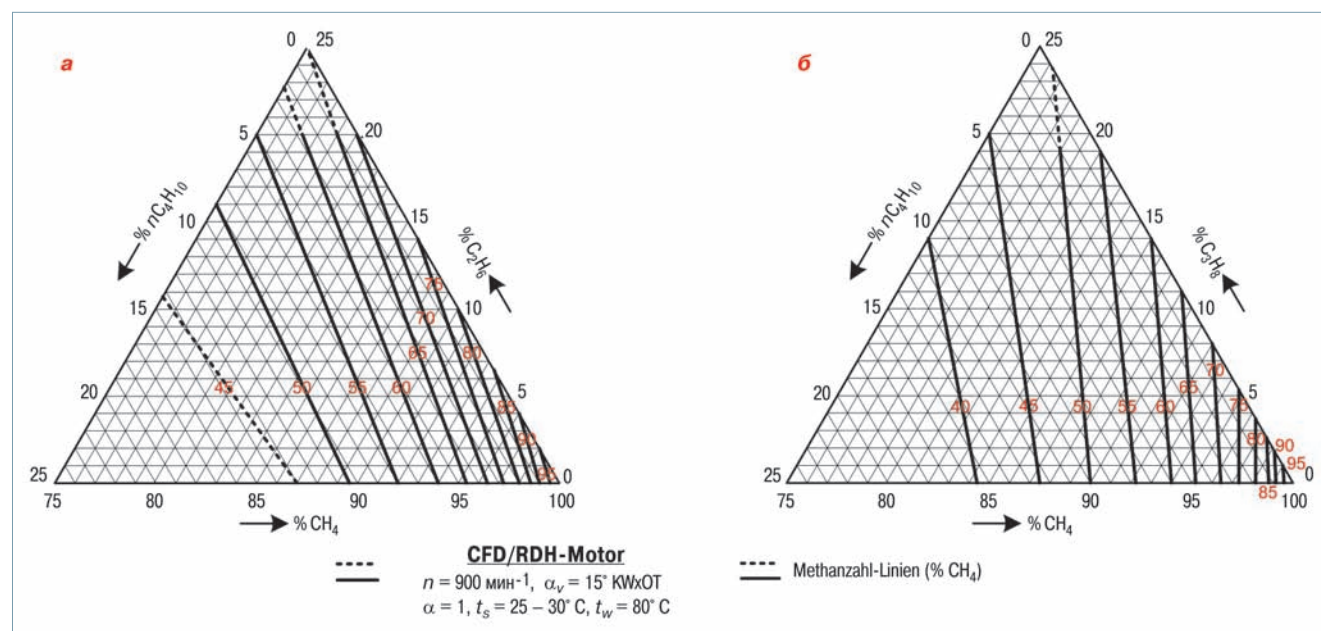


Диаграмма приближенной оценки метанового индекса по содержанию метана – этана – н-бутана (а) и метана – пропана – н-бутана (б)

Низшая объемная теплотворная способность. Ее значение используется для таких показателей, как расход топливного газа и кпд. Работа на топливном газе с высоким значением теплотворной способности при нагрузках, близких к номинальной, характеризуется высоким температурным режимом цилиндров, граничащим с уставками аварийной остановки энергомашины, что повышает износ двигателя и снижает срок его службы. Работа на топливном газе с низким значением теплотворной способности характеризуется невысоким кпд. и невозможностью работы на номинальной нагрузке.

Низшая теплотворная способность зависит от состава газа и рассчитывается по правилу аддитивности. Теплота сгорания идеального газа, рассчитанная на основе объемной доли компонентов для температуры сгорания t_1 смеси известного состава, измеренной при температуре t_2 и давлении p_2 , вычисляется по формуле

$$Q^H[t_1, V(t_2, p_2)] = \sum_{i=1}^n Q_i(t_1) \cdot \frac{p_2}{R \cdot T_2} \cdot C_i, \quad (5)$$

где $Q^H[t_1, V(t_2, p_2)]$ – идеальная низшая объемная теплотворная способность смеси; $Q_i(t_1)$ – идеальная низшая объемная теплотворная способность i -го компонента; $R=8,314510$ Дж·моль⁻¹ К⁻¹ – универсальная газовая постоянная; $T_2=t_2 + 273,15$ – абсолютная температура, К; C_i – мольная (объемная) доля i -го компонента газа в смеси.

Низшая теплотворная способность реального газа для температуры сгорания t_1 смеси известного состава, объемная доля компонентов которой измерена при температуре t_2 и давлении p_2 , вычисляется по формуле

$$\bar{Q}^H[t_1, V(t_2, p_2)] = \frac{\bar{Q}^H[t_1, V(t_2, p_2)]}{Z_{\text{mix}}}, \quad (6)$$

где $Z_{\text{mix}}(t_2, p_2)$ – коэффициент сжимаемости смеси при стандартных условиях измерений.

Качество очистки газа нормируется показателями, приведенными ниже.

- Относительная влажность, %80 со 100%-ным удалением капель
- Содержание нефти, мг/м³5
- Содержание твердых частиц, мг/м³30
- Максимальный размер твердых частиц, мкм1

Содержание капельной жидкости и механических примесей. Высокое содержание этих компонентов негативно влияет на топливную аппаратуру газопоршневого двигателя, забивает жиклеры карбюратора, форсунки, вызывает нагарообразование на стенках цилиндров, абразивный износ, металлические частицы могут вызывать калильное зажигание. Соблюдение требований к топливному газу относительно детонационных свойств (метановый индекс, низшая теплотворная способность), очистке от капельной жидкости и механических примесей гарантирует стабильность работы газопоршневого двигателя на нефтяном газе.

В табл. 2 [9-11] приведены составы и свойства нефтяного газа первой ступени сепарации нефти на нефтяных месторождениях Западной Сибири, который используется в качестве топливного, а также составы и свойства природного газа для сравнения со свойствами нефтяного газа. Анализ состава и свойств последнего показывает следующее:

- по компонентно-фракционному составу нефтяной газ соответствует требованиям за исключением содержания углеводородов $C_{5+\text{выш}}^{\text{н}};$
- по детонационным свойствам (метановый индекс) для ряда месторождений и низшей теплотворной способности газ не соответствует требованиям.

Требованиям, предъявляемым производителями газопоршневых машин к топливному газу как по компонентно-фракционному составу, так и по детонационным свойствам и низшей теплотворной способности, соответствует природный газ (см. табл. 2).

Таким образом, все энергомашины предназначены для работы на природном газе или газе, соответствующем природному по составу и свойствам.

Таблица 2

Показатели	Нефтяные месторождения							Газовые месторождения				
	Самотлорское	Усть-Балыкское	Мамонтовское	Ромашкинское	Правдинское	Южно-Балыкское	Холмогорское	Ямбургское	Уренгойское	Медвежье	Заполярье	Юбилейное
Мольная доля, %:												
CO ₂	0,400	0,204	0,359	0,400	1,370	0,120	0,170	0,19	0,31	0,36	0,33	0,40
N ₂	0,940	1,526	1,358	13,500	0,660	0,640	1,890	1,14	1,24	1,29	1,11	1,12
CH ₄	82,030	84,756	81,608	49,200	58,400	68,160	79,900	98,60	98,26	98,15	98,43	98,40
C ₂ H ₆	5,630	4,268	6,303	19,400	11,650	9,430	6,240	0,07	0,15	0,17	0,11	0,07
C ₂ H ₈	6,660	4,917	6,865	19,400	14,530	15,980	6,880	-	0,04	0,01	0,02	0,01
i-C ₄ H ₁₀	1,060	1,052	0,742	11,000	2,960	1,720	1,440					
n-C ₄ H ₁₀	2,090	1,895	1,778	2,500	6,240	2,780	2,520	-	-	0,02	-	-
i-C ₅ H ₁₂	0,380	0,402	0,285	0,500	1,480	0,220	0,420					
n-C ₅ H ₁₂	0,440	0,496	0,374	0,500	2,140	0,290	0,440	-	-	0,02	-	-
C ₆ H ₁₄₊	0,370	0,484	0,328	0,400	0,570	0,660	0,100					
Мольная масса, г/моль	20,95	20,33	20,76	30,07	28,50	54,58	21,33	16,32	16,30	16,33	16,28	16,29
Плотность при нормальных условиях, кг/м ³	0,944	0,915	0,935	1,367	1,292	1,113	0,962	0,730	0,729	0,730	0,728	0,728
Низшая теплотворная способность, МДж/кг	45,05	43,60	44,43	57,47	59,72	52,91	51,47	35,67	35,44	35,56	35,32	35,40
Метановый индекс	55,4	57,5	57,0	40,3	39,0	45,9	53,5	97,4	99,6	99,3	99,9	100,3

Опыт эксплуатации энергомаши́н на нефтяном газе показывает, что отсутствие единого подхода к определению метанового индекса (метанового числа), отсутствие единых принципов оценки его пригодности для использования в качестве топлива приводит к принятию необоснованных технико-технологических решений, касающихся системы подготовки газа. В связи с этим авторы считают, что возникла необходимость разработки стандарта или технических условий, которые устанавливали бы единые требования к качеству топливного газа для газопоршневых двигателей (получаемого из нефтяного и природного газов), не подготовленного до параметров ОСТ 51.40-93 и предназначенного для применения на нефтяных и газовых месторождениях в газопоршневых генераторных установках, приводах компрессоров и насосов.

В данном нормативном документе должны быть приняты единые методики определения показателей качества топливного газа, которыми руководствовались бы производители газопоршневых двигателей независимо от типа и конструкции двигателя. Кроме требований к топливному газу, документ мог бы содержать рекомендации по способам подготовки топливного газа (получаемого из нефтяного и природного газов), не подготовленного до параметров ОСТ 51.40-93, в зависимости от состава и свойств газа, а также требования к точкам подключения (отбора) газа. Это позволит определить основные принципы проектирования установок подготовки топливного газа для питания газопоршневых двигателей в составе энергетических установок.

Список литературы

1. Тарасов М.Ю., Иванов С.С. Подготовка нефтяного газа для питания газопоршневых электростанций // Нефтяное хозяйство. – 2009. – № 2. – С. 46-49.
2. Двигатели внутреннего сгорания: Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей / В.П. Алексеев, В.Ф. Воронин, Л.В. Грехов (и др.) / Под общ. ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
3. Генкин К.И. Газовые двигатели. – М.: Машиностроение, 1977. – 196 с.
4. Щербатюк В.М. Промысловые установки подготовки топливного газа // Сфера Нефтегаз. – 2006. – № 1.
5. Effect of Fuel Composition on the Operation of a Lean-Burn Natural Gas Engine / Clark, Nigel N., Mott, Gregory E., Atkinson, deJong, Remco J. and et. // Society of Automotive Engineers, Inc. – 1995.
6. Беляев С.В., Беляев В.В. Топлива для современных и перспективных автомобилей: Учеб. пособие. – Петрозаводск: ПетрГУ. – 2005. – 236 с.
7. Julia A. Effects of natural gas composition on alternative engines. Parameters involved in knocking. Introduction to Methane Number. «Natural gas and its effects on alternative motors» Workshop. Barcelona, December. – 1999.
8. Andersen Paw. Algorithm for methane number determination for natural gasses. Reports Danish Gas Technology Centre. – 1999. – June. – R9907.
9. Чуракаев А.М. Переработка нефтяных газов. – М.: Недра, 1983. – 279 с.
10. Берлин А.М., Гореченков В.Г., Волков Н.П. Переработка нефтяных и природных газов. – М.: Химия, 1981. – 472 с.
11. Сбор и промысловая подготовка газа на Северных месторождениях России / А.И. Гриценко, В.А. Истомина, А.Н. Кульков, Р.С. Сулейманов. – М.: Недра, 1999. – 473 с.

Вниманию читателей

Самсонов Р.О., Джафаров К.И. История газового дела: Историко-технический очерк. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2009. – 200 с.

Книга является кратким очерком истории зарождения и становления газового дела в России и СССР (1811 – 1956 гг.).

Авторы связывают замедленное развитие газового дела в стране в XIX – начале XX веков с бурным развитием нефтяной промышленности и недооценкой роли природного горючего газа. Они отстаивают точку зрения, что газовое дело стало промышленным лишь с появлением магистрального транспорта природного газа и выделением в отдельную отрасль управления.

Книга уделяет большое внимание технико-технологическим аспектам производства искусственного газа из твердых горючих ископаемых, рассматривает ранний этап истории разработки природного горючего газа. В качестве исторических источников используются многие документы из фондов Российского государственного архива экономики, редкие технические издания, техническая периодика XIX – начала XX веков.

Книга будет интересна инженерам, студентам и аспирантам профильных вузов, интересующимся историей газового дела, а также людям, увлекающимся историей науки и техники нашей страны.

Книгу можно заказать по тел.:
(495) 355-91-73, 355-92-06
(Редакционно-издательский отдел)

