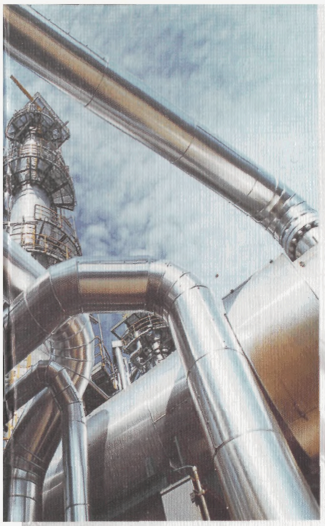
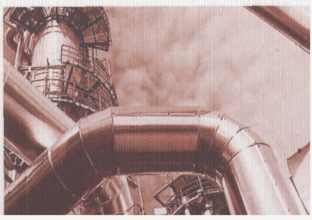


НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ОХРАНЫ АТМОСФЕРНОГО
ВОЗДУХА МИНПРИРОДЫ РФ

МЕТОДИКА

РАСЧЕТА ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ ПРИ СЖИГАНИИ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА НА ФАКЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

Санкт-Петербург
1997



БИБЛИОТЕКА ИНТЕГРАЛА

gost.e-ecolog.ru

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ОХРАНЫ
АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА МИНПРИРОДЫ РФ

МЕТОДИКА
РАСЧЕТА ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ ПРИ СЖИГАНИИ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА НА ФАКЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

Санкт-Петербург
1997

Сведения о документе

РАЗРАБОТАН: Научно-исследовательским институтом охраны атмосферного воздуха.

ВНЕСЕН: Департаментом государственного экологического контроля Минприроды РФ

УТВЕРЖДЕН: Приказом Госкомэкологии России N 199 от 08.04.98 г.

ВКЛЮЧЕН: в «Перечень методических документов по расчету выделений (выбросов) загрязняющих веществ в атмосферу

ВВЕДЕН: в действие с 01.01.98 г для практического применения при учете и нормировании выбросов в атмосферу при сжигании попутного нефтяного газа на факельных установках.

Настоящий документ не может быть тиражирован и распространен в качестве официального издания без письменного разрешения разработчика.

Содержание

1. Введение 4
2. Ссылки на нормативные документы 4
3. Основные понятия и определения. 4
4. Исходные данные 5
5. Оценка производительности факельной установки 6
6. Расчет мощности выбросов вредных веществ в атмосферу 8
7. Расчет максимальных и валовых выбросов вредных веществ 10
8. Расчет параметров факельной установки как потенциального источника загрязнения атмосферы 11
Приложение А. 13
Приложение А1. 14
Приложение А2. 16
Приложение Б. 18
Приложение Б1 20
Приложение Б2 20
Приложение В. 22
Приложение В1. 23
Приложение В2. 23
Приложение Г. 25
Приложение Г1. 26
Приложение Д. 29
Приложение Е. 30
Приложение Е1. 31
Приложение Ж. 32
Приложение Ж1. 33
Приложение З. 36
Приложение З.1 36
Приложение И. 37
Список литературы 38
Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, спб, нии атмосфера, 2002 г. (извлечение) 39
Программное обеспечение природоохранной деятельности 41

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. Настоящий документ:

- разработан в соответствии с Законом Российской Федерации «Об охране окружающей природной среды» с целью получения данных о выбросах загрязняющих веществ при сжигании попутного нефтяного газа на факельных установках;

- устанавливает методику расчета параметров выбросов загрязняющих веществ от факельных установок разного типа;

- распространяется на факельные установки, эксплуатируемые в соответствии с действующими проектными нормами;

1.2. Разработчики документа: канд. физ.-мат. наук Миляев В.Б., канд. геогр. наук Буренин Н.С., канд. физ.-мат. наук Елисеев В.С. канд. физ.-мат. наук Зив А.Д., канд. техн. наук Гизитдинова М.Р., канд. техн. наук Турбин А.С.

2. ССЫЛКИ НА НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ.

2.1. Правила устройства и безопасной эксплуатации факельных систем, утвержденные Госгортехнадзором России от 21.04.92.

2.2. ГОСТ 17.2.1.07-77. Охрана природы. Атмосфера. Метеорологические аспекты загрязнения и промышленные выбросы. Основные термины и определения.

2.3. ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий.

3. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.

3.1. Факельная установка - устройство для сжигания в атмосфере, непригодного для использования в народном хозяйстве, попутного нефтяного газа (ПНГ); является одиночным источником загрязнения атмосферы.

3.1.1. Высотная факельная установка - установка в которой подача ПНГ под давлением в зону горения производится по вертикальному факельному стволу (трубе), высотой 4м и более.

3.1.2. Горизонтальная факельная установка - открытый амбар с подачей попутного нефтяного газа под давлением в зону горения по горизонтальному факельному стволу (трубе); конструкция амбара обеспечивает выход горящего факела в атмосферу под углом 45°.

3.2. Продукты сгорания попутного нефтяного газа, покидающие факельную установку, а также несгоревшие компоненты, являются потенциальным источником загрязнения окружающей атмосферы вредными веществами.

Качественная и количественная характеристики выбросов вредных веществ определяется типом и параметрами факельной установки и составом сжигаемого ПНГ.

3.3. Конструкции высотных и горизонтальных факельных установок обеспечивают бессажевое горение попутного нефтяного газа при выполнении установленного «Правилами устройства и безопасной эксплуатации факельных систем», утв. Госгортехнадзором РФ от 21.04.92 следующего условия: скорость истечения сжигаемого газа должна превышать 0.2 от скорости распространения звука в газе.

3.4. Для оценки максимальных приземных концентраций загрязняющих веществ в атмосфере, источником которых являются факельные установки, настоящая методика предусматривает выполнение расчетов следующих параметров:

- мощности выброса вредных веществ;
- расхода выбрасываемой в атмосферу газовой смеси;
- высоты источника выброса над уровнем земли;
- средней скорости поступления в атмосферу газовой смеси;
- температуры выбрасываемой в атмосферу газовой смеси.

4. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

4.1. Проектные характеристики факельной установки

d_0 - диаметр выходного сопла, м;

$h_в$ - высота факельной трубы (для высотных факельных установок) , м;

$h_г$ - расстояние от выходного сопла до уровня земли (для горизонтальных факельных установок), м;

($h_г$ > 0 для труб, проложенных выше уровня земли и $h_г$<0 в противном случае);

l_a - расстояние от выходного сопла до противоположной стены амбара (для горизонтальных факельных установок), м.

4.2. Измеряемые характеристики

4.2.1. Объемный расход Wv (м3/с) сжигаемого на факельной установке ПНГ;

4.2.2. Скорость истечения ПНГ U, м/с.

4.2.3. Состав сжигаемого ПНГ V_i (% об):

- метан CH_4;
- этан C_2H_6;
- пропан C_3H_8;
- бутан C_4H_{10};
- пентан C_5H_{12};
- гексан C_6H_{14};
- гептан C_7H_{16};
- азот N_2;
- диоксид углерода CO_2;
- сероводород H_2S (и/или меркаптаны).

5. ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ФАКЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

5.1. Объемный расход W_v ($м^3/с$) и скорость истечения U (м/с), сжигаемого на факельной установке попутного нефтяного газа измеряется экспериментально, либо, при отсутствии прямых измерений, W_v рассчитывается по формуле:

$$W_V = 0.785 \cdot U \cdot d_0^2 \qquad (5.1.1)$$

где U - скорость истечения ПНГ из выходного сопла факельной установки, м/с (по результатам измерений); d_0 - диаметр выходного сопла, м (по проектным данным факельной установки).

При отсутствии прямых измерений скорость истечения U принимается в соответствии с «Правилами устройства и безопасной эксплуатации факельных систем» 1992 г. равной при постоянных сбросах:

$$U = 0.2 \cdot U_{зв}, \qquad (5.1.2)$$

при периодических и аварийных сбросах:

$$U = 0.5 \cdot U_{зв}, \qquad (5.1.3)$$

где $U_{зв}$ - скорость распространения звука в ПНГ, рассчитываемая согласно Приложению Г.

5.2. Массовый расход W_g (кг/4) сбрасываемого на факельной установке газа рассчитывается по формуле:

$$W_g = 2826 \cdot U \cdot d_0^2 \cdot \rho_Г, \qquad (5.2)$$

где $\rho_Г$ - плотность ПНГ, кг/м^3, (измеряется экспериментально, либо рассчитывается по объемным долям V_i (% об) и плотностям ρ_i (кг/м3) компонентов - см. Приложение А.

5.3. Объемный расход продуктов сгорания, покидающих факельную установку, $W_{пр}$ (м^3/с):

$$W_{ПР} = W_V \cdot V_{ПС} \cdot \left(\frac{273 + T_Г}{273} \right), \qquad (5.2)$$

где W_V - объемный расход (м/с) сжигаемого на факельной установке ПНГ, рассчитываемый по формуле (5.1.1);

$V_{ПС}$ - объем продуктов сгорания (м^3/м^3), рассчитываемый по формуле 3 Приложения В;

$T_г$ - температура горения, рассчитываемая согласно п.8.3.

6. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ

6.1. Расчет физико-химических характеристик сжигаемого попутного нефтяного газа.

6.1.1. Расчет плотности ρ_{Γ}, кг/м^3 (формула 1 Приложения А).

6.1.2. Расчет условной молекулярной массы μ_{Γ}, кг/моль (формула 2 Приложения А).

6.1.3. Расчет массового содержания химических элементов (% масс.) в ПНГ (формулы 3 и 4 Приложения А).

6.1.4. Расчет числа атомов элементов в условной молекулярной формуле ПНГ (формулы 5 и 6 Приложения А).

6.2. Расчет физико-химических характеристик влажного воздуха.

Для заданных метеоусловий:

- температура t°, С;
- давление Р, мм.рт.ст.;
- относительная влажность φ (в долях или %).

6.2.1. Определение массового влагосодержания d (кг/кг) влажного воздуха по номограмме (Приложение Б1).

6.2.2. Расчет массовых долей компонентов во влажном воздухе (формулы 2 и 3 Приложения Б).

6.2.3. Расчет количества атомов химических элементов в условной молекулярной формуле влажного воздуха (табл.3.Приложения Б).

6.2.4. Расчет плотности влажного воздуха $\rho_{B.B.}$, кг/м^3 (формула 5 Приложения Б).

6.3. Расчет стехиометрической реакции горения попутного нефтяного газа в атмосфере влажного воздуха.

6.3.1. Расчет мольного стехиометрического коэффициента М (формула 2 Приложения В).

6.3.2. Определение теоретического количества влажного воздуха $V_{B.B.}$ ($м^3/м^3$), необходимого для полного сгорания 1 $м^3$ ПНГ (п.3 Приложения В).

6.3.3. Расчет количества продуктов сгорания $V_{П.П.}$ ($м^3/м^3$), образующихся при стехиометрическом сгорании 1 $м^3$ ПНГ в атмосфере влажного воздуха (формула 3 Приложения В).

6.4. Проверка выполнения условий бессажевого горения попутного нефтяного газа на факельной установке.

6.4.1. Расчет скорости распространения звука в сжигаемой газовой смеси $U_{ЗВ}$ (м/с) (формула 1 Приложения Г или графики 1 - 4 Приложения Г).

6.4.2. Проверка выполнения условия бессажевого горения:

$$U_{ист} \geq 0.2 \cdot U_{ЗВ} \qquad (6.1)$$

6.5. Определение удельных выбросов вредных веществ на единицу массы сжигаемого попутного нефтяного газа (кг/кг).

6.5.1. Для оценок мощности выбросов, оксида углерода, оксидов азота (в пересчете на диоксид азота), а также сажи в случае невыполнения условия бессажевого сжигания используются опытные значения удельных выбросов на единицу массы сжигаемого газа [4], представленные в нижеследующей таблице:

Таблица 6.1

Удельные выбросы (кг/кг)	Бессажевое сжигание	Сжигание с выделением сажи
q_{CO}	$2 \cdot 10^{-2}$	0.25
q_{NOx}	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
$q_{сажи}$	-	$3 \cdot 10^{-2}$
бенз(а)пирен	$2 \cdot 10^{-11}$	$8 \cdot 10^{-11}$

В случае сжигания серосодержащего попутного нефтяного газа удельный выброс диоксида серы рассчитывается по формуле:

$$q_{SO_2} = \mu_{SO_2} \frac{S}{\mu_\Gamma} \qquad (6.2)$$

где μ_{SO_2} - молекулярная масса SO_2, μ_Γ - условная молекулярная масса горючего, S - количество атомов серы в условной молекулярной формуле попутного нефтяного газа (см. Приложения А, А1).

При необходимости определения выбросов CO_2, N_2, O_2, H_2O следует руководствоваться формулами, приводимыми в приложении Е.

Вредные вещества при сжигании попутного нефтяного газа попадают в атмосферу также за счет недожога газа. Коэффициент недожога определяется или экспериментально для факельных установок определенной конструкции, или полагается равным 0.0006 при бессажевом сжигании и 0.035 в противном случае.

Удельные выбросы углеводородов (в пересчете на метан), а также содержащихся в газе сернистых соединений, таких как сероводород и меркаптаны, определяются по общей формуле:

(Уд. выброс) - 0.01*(коэф. недожога)*(массовая доля в %) (6.3)

7. РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНЫХ И ВАЛОВЫХ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ

7.1. Расчет максимальных выбросов вредных веществ в (г/сек):

$$W_{gi} = 0.278 \cdot q_i \cdot W_g, \qquad (7.1)$$

где q_i - удельный выброс i-го вредного вещества на единицу массы сжигаемого газа (кг/кг) (Приложение Д);

W_g - массовый расход сбрасываемого на факельной установке газа (кг/час) (см. формулу 5.2).

7.2. Расчет валовых выбросов вредных веществ за год (т/год):

$$W_{gi}(t) = 0.001 \cdot q_i \cdot W_g \cdot t, \qquad (7.2)$$

где обозначения те же, что и в п.7.1, а t - продолжительность работы факельной установки в течение года в часах.

8. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ФАКЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ КАК ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

8.1. Расчет высоты источника выброса загрязняющих веществ в атмосферу над уровнем земли, Н (м)

8.1.1. Для высотных факельных установок:

$$H_B = h_B + L_\Phi , \qquad (8.1)$$

где h_B (м) - высота факельной трубы (устанавливается по проектным данным высотной факельной установки);

L_Φ (м) - длина факела (рассчитывается по формуле (1) Приложения Ж, либо определяется по номограммам Приложения Ж).

8.1.2. Для горизонтальных факельных установок:

$$H_\Gamma = 0.707 \cdot (L_\Phi - l_a) \pm h_\Gamma , \qquad (8.2)$$

где l_a (м) - расстояние от сопла трубы до противоположной стены амбара;

h_Γ (м) - расстояние выходного сопла от уровня земли (со знаком «плюс», если труба выше уровня земли, и со знаком «минус» в противном случае);

0.707 - коэффициент, учитывающий угол отклонения факела от вертикали.

8.1.3. Длина факела рассчитывается согласно Приложению Ж.

8.2. Расчет расхода и средней скорости поступления в атмосферу газовой смеси (продуктов сгорания)

Объемный расход продуктов сгорания, покидающих факельную установку, $W_{ПР}$ ($м^3/с$) рассчитывается по формуле (5.3).

Средняя скорость поступления в атмосферу продуктовсгорания попутного нефтяного газа рассчитывается по формуле:

$$W_{ПС} = 1.274 \cdot \frac{W_{ПР}}{D_\Phi^2} , \qquad (8.3)$$

где D_Φ (м) - диаметр факела.

D_Φ рассчитывается по формуле:

$$D_\Phi = 0.189 \cdot L_\Phi , \qquad (8.4)$$

где L_Φ - длина факела (Приложение Ж).

8.3. Расчет температуры выбрасываемой в атмосферу газовой смеси.

8.3.1. Расчет удельных выбросов H_2O, N_2 и O_2 на единицу массы сжигаемого ПНГ (кг/кг) (Приложение Е).

8.3.2. Расчет низшей теплоты сгорания сжигаемого газа $Q_{НГ}$ (Ккал/м^3) (Приложение 3).

8.3.3. Расчет доли энергии, теряемой за счет радиации факела Δ:

$$\Delta = 0.048 \cdot \mu_\Gamma^{0.5} , \qquad (8.5)$$

где μ_Γ - условная молекулярная масса ПНГ (Приложение А).

8.3.4. Расчет количества теплоты в продуктах сгорания попутного нефтяного газа для трех значений температуры горения Т °К (например, T_1 = 1500°К; T_2 = 1900°К; T_3 = 2300°К) $Q_{пс}$ (Ккал):

$$Q_{ПС} = \sum_i q_i \cdot C_p(T) \cdot (T - 293) , \qquad (8.6)$$

где q_i (кг) - масса 1-го компонента продуктов сгорания 1 м^3 ПНГ (Приложение Е);

C_p - средние массовые изобарные теплоемкости составляющих продуктов сгорания (таблица 3 Приложения В1).

8.3.5. Построение графика $Q_{ПС}(T)$.

8.3.6. Определение величины Т по графику $Q_{ПС}(T)$, исходя из условия:

$$Q_{ПС}(T) = Q_H \cdot (1 - \Delta) . \qquad (8.7)$$

8.3.7. Определение температуры выбрасываемой в атмосферу газовой смеси:

$T_г = T - 273$, °С.

РАСЧЕТ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА (П. 6.1)

1. Расчет плотности $\rho_г$ (кг/м^3) ПНГ по объемным долям V_i (% об.) (п. 6.1.1) и плотности ρ_i (кг/м^3) (таблица 3 Приложения А1) компонентов:

$$\rho_Г = 0.01 \cdot \sum_i V_i \cdot \rho_i \,. \qquad (1)$$

2. Расчет условной молекулярной массы ПНГ $\mu_г$, кг/моль (п. 6.1.2):

$$\mu_Г = 0.01 \cdot \sum_i V_i \cdot \mu_i \,, \qquad (2)$$

где μ_i - молекулярная масса i -го компонента ПНГ (таблица 2 Приложения А1).

3. Расчет массового содержания химических элементов в попутном газе (п. 6.1.3):

Массовое содержание j-го химического элемента в ПНГ σ_j (% масс.) рассчитывается по формуле:

$$\delta_j = \sum_i \delta_i \cdot \delta_{ij} \,, \qquad (3)$$

где δ_{ij} - содержание (% масс.) химического элемента j в i -том компоненте ПНГ (таблица 4 Приложения А1);

δ_i - массовая доля i-го компонента в ПНГ; δ_i рассчитывается по формуле:

$$\delta_i = 0.01 \cdot V_i \cdot \frac{\rho_i}{\rho_Г} \,. \qquad (4)$$

Примечание : если выбросы углеводородов определяются в пересчете на метан, вычисляется также массовая доля углеводородов , пересчитанных на метан:

$$\delta(\sum_{CH_4}) = \sum \delta_i \cdot \frac{\mu_i}{\mu_{CH_4}} \qquad (5)$$

При этом суммирование осуществляется только по углеводородам, не содержащим серу.

4. Расчет числа атомов элементов в условной молекулярной формуле попутного газа (п. 6.1.4):

Количество атомов j-го элемента K_j рассчитывается по формуле:

$$K_j = 0.01 \cdot \frac{\delta_j}{\mu_j} \cdot \mu_\Gamma . \qquad (6)$$

Условная молекулярная формула попутного нефтяного газа записывается в виде:

$$C_cH_hS_sN_nO_o, \qquad (7)$$

где $_c = K_{c,\ h} = K_{h,\ s} = K_{s,\ n} = K_{n,\ o} = K_o$, рассчитываются по формуле (6).

Приложение А1.

Справочные данные, необходимые для расчетов физико-химических характеристик попутного нефтяного газа

1. Атомные массы химических элементов, входящих в состав попутного газа.

Таблица 1

Химический элемент	Углерод C	Водород H	Сера S	Азот N	Кислород 0
Атомная масса	12.011	1.008	32.066	14.008	16.000

2. Молекулярные массы основных компонентов ПНГ и коэффициенты r_i пересчета углеводородов на метан

Таблица 2

Компонент	Метан CH_4	Этан C_2H_6	Пропан C_3H_8	n-, i-бутан C_4H_{10}	Пентан C_5H_{12}	Гексан C_6H_{14}	Гептан C_7H_{16}	Сероводород H_2S	Диоксид углерода CO_2	Азот N_2
Молекулярная масса μ_i кг/моль	16.043	30.07	44.097	58.124	72.151	86.066	100.077	34.082	44.011	28.016
$r_i = \mu_i/\mu_{CH4}$	1.00	1.87	2.75	3.62	4.50	5.36	6.24			

3. Плотность ρ_i (кг/м) основных компонентов ПНГ

Таблица 3

Компонент	Метан CH_4	Этан C_2H_6	Пропан C_3H_8	n-, i- бутан C_4H_{10}	Пентан C_5H_{12}	Гексан C_6H_{14}	Гептан C_7H_{16}	Сероводород H_2S	Диоксид углерода CO_2	Азот N_2
Плотность ρ_i, кг/м^3	0.716	1.342	1.969	2,595	3.221	3.842	4.468	1.522	1.965	1.251

4. Содержание (% масс.) химических элементов в основных компонентах ПНГ.

Таблица 4

Компонент	Содержание химических элементов в компонентах (% масс)				
	C	H	S	O	N
CH_4	74.87	25.13	-	-	-
C_2H_6	79.89	20.11	-	-	-
C_3H_8	81.71	18.29	-	-	-
C_4H_{10}	82.66	17.34	-	-	-
C_5H_{12}	83.24	16.76	-	-	-
C_6H_{14}	83.73	16.27	-	-	-
C_7H_{16}	84.01	15.99	-	-	-
H_2S	-	5.92	94.08	-	-
CO_2	27.29	-	-	72.71	-
N_2	-	-	-	-	100

Приложение А2.

Примеры расчетов физико-химических характеристик попутного нефтяного газа.

Попутный нефтяной газ Южно-Сургутского месторождения

(бессернистый)

Компонентный состав V_i (% об):

Таблица 1.1

Компонент	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	iC_4H_{10}	nC_4H_{10}	iC_5H_{12}	nC_5H_{12}	CO_2	N_2
V_i (% об)	88.47	1.78	2.50	0.77	1.49	0.34	0.32	0.15	1.07

Расчет плотности $\rho_г$ (кг/м^3)

Таблица 1.2.

Компонент	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	iC_4H_{10}	nC_4H_{10}	iC_5H_{12}	nC_5H_{12}	CO_2	N_2
$0.01 \cdot V_i \cdot \rho_i$	0.634	0.038	0.091	0.021	0.040	0.012	0.011	0.003	0.013

$$\rho_Г = 0.01 \cdot \sum_i V_i \cdot \rho_i = 0.863 \text{ кг/м}^3.$$

Расчет условной молекулярной массы $\mu_г$ (кг/моль)

Таблица 1.3

Компонент	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	iC_4H_{10}	nC_4H_{10}	iC_5H_{12}	nC_5H_{12}	CO_2	N_2
$0.01 \cdot V_i \cdot \mu_i$	14.193	0.535	1.984	0.448	0.866	0.245	0.231	0.066	0.3

$$\mu_Г = 0.01 \cdot \sum_i V_i \cdot \mu_i = 18.868 \text{ кг/моль}.$$

Расчет массового содержания химических элементов в ПНГ.

Таблица 1.4

Компонент	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	iC_4H_{10}	nC_4H_{10}	iC_5H_{12}	nC_5H_{12}	CO_2	N_2
$\delta_i = 0.01 \cdot \frac{V_i \cdot \rho_i}{\rho_Г}$	0.735	0.044	0.109	0.024	0.047	0.014	0.013	0.003	0.016

Таблица 1.5

Компонент		CH_4	C_2H_6	C_3H_8	iC_4H_{10}	nC_4H_{10}	iC_5H_{12}	nC_5H_{12}	CO_2	N_2	$\sum$
$\delta_j = \sum_i \delta_i \cdot \delta_{ij}$	C	55.03	3.52	8.91	1.98	3.89	1.17	1.08	0.08	-	75.66
	H	18.47	0.88	1.99	0.42	0.81	0.23	0.22	-	-	23.02
	N	-	-	-	-	-	-	-	-	1.6	1.60
	O	-	-	-	-	-	-	-	0.22	-	0.22

Расчет числа атомов элементов в условной молекулярной формуле попутного нефтяного газа Южно-Сургутского месторождения.

Таблица 1.6

Элемент	C	H	N	O
$K_j = 0.01 \cdot \frac{\delta_j}{\mu_j} \cdot \mu_\Gamma$	1.207	4.378	0.0219	0.0027

Условная молекулярная формула ПНГ Южно-Сургутского месторождения:

$$C_{1.207}H_{4.378}N_{0.0219}O_{0.0027}$$

Уточним условную молекулярную массу:

$$\mu_\Gamma = \sum K_j \cdot \mu_j = 19.260$$

Приложение Б.

Расчет физико-химических характеристик влажного воздуха для заданных метеоусловий (п.6.2)

1. Условная молекулярная формула для сухого воздуха

$$O_{0.421}N_{1.586}, \qquad (1)$$

чему соответствует условная молекулярная масса

$$\mu_{C.B.} = 28.96 \text{ кг/моль}$$

и плотность

$$\rho_{C.B.} = 1.293 \text{ кг/м}^3.$$

2. Массовое влагосодержание влажного воздуха d (кг/кг) для заданной относительной влажности φ и температуры t, ^{0}C при нормальном атмосферном давлении определяется по номограмме Приложения Б1 (п. 6.2.1).

3. Массовые доли компонентов во влажном воздухе (п. 6.2.2):

- сухого воздуха $\delta_{C.B.} = \frac{1}{1+d}$; (2)

- влаги (H_2O) $\delta_{H_2O} = \frac{1}{1+d}$. (3)

4. Содержание (% масс.) химических элементов в компонентах влажного воздуха.

Таблица 1.

Компонент	Содержание химических элементов (% масс)		
	O	N	H
Сухой воздух $O_{0.421}N_{1.586}$	23.27	76.73	-
Влага H_2O	88.81	-	11.19

5. Массовое содержание (% масс.) химических элементов во влажном воздухе с влагосодержанием d

Таблица 2.

Компонент		Сухой воздух $O_{0.421}N_{1.586}$	Влага H_2O	Σ
δ_i	O	$\frac{23.27}{1+d}$	$\frac{88.81 \cdot d}{1+d}$	$\frac{23.27+88.81 \cdot d}{1+d}$
	N	$\frac{76.73}{1+d}$	-	$\frac{76.73}{1+d}$
	H	-	$\frac{11.19 \cdot d}{1+d}$	$\frac{11.19 \cdot d}{1+d}$

6. Количество атомов химических элементов в условной молекулярной формуле влажного воздуха (п. 6.2.3)

Таблица 3.

Элемент	O	N	H
K_j	$\frac{0.421+1.607 \cdot d}{1+d}$	$\frac{1.586}{1+d}$	$\frac{3.215 \cdot d}{1+d}$

Условная молекулярная формула влажного воздуха:

$$O_{Ko}N_{Kn}H_{Kh} \qquad (4)$$

7. Плотность влажного воздуха в зависимости от метеоусловий. При заданной температуре влажного воздуха t, °С, барометрическим давлении Р, мм. рт. ст. и относительной влажности φ плотность влажного воздуха рассчитывается по формуле:

$$\rho_{B.B.} = 1.293 \cdot \frac{(P - 0.3783 \cdot P_{\Pi}) \cdot 273.2}{760 \cdot (273.2+t)} = 0.4648 \cdot \frac{P - 0.3783 \cdot P_{\Pi}}{273.2+t} \qquad (5)$$

где $P_п$ - парциальное давление паров воды в воздухе, зависящее от t и φ; определяется по номограмме Приложения Б1.

Приложение Б1

Диаграммы «i-d» для влажного воздуха.

На диаграмму, на рис.1 нанесены изолинии энтальпий i, температур t, °С и относительной влажности φ, а также зависимости парциального давления водяного пара $P_п$ от влагосодержания d.

Диаграмма построена для давлений 745 ÷ 760 мм. рт. ст.

Точки диаграммы, лежащие на кривой φ = 1 (100%), определяют состояние насыщенного воздуха. Точки, лежащие под кривой φ = 1, соответствуют состоянию насыщенного воздуха, содержащего, кроме насыщенного пара, частицы капельно-жидкой воды или льда. Точки, лежащие над кривой φ = 1, характеризуют состояние насыщенного воздуха.

Под кривой φ = 1 и над изотермой t = 0° С находится область тумана; по другую сторону изотермы t = 0° С, ниже ее, расположена область ледяного тумана.

Приложение Б2

Пример расчета физико-химических характеристик влажного воздуха для заданных метеоусловий.

Заданы температура t = 20° С, относительная влажность φ = 0.60 (60%) воздуха и давление Р = 760 мм рт. ст.

По номограмме (Приложение Б1) определяется влагосодержание d = 0.0087 кг/кг и парциальное давление водяного пара $P_п$ = 11 мм. рт. ст.

Расчет количества атомов химических элементов в условной молекулярной формуле влажного воздуха:

$$K_0 = \frac{0.421 + 1.607 \cdot d}{1 + d} = 0.431;$$

$$K_n = \frac{1.586}{1 + d} = 1.572$$

$$K_0 = \frac{3.215 \cdot d}{1 + d} = 0.028$$

Условная молекулярная формула влажного воздуха для заданных метеоусловий:

$$O_{0.431} N_{1.572} H_{0.028}$$

Плотность влажного воздуха:

$$\rho_{В.В.} = 0.4648 \cdot \frac{P - 0.3783 \cdot P_П}{273.2 + t} = 1.20 \text{ кг/м}^3$$

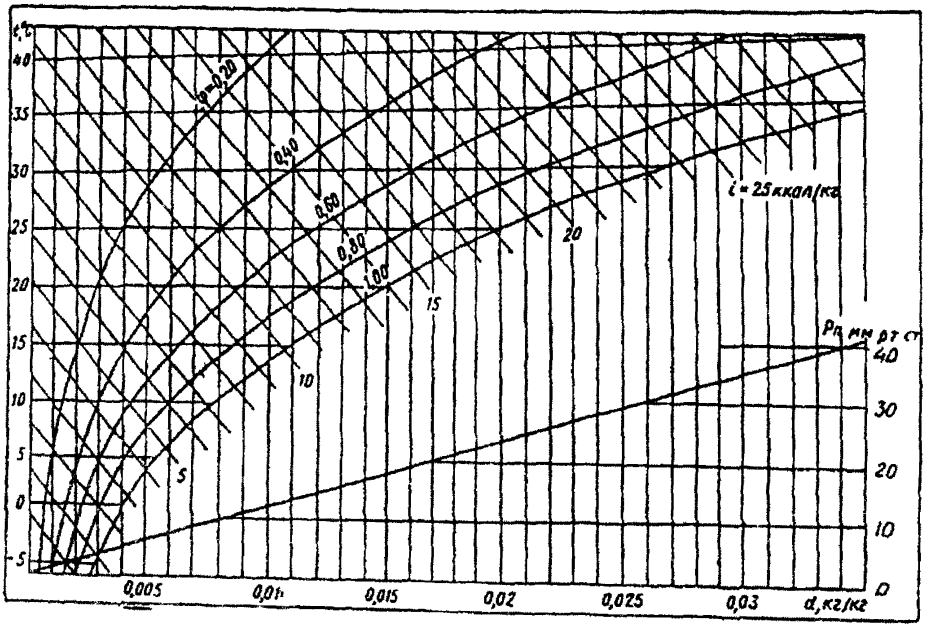


Рис. 1. Диаграмма характеристик влажного воздуха при нормальном атмосферном давлении.

t, ^{0}C – температура,
φ - относительная влажность,
i – энтальпия, Ккал/кг,
d - влагосодержание кг/кг,
$P_п$ - парциальное давление водяного пара, мм. рт. ст.

Приложение В.

Расчет стехиометрической реакции горения попутного нефтяного газа в атмосфере влажного воздуха (п.6.3).

1. Стехиометрическая реакция горения записывается в виде:

$$C_c H_h S_s N_n O_o + MO_{Ko} N_{Kn} H_{Kh} = n_{CO_2} CO2 + n_{H_2O} H_2O + n_{SO_2} SO_2 + n_{N_2} N_2 \quad (1)$$

2. Расчет мольного стехиометрического коэффициента М по условию полного насыщения валентности (полностью завершенной реакции окисления):

$$M = \frac{\sum_j k_j \cdot \upsilon_j}{\sum_j k_j' \cdot \upsilon_j'}, \quad (2)$$

где υ_j' и υ_j - валентности элементов i и j' , входящих в состав влажного воздуха и ПНГ;

k_j' и k_j - количества атомов элементов в условных молекулярных формулах влажного воздуха и газа (Приложения А и Б).

3. Определение теоретического количества влажного воздуха $V_{в.в.}$ ($м^3/м^3$), необходимого для полного сгорания 1 $м^3$ ПНГ.

В уравнении стехиометрической реакции горения мольный стехиометрический коэффициент М является и коэффициентом объемных соотношений между горючим (попутный нефтяной газ) и окислителем (влажный воздух); для полного сгорания 1 $м^3$ ПНГ требуется М $м^3$ влажного воздуха.

4. Расчет количества продуктов сгорания $V_{пс}$ ($м^3/м^3$), образующихся при стехиометрическом сгорании 1 м3 ПНГ в атмосфере влажного воздуха:

$$V_{ПС} = c + s + 0.5\left[h + n + M(k_h + k_n)\right], \quad (3)$$

где c, s, h, n и k_h, k_n соответствуют условным молекулярным формулам ПНГ и влажного воздуха соответственно.

Приложение В1.

Справочные данные, необходимые для расчетов тепло-физических характеристик попутного нефтяного газа.

1. Показатель адиабаты К для компонентов ПНГ.

Таблица 1.

Компонент	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	C_6H_{14}	C_7H_{16}	CO_2	N_2	H_2S
Показатель адиабаты К	1.31	1.21	1.13	1.10	1.08	1.07	1.06	1.30	1.40	1.34

2. Низшая теплота сгорания горючих компонентов ПНГ Q_{Hi}, Ккал/м^3

Таблица 2.

Компонент	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	C_6H_{14}	C_7H_{16}	CO_2
Q_{Hi}, Ккал/м^3	8555	15226	21795	28338	34890	44700	51300	5585

3. Средние массовые изобарные теплоемкости составляющих продуктов сгорания, определяемые в интервале от 293 °К до Т °К (Ккал/кг·град).

Таблица 3.

Компонент		CO_2	H_2O	CO	NO	N_2	O_2	CH_4	H_2S
Температура Т° К	1100	0.263	0.500	0.266	0.254	0.263	0.244	0.844	0.280
	1500	0.279	0.543	0.276	0.263	0.273	0.252	0.967	0.302
	1900	0.289	0.563	0.283	0.269	0.280	0.258	1.060	0.323
	2300	0.297 ;	0.589	0.288	0.274	0.285	0.263	1.132	0,345

Приложение В2.

Примеры расчетов

Расчет стехиометрической реакции горения попутного нефтяного газа в атмосфере влажного воздуха

Пример 1.

Попутный нефтяной газ Южно-Сургутского месторождения

$$C_{1.207}H_{4.378}N_{0.0219}O_{0.0027}$$

сгорает в атмосфере влажного воздуха

$$O_{0.431}N_{1.572}H_{0.028}(t = 20^{\circ}C, \varphi = 60\%)$$

в соответствии со стехиометрической реакцией:

$$C_{1.207}H_{4.378}N_{0.219}O_{0.0027} + MO_{0.431}N_{1.572}H_{0.028} =$$
$$= n_{CO_2}CO_2 + n_{H_2O}H_2O + n_{N_2}N_2 \qquad (1.1)$$

Расчет мольного стехиометрического коэффициента М:

$$M = -\frac{-4 \cdot 1.207 - 1 \cdot 4.378 + 2 \cdot 0.0027}{2 \cdot 0.431 - 1 \cdot 0.028} = 11.03 \qquad (1.2)$$

Теоретическое количество влажного воздуха, необходимое для полного сгорания 1 м^3 ПНГ Южно-Сургутского месторождения, составляет 11.03 м^3.

$$n_{CO_2} = c = 1.207;$$
$$n_{H_2O} = 0.5 \cdot (h + Mk_h) = 2.344;$$
$$n_{N_2} = 0.5 \cdot (n + Mk_n) = 8.681.$$

Объем продуктов сгорания при стехиометрическом горении равен:

$$V_{ПС} = c + s + 0.5\left[h + n + M(k_h + k_n)\right] =$$
$$= 1.207 + 0.5\left[4.378 + 0.0219 + 11.03 \cdot (0.028 + 1.572)\right] = 12.23 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Пример 2.

Попутный нефтяной газ Бугурусланского месторождения (сероводородсодержащий) $C_{1.489}H_{4.943}S_{0.0110}O_{0.0160}$ сгорает в атмосфере влажного воздуха $O_{0.431}N_{1.572}H_{0.028}$ (t = 20^0 С, φ = 60%) в соответствии со стехиометрической реакцией:

$$C_{1.489}H_{4.943}S_{0.0110}O_{0.0160} + MO_{0.431}N_{1.572}H_{0.028} =$$
$$= n_{CO_2}CO_2 + n_{H_2O}H_2O + n_{N_2}N_2 \qquad (2.1)$$

Расчет мольного стехиометрического коэффициента М:

$$M = -\frac{-4 \cdot 1.489 - 1 \cdot 4.943 - 2 \cdot 0.0110 + 2 \cdot 0.0160}{2 \cdot 0.431 - 1 \cdot 0.028} = 13.056 \qquad (2.2)$$

$$n_{CO_2} = c = 1.489;$$

$$n_{H_2O} = 0.5 \cdot (h + Mk_h) = 2.660;$$

$$n_{S_2O} = s = 0.011;$$

$$n_{N_2} = 0.5 \cdot (n + Mk_n) = 10.576.$$

Теоретическое количество влажного воздуха, необходимое для полного сгорания 1м^3 ПНГ Бугурусланского месторождения, составляет 13.056 м^3.

Объем продуктов сгорания при стехиометрическом горении равен:

$$V_{ПС} = 1.489 + 0.0110 + 0.5 \cdot [4.943 + 13.056 \cdot (0.028 + 1.572)] =$$

$= 14.74$ м^3/м^3.

Приложение Г.

Расчет скорости распространения звука в сжигаемой газовой смеси $U_{зв}$ (м/с) (п.6.4)

Скорость распространения звука в сжигаемой газовой смеси $U_{зв}$ (м/с) рассчитывается по формуле:

$$U_{ЗВ} = 91.5 \cdot \left[K \cdot \frac{(T_0 + 273)}{\mu_Г} \right]^{0.5}$$

(1)

где T_0, °С - температура ПНГ;

$\mu_Г$ - условная молекулярная масса сжигаемой газовой смеси;

K - показатель адиабаты для сжигаемой газовой смеси или определяется по графикам на рис. 2 – 3 Приложения Г, где расчеты произведены для четырех значений T_0,°С (0° С; 10° С; 20° С и 30° С).

Показатель адиабаты К для ПНГ рассчитывается по значениям показателя адиабаты K_i для компонентов (таблица 1 Приложения В1) как средневзвешенное

$$K = 0.01 \cdot \sum_i V_i \cdot K_i , \qquad (2)$$

где V_i (% об.) - **объемная доля i-го компонента ПНГ.**

Приложение Г1.

Пример расчета скорости распространения звука в сжигаемой газовой смеси изв (м/с)

Попутный нефтяной газ Южно-Сургутского месторождения. Компонентный состав V_j (%об.) - см. таблицу 1.1. Приложения А2. Показатель адиабаты

$$K = 0.01 \cdot \sum_i V_i \cdot K_i = 1.292$$

Скорость распространения звука при T_0 = 20° С:

$$U_{ЗВ} = 91.5 \cdot \left[K \cdot \frac{(T_0 + 273)}{\mu_\Gamma} \right]^{0.5} = 406 \text{ м/с}$$

(μ_Γ = 19.210, см. таблицу 1.3. Приложения А2.)

Такое же значение $U_{зв}$ дает график Приложения Г для T_0 = 20° С.

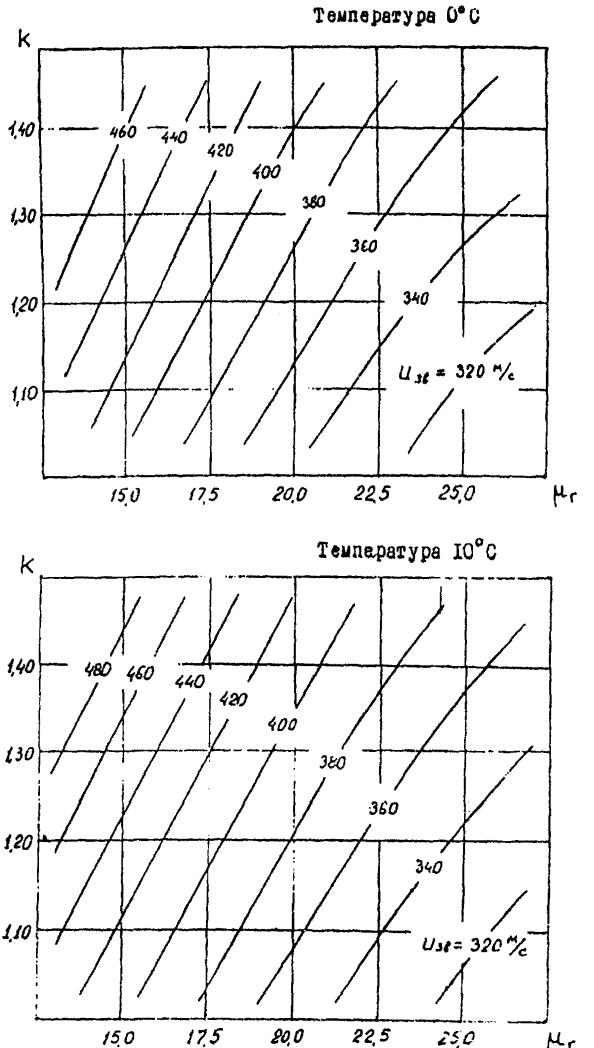


Рис. 2. Скорость звука в сжигаемой смеси

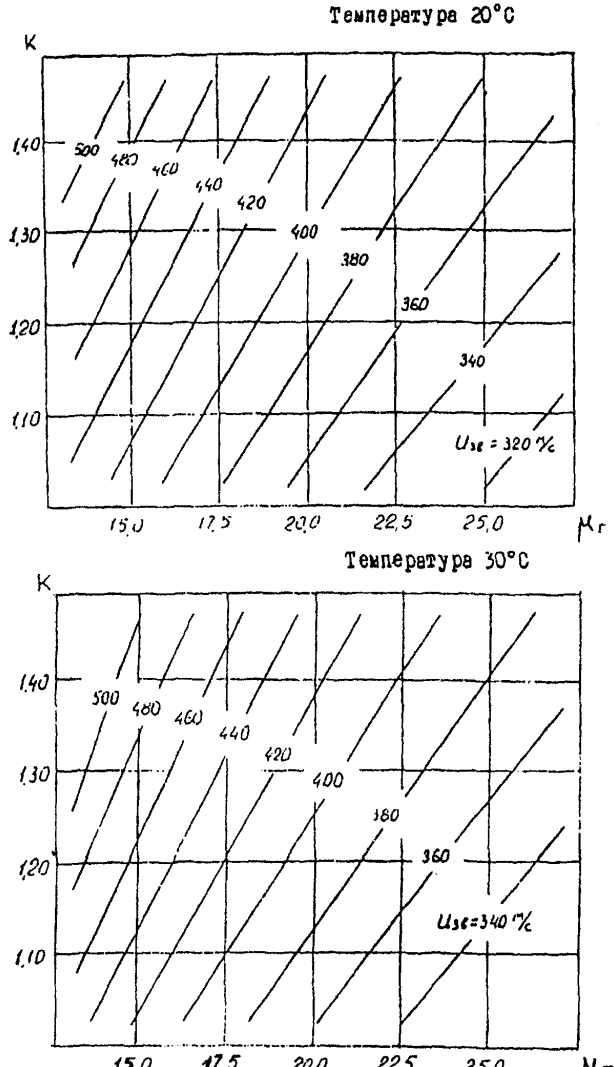


Рис. 3 - Скорость звука в сжигаемой смеси.

Примеры расчета выбросов вредных веществ при сжигании попутного нефтяного газа

1. Попутный нефтяной газ Южно-Сургутского месторождения. Объемный расход газа W_v = 432 000 м^3/сутки = 5 м^3/с. Сжигание бессажевое. Плотность газа (см. приложение А) $\rho_г$=0.863 кг/м3. Массовый расход равен (5.2.1):

$$W_g = 3600 \cdot \rho_Г \cdot W_V = 15534 \text{ (кг/час).}$$

В соответствие с формулой (7.1.1) и таблицей 6.1 выбросы вредных веществ в г/с составляют:

CO - 86.2 г/с; NO_X - 12.96 г/с;

бенз(а)пирен - $0.1 \cdot 10^{-6}$ г/с .

Для вычисления выбросов углеводородов в пересчете на метан определяется массовая их доля, исходя из таблиц А.2 и А.1.6. Она равна 120 %. Недожог равен $6 \cdot 10^{-4}$. Таким образом выброс метана составляет:

$0.01 \cdot 6 \cdot 10^{-4} \cdot 120 \cdot 15534$ = 11.2 г/с;

Сера в ПНГ отсутствует.

2. Попутный нефтяной газ Бугурусланского месторождения с условной молекулярной формулой $C_{1.489}H_{4.943}S_{0.011}O_{0.016}$. Объемный расход газа W_v = 432 000 м^3/сутки = 5 м/с. Факельное устройство не обеспечивает бессажевого горения. Плотность газа (см. приложение А) $\rho_г$ = 1.062 кг/м^3. Массовый расход равен (5.2.1):

$$W_g = 3600 \cdot \rho_Г \cdot W_V = 19116 \text{ (кг/час).}$$

В соответствие с формулой (7.1.1) и таблицей 6.1 выбросы вредных веществ в г/с составляют:

CO - 1328 г/с; NO_X - 10.62 г/с; бенз(а)пирен - $0.3 \cdot 10^{-6}$ г/с.

Выбросы сернистого ангидрида определяются по формуле (6.2), в которой s = 0.011, $\mu_г$ = 23.455, μ_{SO_2} = 64. Отсюда

$$M_{SO_2} = 0.278 \cdot 0.03 \cdot 19116 = 159.5 \text{ г/с.}$$

В данном случае недожог равен 0.035. Массовое содержание сероводорода 1.6%. Отсюда

$$M_{H_2S} = 0.278 \cdot 0.035 \cdot 0.01 \cdot 1.6 \cdot 19116 = 2.975 \text{ г/с.}$$

Выбросы углеводородов определяются аналогично примеру 1.

Приложение Е.

Расчет удельных выбросов CO2 , H2 O, N2 и O2 на единицу массы сжигаемого попутного нефтяного газа (кг/кг)

1. Удельный выброс диоксида углерода рассчитывается по формуле:

$$q_{CO_2} = \mu_{CO_2}\left(\frac{c}{\mu_\Gamma} - \frac{q_{CH_4}}{\mu_{CH_4}} - \frac{q_{CO}}{\mu_{CO}}\right) \quad (1)$$

где μ_{CO_2}, μ_{CH_4}, μ_{CO} - молекулярные массы соответствующих газов (Приложение А1);

μ_Γ - условная молекулярная масса ПНГ (Приложение А1);

c - количество атомов углерода в условной молекулярной формуле ПНГ (Приложение А) .

2. Удельный выброс водяного пара H_2O:

$$q_{H_2O} = 0.5 \cdot \mu_{H_2O} \cdot \left[\frac{1}{\mu_\Gamma} \cdot (h + \alpha \cdot M \cdot K_h) - \frac{q_{CH_4}}{\mu_{CH_4}}\right], \quad (2)$$

где μ_{H_2O} и μ_{CH_4} - молекулярные массы H_2O и CH_4;

μ_Γ - условная молекулярная масса ПНГ;

h - количество атомов водорода в условной молекулярной формуле ПНГ;

α - коэффициент избытка влажного воздуха;

M - мольный стехиометрический коэффициент (Приложение В);

K_h - количество атомов водорода в условной молекулярной формуле влажного воздуха (Приложение Б).

3. Удельный выброс азота N_2:

$$q_{N_2} = \mu_{N_2} \cdot \left[\frac{1}{\mu_\Gamma} \cdot (n + \alpha \cdot M \cdot K_n) - \frac{q_{NO}}{\mu_{NO}}\right], \quad (3)$$

4 . Удельный выброс кислорода O_2:

$$q_{O_2} = \mu_{O_2} \cdot \left[\frac{1}{\mu_\Gamma} \cdot (O + \alpha \cdot M \cdot K_O) - 2 \cdot \frac{q_{CO_2}}{\mu_{CO_2}} - \frac{q_{H_2O}}{\mu_{H_2O}} - 2 \cdot \frac{q_{SO_2}}{\mu_{SO_2}} - \frac{q_{CO}}{\mu_{CO}} - \frac{q_{NO}}{\mu_{NO}}\right] \quad (4)$$

Примечания:

1. Обозначения, принятые в (2) и (3) аналогичны обозначениям, принятым в (1).

2. q_{CO_2}, q_{H_2O}, q_{SO_2}, q_{CO}, q_{NO} - см- Приложение Д и формулу (1) настоящего Приложения.

Приложение Е1.

Примеры расчетов

Расчет удельных выбросов CO2, H2O, N2 и O2 на единицу массы сжигаемого попутного нефтяного газа (кг/кг)

Пример 1.

Попутный нефтяной газ Южно-Сургутского месторождения с условной молекулярной формулой $C_{1.207}H_{4.378}N_{0.0219}O_{0.0027}$ (Приложение А2) сжигается в атмосфере влажного воздуха с условной молекулярной формулой $O_{0.431}N_{1.572}H_{0.028}$ (Приложение Б2) при α = 1.0.

Мольный стехиометрический коэффициент *M* = 11.03 (Приложение В2).

Удельный выброс диоксида углерода (формула (2) Приложения Е):

$$q_{CO_2} = 44.011 \cdot \left(\frac{1.207}{19.260} - \frac{5 \cdot 10^{-4}}{16.043} - \frac{2 \cdot 10^{-2}}{28.011} \right) = 2.725$$

Удельный выброс водяного пара H_2O:

$$q_{H_2O} = 0.5 \cdot 18.016 \cdot \left[\frac{1}{19.26} \cdot (4.378 + 11.03 \cdot 0.028) - \frac{5 \cdot 10^{-4}}{16.043} \right] = 2.192$$

Удельный выброс азота N_2:

$$q_{N_2} = 28.016 \cdot \left[\frac{1}{19.26} \cdot (0.0219 + 11.03 \cdot 1.572) - \frac{3 \cdot 10^{-3}}{30.008} \right] = 25.251$$

Удельный выброс кислорода O_2:

$$q_{O_2} = 32 \cdot \left[\frac{1}{19.26} \cdot (0.0027 + 11.03 \cdot 0.431) - 2 \cdot \frac{2.725}{44.011} - \frac{2192}{18.016} - \frac{2 \cdot 10^{-2}}{28.011} - \frac{3 \cdot 10^{-3}}{30.008} \right] = 0.022$$

Пример 2.

Попутный нефтяной газ Бугурусланского месторождения с условной молекулярной формулой $C_{1.489}H_{4.943}S_{0.011}O_{0.016}$. Условия сжигания газа те же, что и в примере 1. Удельный выброс диоксида углерода (формула (2) Приложения Д).

$$q_{CO_2} = 44.011 \cdot \left(\frac{1.489}{23.476} - \frac{5 \cdot 10^{-4}}{16.043} - \frac{2 \cdot 10^{-2}}{28.011} \right) = 2.761$$

Удельный выброс водяного пара H_2O:

$$q_{H_2O} = 0.5 \cdot 18.016 \cdot \left[\frac{1}{23.476} \cdot (4.943 + 13.455 \cdot 0.028) - \frac{5 \cdot 10^{-4}}{16.043} \right] = 2.041$$

Удельный выброс азота N_2:

$$q_{N_2} = 28.016 \cdot \left[\frac{1}{23.476} \cdot (13.455 \cdot 1.572) - \frac{3 \cdot 10^{-3}}{30.008} \right] = 25.238$$

Удельный выброс кислорода O_2:

$$q_{O_2} = 32 \cdot \left[\frac{1}{23.476} \cdot 13.455 \cdot 0.431 - 2 \cdot \frac{2.761}{44.011} - \frac{2.041}{18.016} - 2 \cdot \frac{0.030}{64.066} - \frac{2 \cdot 10^{-2}}{28.011} - \frac{3 \cdot 10^{-3}}{30.008} \right] = 0.208$$

Приложение Ж.

Расчет длины факела

Длина факела ($L_ф$) рассчитывается по формуле:

$$L_\phi = 5.3 \cdot d_0 \cdot \sqrt{\frac{T_\Gamma}{T_0}} \cdot \sqrt{(1 + V_0) \cdot \left(1 + V_{B.B.} \cdot \frac{\rho_{B.B.}}{\rho_\Gamma} \right)}, \qquad (1)$$

где d_0 - диаметр устья факельной установки, м;

$T_г$ - температура горения, °К (п. 8.3)

T_0 - температура сжигаемого ПНГ, °К;

$V_{ВВ}$ - теоретическое количество влажного воздуха, необходимое для полного сгорания 1 м^3 ПНГ (Приложение В), м^3/м^3;

$\rho_{В.В.}$ и $\rho_Г$ - плотность влажного воздуха (Приложение Б) и ПНГ (Приложение А);

V_0 - стехиометрическое количество сухого воздуха для сжигания 1 м^3 ПНГ, м^3/м^3:

$$V_0 = 0.0476 \cdot \left\{ 1.5 \cdot [H_2S]_0 + \sum_{i=1}^{N} (x + \frac{y}{4}) \cdot [C_x H_y]_0 - [O_2]_0 \right\}$$

где $[H_2S]_0$, $[C_x H_y]_0$, $[O_2]_0$ - содержание сероводорода, углеводородов, кислорода, соответственно, в сжигаемой углеводородной смеси, % об.

На рис. 4 - 5 изображены номограммы для определения длины факела ($L_Ф$), отнесенной к диаметру устья факельной установки (d), в зависимости от $T_Г/T_0$, $V_{ВВ}$ и $\frac{\rho_{В.В.}}{\rho_Г}$. Для четырех фиксированных значений $T_Г/T_0$ при диапазонах варьирования $V_{ВВ}$ от 8 до 16 и $\frac{\rho_{В.В.}}{\rho_Г}$ от 0.5 до 1.0.

Приложение Ж1.

Пример расчета длины факела для Южно-Сургутского месторождения.

Температура горения (см. Приложение И) = 1913 К°;

Температура сжигаемого газа = 293 К°;

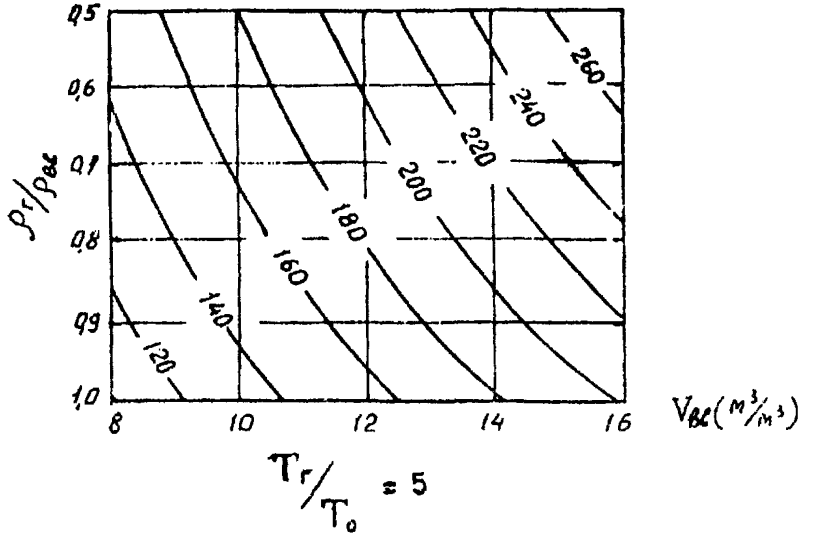
$V_{ВВ}$ (см. Приложение В2) = 11.03 м3/м 3;

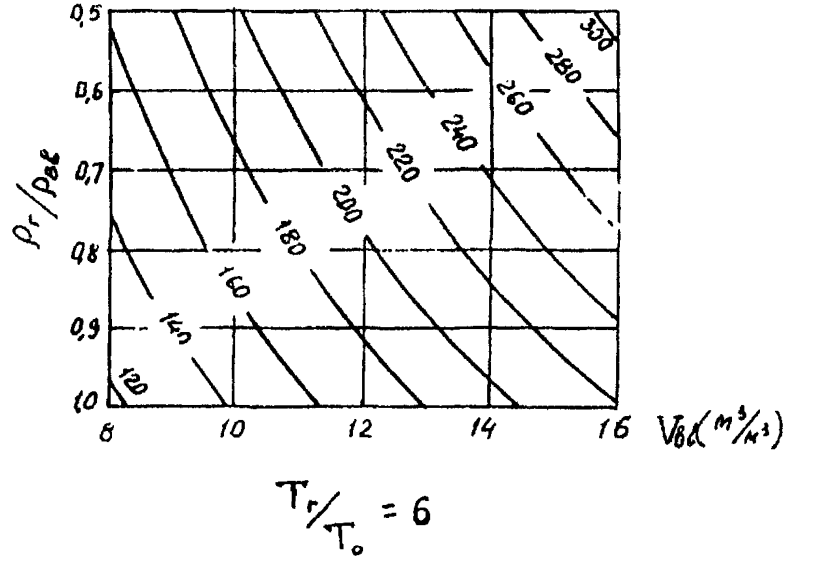
Плотность ПНГ (Приложение А2) = 0.863 (кг/м^3);

Плотность влажного воздуха (Приложение Б2) = 1.20 (кг/м^3).

На основании формулы (1) отношение длины факела к диаметру устья факельной установки:

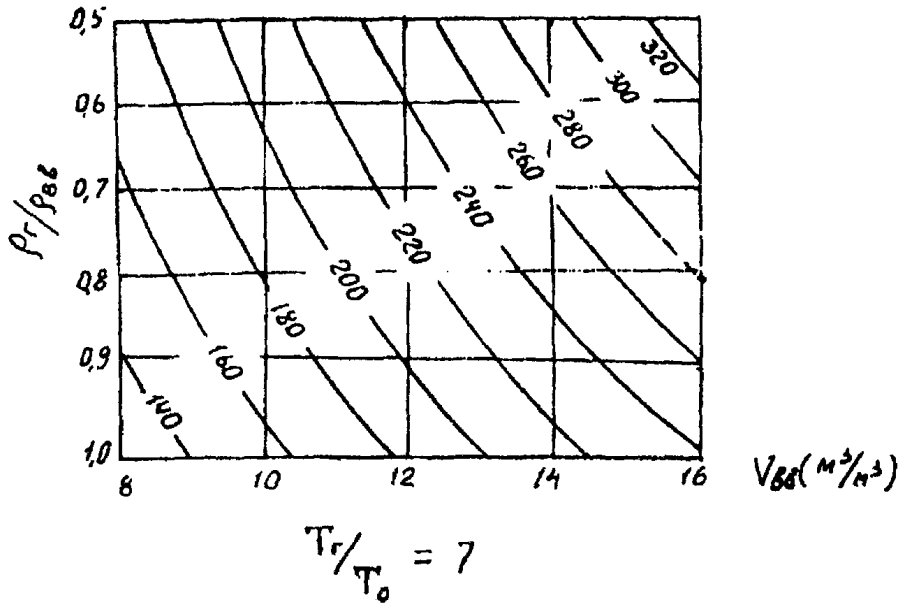
$$\frac{L_Ф}{d_0} = 190$$

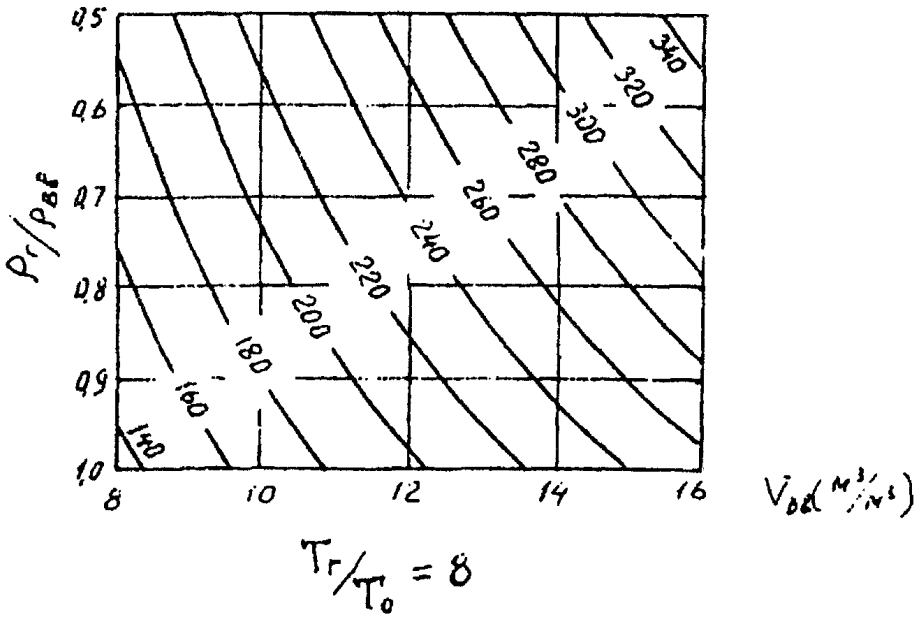




Относительная длина факела $\frac{L_ф}{d_0}$

Рис. 4





Относительная длина факела $\frac{L_ф}{d_0}$

Рис. 5

Приложение 3

Расчет низшей теплоты сгорания попутного нефтяного газа $Q_н$ (Ккал/м^3)

Низшая теплота сгорания ПНГ $Q_н$ (Ккал/м^3) рассчитывается как средневзвешенная сумма низших теплот сгорания горючих газов, входящих в его состав:

$$Q_H = 0.01 \cdot \sum_i V_i \cdot Q_{Hi}, \quad (1)$$

где V_i - содержание i-го горючего компонента (% об.) в ПНГ; Q_{Hi} - низшая теплота сгорания *i*-го горючего компонента или по формуле:

$$Q_H = 85.5 \cdot [CH_4]_0 + 152 \cdot [C_2H_6]_0 + 218 \cdot [C_3H_8]_0 + 283 \cdot [C_4H_{10}]_0 + 349 \cdot [C_5H_{12}]_0 + 56[H_2S]_0 \quad (2)$$

Величины Q_{Hi} приведены в таблице 2 Приложения В1.

Приложение 3.1.

Пример расчета низшей теплоты сгорания попутного нефтяного газа

Попутный нефтяной газ Южно-Сургутского месторождения. Компонентный состав V_i (% об.) - см. Приложение А2.

Таблица 1

Компонент	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}
$0.01 \cdot V_i \cdot Q_{Hi}$	7569	423	981	640	230

$$Q_H = 0.01 \cdot \sum_i V_i \cdot Q_{Hi} = 9843 \text{ Ккал/м}^3.$$

Пример расчета температуры выбрасываемой в атмосферу газовой смеси

Попутный нефтяной газ Южно-Сургутского месторождения. Низшая теплота сгорания Q_H = 9843 Ккал/м^3. (Приложение 3.1). Доля энергии, теряемой за счет радиации факела:

$$\Delta = 0.048 \cdot \mu_\Gamma^{0.5} = 0.21 \qquad \mu_\Gamma = 19.260.$$

Расчет количества теплоты в продуктах сгорания для трех значений температуры:

T = 1500 °K	$Q_{ПС}$ = 5576 Ккал
T = 1900 °K	$Q_{ПС}$ = 7708 Ккал
T = 2300 °K	$Q_{ПС}$ - 9873 Ккал

График $Q_{ПС}$ (T) представлен на рис.6.

Величина $Q_H \cdot (1-\Delta)$ = 7776 Ккал.

По графику рис. 6 этому значению отвечает температура T = 1913 °K. В итоге, температура продуктов сгорания ПНГ Южно-Сургутского месторождения составляет $T_г$ = 1640° С.

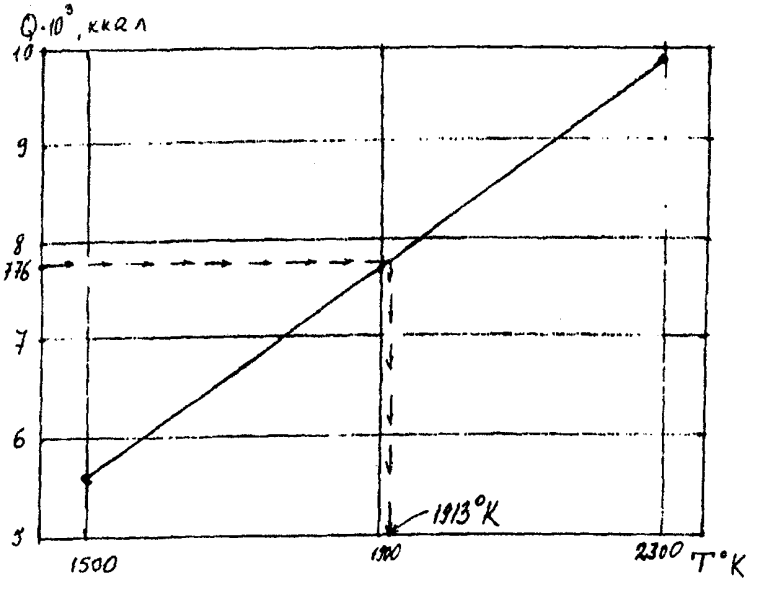


Рис. 6 Пример графического определения температуры продуктов сгорания /попутный нефтяной газ Южно-Сургутского месторождения/.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.М. Левин. Принципы рационального сжигания газа. Л., Недра, 1977.

2. Ф.А. Вильяме. Теория горения. М., Наука, 1971.

3. Д.М. Хзмалян, Я.А. Каган. Теория горения и топочные устройства. М., Энергия, 1976.

4. С.Л. Беренблюм, Э.М. Ривин. Методы расчета вредных выбросов в атмосферу из нефтехимического оборудования. Обзорная информация серии: охрана окружающей среды. ЦНИИТЭ-нефтехим, М., 1991.

5. Временные ведомственные нормы технологического проектирования по определению выбросов вредных веществ в атмосферу при проектировании и реконструкции нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий, ВНТП 30.81. - М., ВПО Союзнефтеоргсинтез, 1981.

6. Т.Т. Стрижевский, А.И. Эльнатанов. Факельные установки. М., Химия, 1979.

7. Сборник методик по расчету выбросов в атмосферу загрязняющих веществ различными производствами. М., Гидрометеоиздат, 1986.

8. И.Т. Гороновский, Ю.П. Назаренко, Е.Ф. Некряч. Краткий справочник по химии. Киев, Наукова думка, 1987.

9. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Под ред.акад. В.П.Глушко. Изд. АН СССР, 1962.

10. С.Л.Ривкин. Термодинамические свойства газов. М., Энергия, 1973.

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ ПО РАСЧЕТУ, НОРМИРОВАНИЮ И КОНТРОЛЮ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ, СПБ, НИИ АТМОСФЕРА, 2002 Г. (извлечение)

1.2.4. Сжигание попутного нефтяного газа.

При проведении расчетов выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от факельных установок [43] в зависимости от состава попутного нефтяного газа (ПНГ) необходимо учитывать физико-химические характеристики C_{6+} , если они присутствуют в заметных количествах, а следовательно, оказывают ощутимое влияние на величину рассчитываемых параметров (объем теоретически необходимого количества воздуха для полного сжигания ПНГ, теплоты сгорания ПНГ, температуры и габаритов факела и т.п.)

1. Общая формула низших предельных углеводородов (алканов) $C_n H_{2n+2}$ (где n- количество атомов углеродов в молекуле) и таблица 1 Приложения А1 позволяют рассчитать молекулярную массу любого члена гомологического ряда. Например, при n=6:

$$M_{C6} = 6 \cdot 12.011 + (2 \cdot 6 + 2) \cdot 1.008 = 86.178$$

где 12,011- масса углерода;

1,008- масса водорода.

$$M_{C7} = 7 \cdot 12.011 + (2 \cdot 7 + 2) \cdot 1.008 = 100.205$$ и т.д.

Плотность насыщенных паров углеводородов C_{6+} при нормальных условиях можно приближенно оценить по формуле:

$$p_i = \frac{M_i}{22.4} \qquad (1.11)$$

где 22,4 - объем 1 кг-моля *i*-го углеводорода, т.е.

p_{Cv} =86,178/22,4=3,847 кг/м^3

p_{Cv} =100,205/22,4=4,473 кг/м^3 и т.д.

Низшая теплота сгорания углеводородных конденсатов $Q_{нк}$ (Ккал/кг) находится из выражения:

$$Q_{HK} = 81 \cdot [C]_m + 300 \cdot [H]_m - 26 \cdot \{O\}_m - [S]_m\} - 6 \cdot \{[W]_m + 9 \cdot [H]_m\} \qquad (1.12)$$

где содержание углерода $[C]_m$, водорода $[H]_m$, кислорода $[O]_m$, серы $[S]_m$ и воды $[W]_m$ (влажность), в % мас., определяется расчетом по результатам лабораторного анализа.

2. Проверка условия бессажевого горения ПНГ проводится при сопоставлении $U_{зв}$ с линейной скоростью истечения ПНГ из устья сопла факела, $U_{ист}$, определяемой по формуле:

$$U_{ист} = 1.27 \cdot \frac{W_v}{d_0^2}, \text{ м/сек} \qquad (1.13)$$

где W_v - объемный расход ПНГ, $м^3$ /сек;

d_0 - диаметр выходного сопла факельной установки, м;

$U_{зв}$ - линейная скорость распространения звука в сжигаемом ПНГ.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИРОДООХРАННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Фирма «Интеграл» предлагает Вашему вниманию программное обеспечение для специалистов-экологов. Программные средства, разработанные фирмой, решают различные задачи, касающиеся вопросов охраны атмосферного воздуха и безопасного обращения с отходами производства и потребления.

Программы **прошли необходимые согласования** в НИИ Атмосфера, ГГО им. А.И. Воейкова, **сертифицированы** Госстандартом России.

Все программы, реализующие методики по расчету выбросов загрязняющих веществ от различных производств, **согласованы** НИИ Атмосфера в установленном порядке и **входят в список согласованных программ**, выпускаемый МПР РФ.

Программы широко используются во всех без исключения регионах России, а также в Белоруссии, Украине, Молдове, Казахстане, Азербайджане, Эстонии, Латвии, Литве.

Программы имеют разный уровень сложности, но их освоение, как правило, не вызывает особых проблем. Если Вы пожелаете научиться основам работы с программами серии «Эколог», а также прослушать лекции ведущих специалистов страны в области экологии - добро пожаловать в Санкт-Петербург, где наша фирма регулярно проводит курсы повышения квалификации специалистов-экологов.

Для тех, кто ценит живое общение с коллегами из разных регионов страны и бывших советских республик и хочет быть в курсе последних новостей в области экологии, проводятся семинары с насыщенной научной, методической и культурной программой. Такие семинары фирма «Интеграл» проводит как в Санкт-Петербурге, так и в Москве.

И, наконец, фирма «Интеграл» и ее партнеры регулярно проводят семинары по программным средствам в других регионах страны.

Фирма «Интеграл» является также **представителем концерна «Dräger»** на рынке газоизмерительной техники и средств индивидуальной защиты.

Приборы и оборудование концерна «Dräger» отличает высокая надежность и удобство при эксплуатации, большие сроки службы, превосходный сервис.

Мы будем всегда рады помочь Вам выбрать необходимое в Вашей работе программное обеспечение и научить с ним работать.

Фирма «Интеграл»:

Адрес для писем: 191036, Санкт-Петербург, ул. 4 Советская, 15 Б
Телефон и факс: (812) 140-11-00 (многоканальный)
E-mail: gost.e-ecolog.ru
Internet: gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru