

УДК 622.276

**МЕТОД ОЦЕНКИ ОБЩЕГО КОЛИЧЕСТВА САЖИ
(ЧЕРНОГО УГЛЕРОДА), ЭМИТИРУЕМОЙ В АТМОСФЕРУ
ПРИ СЖИГАНИИ ПОПУТНОГО ГАЗА В НЕФТЕПРОИЗВОДСТВЕ**

**METHOD FOR ESTIMATING THE TOTAL QUANTITY
OF BLACK CARBON EMITTED INTO THE ATMOSPHERE
WHEN COMBUSTION OF ASSOCIATED GAS IN OIL PRODUCTION**

Ф.Г. Абасзаде, Л.И. Нуриева

**Национальное аэрокосмическое агентство,
г. Баку, Азербайджанская Республика**

Fuad G. Abaszade, Lale I. Nurieva

National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic

e-mail: asadzade@rambler.ru

Аннотация. Разработан метод оценки общего количества сажи, эмитируемой с факелов сжигания попутного углеводородного газа.

Разработана соответствующая методика расчета, основанная на известной аналитической формуле для расчета коэффициента эмиссии сажи при сжигании углеводородного газа, в предположении о том, что коэффициент эмиссии сажи находится в сильной корреляционной связи с отношением объема эмитированной сажи к объему эмитированного CO_2 при сжигании углеводородного газа. Также учтена линейная связь между объемом сожженного углеводородного газа и эмитированного при этом объемом CO_2 . При разработке методики использована известная аппроксимационная модель сожженного в факелах углеводородного газа по годам за период 1950–2005 гг.

Согласно построенной модели эмитированного в атмосферу объема сажи, установлено, что начиная с 1985 г. происходит ее накопление в атмосфере.

Abstract. A method for assessing the total amount of soot emitted from associated hydrocarbon gas flares has been developed.

An appropriate calculation method has been developed, based on the well-known analytical formula for calculating the soot emission factor when burning hydrocarbon gas, on the assumption that the soot emission factor is in a strong correlation with the ratio of the emitted soot volume to the emitted CO_2 volume when burning hydrocarbon gas. The linear relationship between the volume of burnt hydrocarbon gas and the volume of CO_2 emitted was also taken into account. When developing the methodology, a well-known approximation model of hydrocarbon gas burnt in flares by years for the period 1950–2005 was used.

According to the constructed model of the volume of soot emitted into the atmosphere, it has been established that since 1985 it has been accumulating in the atmosphere.

Ключевые слова: сажа; факел сжигания газа; попутный газ; нефтепроизводство; эффективность сжигания

Key words: soot; gas flare; associated gas; oil production; combustion efficiency

Введение

Согласно [1], только в 2012 г. общий мировой объем сжигаемого углеводородного газа в факелах согласно спутниковым наблюдениям составил 143 млрд м³, что составляет 3,5 % всего объема производимого газа в мире.

В результате сжигания углеводородного газа выделяются такие загрязнители атмосферы как CO_2 , CO , NO_x , N_2O , H_2S , аэрозоли и т.д. Аэрозоли, выделяемые при сжигании газа, в основном имеют форму сажи (черный углерод) [2]. Сажа является вторым основным фактором, после CO_2 , приводящим к глобальному потеплению [3].

Существует несколько работ, посвященных эмиссии сажи при сжигании углеводородного газа [4–6]. Так, в работе [4] оценен общий объем эмитируемой сажи при сжигании углеводородного газа и определен верхний предел такой оценки. Коэффициент эмиссии сажи был определен по методу масс-баланса. При этом учитывался весь объем сжигаемого газа, например в дизельных автомашинах, генераторах и т.д. В работе [5] предложен метод для определения коэффициента эмиссии сажи при сжигании газа в факелах. В этой работе было получено несколько меньшее значения коэффициента эмиссии, чем в [4].

В работе [6] исследован вопрос об эмиссии сажи путем оценки общей эффективности сгорания углеводородного газа с учетом выделяемых при этом продуктов (в основном CO_2 и несгораемой части CH_4).

Экспериментальные исследования по определению коэффициента эмиссии сажи были проведены с использованием оптоэлектронной аппаратуры «Sky-LOSA» в Узбекистане [7] и в Мексике [8]. В результате проведенных измерений получены такие оценки, как $2,00 \pm 0,66$ и $0,067 \pm 0,020$ г/с соответственно.

Согласно [9], коэффициент эмиссии сажи при сжигании углеводородного топлива сильно зависит от географической местности нефтепроизводства.

Согласно работе [2], существует следующее эмпирическое соотношение:

$$EF_{BC} = 0.0578 \cdot HV_{APG} - 2.09, \quad (1)$$

где EF_{BC} – коэффициент эмиссии сажи;

N_{APG} – объемно-взвешенный коэффициент нагрева газа – загрязнителя атмосферы.

Из выражения (1) ясно, что EF_{BC} сильно зависит от состава загрязняющих атмосферу газов. EF_{BC} также зависит от технологии производства, которая различна в нефтедобывающих странах. В работе [5] применительно к конкретному факелу сжигания углеводородного газа была предложена следующая формула для вычисления коэффициента эмиссии сажи:

$$EF_{BC} = 1000 \cdot F \cdot \frac{C_{BC}}{C_{CO_2} + C_{CH_4} + C_{BC}}, \quad (2)$$

где C_{CO_2} , C_{CH_4} , C_{BC} – массовые концентрации углерода (г/м³) в CO_2 , CH_4 и BC соответственно, без учета фоновых значений;

F – отношение массы углерода к общей масса углеводорода.

Согласно [6] $F = 0,79$.

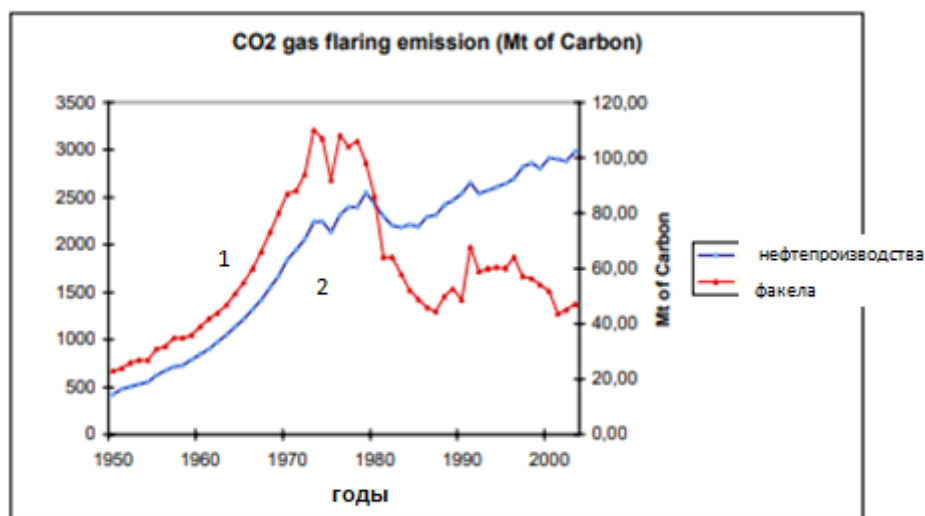
Как отмечается в работе [3], исследования, проведенные в атмосфере над платформами нефтедобычи, показывают, что для всех платформ существует достаточно сильная корреляция между показателем EF_{BC} и крутизной линии регрессии показателя эмитируемой сажи по показателю эмитируемого газа CO_2 .

С учетом вышеизложенного в настоящей статье разрабатывается новая методика по оценке общего количества сажи, эмитируемого при сжигании попутного углеводородного газа.

Материалы и методы

Следует отметить, что эмиссия CO_2 в атмосферу возникает при сжигании газа в факелах во всем цикле нефтепроизводства. Соотношение объемов эмитируемого CO_2 в факелах и объема нефтепроизводства показано на рисунке 1 [10]. Как видно из графиков, показанных на рисунке

1, эмиссия CO_2 при сжигании газа в факелах, начиная с 1980 г., значительно уменьшилась.



1 – в факелах;
 2 – в нефтепроизводстве

Рисунок 1. Кривые объема эмиссии CO_2 по годам вследствие сжигания газа в факелах и нефтепроизводстве

Как было отмечено выше, согласно [6], существует следующее соотношение:

$$EF_{BC} = k \cdot \frac{\Delta BC}{\Delta CO_2}, \quad (3)$$

где $k = \text{const}$.

Следовательно, из (3) получим

$$\Delta BC = \frac{EF_{BC} \cdot \Delta CO_2}{k}, \quad (4)$$

где EF_{BC} может быть определен по формуле (1) или (2).

Согласно работе [11], кривая временной зависимости объема сжигаемого углеводородного газа по годам (1950–2005 гг.) (рисунок 2) может быть аппроксимирована решением следующего дифференциального уравнения (в метрических тоннах):

$$F(t) + F'(t) = 5.4229 \cdot 10^8 - 8.0909 \cdot 10^5 t + 402.999t^2 - 0.06685 \cdot t^3, \quad (5)$$

где t исчисляется в годах.

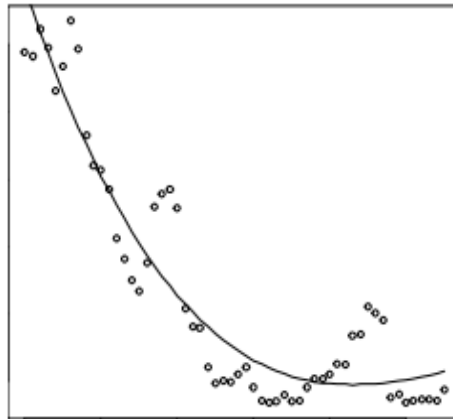


Рисунок 2. Модель изменения эмиссии сажи из-за факельного сжигания углеводородного газа

Решение уравнения (5) имеет вид:

$$F(t) = 5.431 \cdot 10^8 - 8.105 \cdot 10^5 t + 402.032t^2 - 0.06685 \cdot t^3. \quad (6)$$

На рисунке 2 приведена кривая выражения (6) и реальные данные об эмиссии в атмосферу CO_2 из-за сжигания углеводородного газа.

С учетом

$$k_1 \frac{dF(t)}{dt} = \frac{dCO_2(t)}{dt}; \quad k_1 = const, \quad (7)$$

а также [1]

$$\frac{dF(t)}{dt} = -8.105 \cdot 10^5 + 8.064 \cdot 10^2 t - 0.20055 \cdot t^2. \quad (8)$$

Для временного промежутка Δt напишем

$$\Delta F(t) = (-8.105 \cdot 10^5 + 8.064 \cdot 10^2 t - 0.20055 \cdot t^2) \cdot \Delta t. \quad (9)$$

С учетом (7), приняв

$$\Delta CO_2(t) = k_1 \Delta F(t), \quad (10)$$

из выражений (9) и (10) получим

$$\Delta CO_2(t) = k_1(-8.105 \cdot 10^5 + 8.064 \cdot 10^2 t - 0.20055 \cdot t^2) \cdot \Delta t. \quad (11)$$

С учетом (4) и (11) окончательно получаем

$$\frac{\Delta BC}{\Delta t} = \frac{EF_{BC}}{k} \cdot k_1(-8.105 \cdot 10^5 + 8.064 \cdot 10^2 t - 0.20055 \cdot t^2). \quad (12)$$

Таким образом, полученное уравнение (12) позволяет вычислить объем эмитированной в атмосферу сажи в интервале времени 1950–2005 гг.

График выражения (12) для случая $\Delta t = 1$ год и $\frac{EF_{BC}}{k} \cdot k_1 = 1$ приведен на рисунке 3.

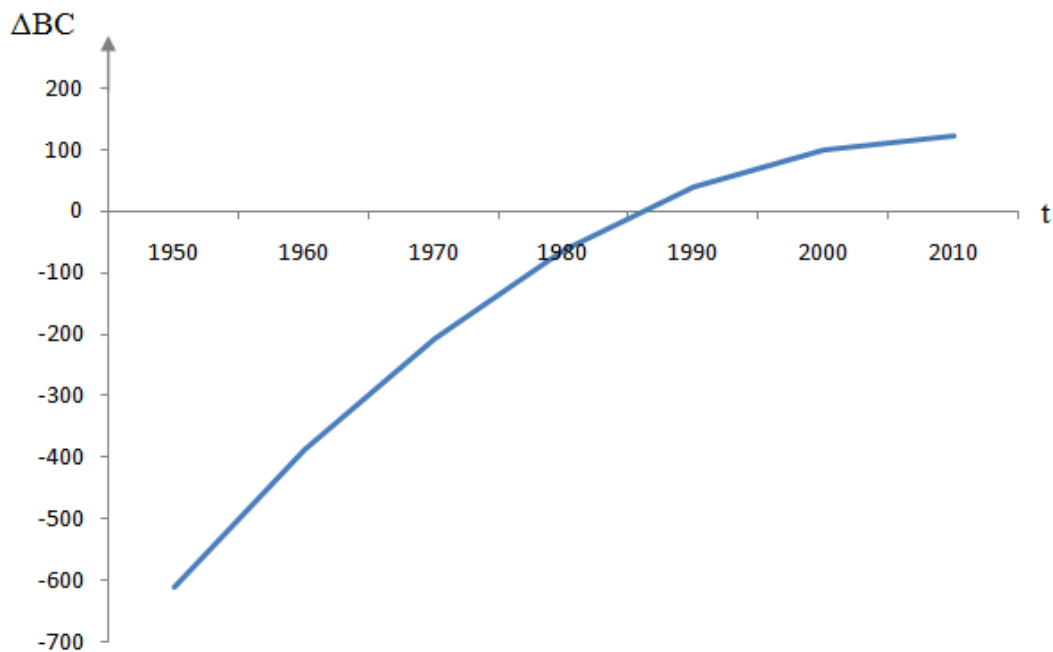


Рисунок 3. График выражения (12) для случая $\Delta t = 1$ год и $\frac{EF_{BC}}{k} \cdot k_1 = 1$

Как видно из графика, приведенного на рисунке 3, начиная с 1985 г., согласно построенной модели, происходит накопление сажи, т.е. наблюдается положительный прирост концентрации сажи из-за сжигания газа.

Выводы

Таким образом, построенная модель оценки общего объема сажи, эмитируемой в атмосферу, основывается на следующих положениях:

- а) существуют аналитические формулы для расчета коэффициента эмиссии сажи при сжигании углеводородного газа;
- б) коэффициент эмиссии сажи находится в сильной корреляционной связи с отношением объема эмитированной сажи к объему эмитированного CO_2 при сжигании углеводородного газа;
- с) имеется линейная связь между объемом сожженного углеводородного газа и эмитированного при этом объема CO_2 в течение определенного промежутке времени Δt ;
- д) существует аппроксимационная модель сожженного в факелах углеводородного газа по годам за период 1950–2005 гг.

На основе вышеуказанных положений построена модель зависимости эмитированного в атмосферу объема сажи, согласно которой, начиная с 1985 г., происходит ее накопление в атмосфере.

Список используемых источников

1. Elvidge C.D., Zhizhin M., Baugh K., Hsu F.C., Ghosh T. Methods for Global Survey of Natural Gas Flaring from Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Data // *Energies*. 2016. Vol. 9. No. 1. P. 14-19. DOI: 10.3390/en9010014.
2. MvEven J.D., Johnson M.R. Black Carbon Particulate Matter Emission Factors for Buoyancy-Driven Associated Gas Flare // *Journal of the Air and Waste Management Association*. 2012. Vol. 62. P. 307-321. DOI: 10.1080/10473289.2011.650040.
3. Moffet R.C., Prather K.A. In-Situ Measurements of the Mixing State and Optical Properties of Soot with Implication for Radiative Forcing Estimates // *PNAS*. 2009. Vol. 106. P. 11872-11877. DOI: 10.1073/pnas.0900040106.

4. Schwarz J.P., Holloway J.S., Katich L.M., McKeen S., Kort E.A., Smith M.L., Ryerson T.B., Sweeney C., Peischl J. Black Carbon Emissions from the Bakken Oil and Gas Development Region // *Environmental Science and Technology Letters*. 2015. Vol. 2. Issue 10. P. 281-285. DOI: 10.1021/acs.estlett.5b00225.
5. Weyant C.L., Shepson P.B., Sumramanian R., Cambaliza M.O., Heimbürger A., McCabe D., Baum E., Stirm, B.H., Bond T.C. Black Carbon Emissions from Associated Natural Gas Flaring // *Environmental Science and Technology*. 2016. Vol. 50. Issue 4. P. 2075-2081. DOI: 10.1021/acs.est.5b04712.
6. Gvakharia A., Kort E.A., Brandt A., Peischl J., Ryerson T.B., Schwarz J.P., Smith M.L., Smith L., Sweeney C. Methane, Black Carbon and Ethane Emissions from Natural Gas Flares in the Bakken Shale, North Dakota // *Environmental Science and Technology*. 2017. Vol. 51. Issue 9. P. 5317-5325. DOI: 10.1021/acs.est.6b05183.
7. Johnson M.R., Devillers R.W., Thomson K.A. Quantitative Field Measurement of Emissions from a Large Gasflare. Using Sky-LOSA // *Environmental Science and Technology*. 2011. Vol. 45. Issue 1. P. 345-350. DOI: 10.1021/es102230y.
8. Johnson M.R., Devillers R.W., Thomson K.A. A Generalized Sky-LOSA Method to Quantify Soot/Black Carbon Emission Rates in Atmospheric Plumes of Gas Flares // *Aerosol Science and Technology*. 2013. Vol. 47. P. 1017-1029.
9. Huang K., Joshua S.Fu. A Global Gas Flaring Black Carbon Emission Rate Dataset from 1994 to 2012 // *Scientific Data*. 2016. Vol. 3. Article Number 160104. DOI: 10.1038/sdate.2016.104.
10. Gervet B. Gas Flaring Emission Contributes to Global Warming. Lulea: Lulea University of Technology, 2007. 14 p.
11. Tsokos C.P., Xu Y. Modeling Carbon Dioxide Emissions with a System of Differential Equations: Nonlinear Analysis // *International Journal of Exergy*. 2009. Vol. 10. P. 422-453.

References

1. Elvidge C.D., Zhizhin M., Baugh K., Hsu F.C., Ghosh T. Methods for Global Survey of Natural Gas Flaring from Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Data. *Energies*, 2016, Vol. 9, No. 1, pp. 14-19. DOI: 10.3390/en9010014.
2. MvEven J.D., Johnson M.R. Black Carbon Particulate Matter Emission Factors for Buoyancy-Driven Associated Gas Flare. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 2012, Vol. 62, pp. 307-321. DOI: 10.1080/10473289.2011.650040.
3. Moffet R.C., Prather K.A. In-Situ Measurements of the Mixing State and Optical Properties of Soot with Implication for Radiative Forcing Estimates. *PNAS*, 2009, Vol. 106, pp. 11872-11877. DOI: 10.1073/pnas.0900040106.
4. Schwarz J.P., Holloway J.S., Katich L.M., McKeen S., Kort E.A., Smith M.L., Ryerson T.B., Sweeney C., Peischl J. Black Carbon Emissions from the Bakken Oil and Gas Development Region. *Environmental Science and Technology Letters*, 2015, Vol. 2, Issue 10, pp. 281-285. DOI: 10.1021/acs.estlett.5b00225.
5. Weyant C.L., Shepson P.B., Sumramanian R., Cambaliza M.O., Heimbürger A., McCabe D., Baum E., Stirm, B.H., Bond T.C. Black Carbon Emissions from Associated Natural Gas Flaring. *Environmental Science and Technology*, 2016, Vol. 50, Issue 4, pp. 2075-2081. DOI: 10.1021/acs.est.5b04712.
6. Gvakharia A., Kort E.A., Brandt A., Peischl J., Ryerson T.B., Schwarz J.P., Smith M.L., Smith L., Sweeney C. Methane, Black Carbon and Ethane Emissions from Natural Gas Flares in the Bakken Shale, North Dakota. *Environmental Science and Technology*, 2017, Vol. 51, Issue 9, pp. 5317-5325. DOI: 10.1021/acs.est.6b05183.
7. Johnson M.R., Devillers R.W., Thomson K.A. Quantitative Field Measurement of Emissions from a Large Gasflare. Using Sky-LOSA. *Environmental Science and Technology*, 2011, Vol. 45, Issue 1, pp. 345-350. DOI: 10.1021/es102230y.

8. Johnson M.R., Devillers R.W., Thomson K.A. A Generalized Sky-LOSA Method to Quantify Soot/Black Carbon Emission Rates in Atmospheric Plumes of Gas Flares. *Aerosol Science and Technology*, 2013, Vol. 47, pp. 1017-1029.
9. Huang K., Joshua S.Fu. A Global Gas Flaring Black Carbon Emission Rate Dataset from 1994 to 2012. *Scientific Data*, 2016, Vol. 3, Article Number 160104. DOI: 10.1038/sdate.2016.104.
10. Gervet B. *Gas Flaring Emission Contributes to Global Warming*. Lulea, Lulea University of Technology, 2007. 14 p.
11. Tsokos C.P., Xu Y. Modeling Carbon Dioxide Emissions with a System of Differential Equations: Nonlinear Analysis. *International Journal of Exergy*, 2009, Vol. 10, pp. 422-453.

Сведения об авторах

About the Authors

Абасзаде Фуад Габиль оглы, аспирант Национального аэрокосмического агентства, г. Баку, Азербайджанская Республика

Fuad Gabil ogly Abaszade, Post-graduate Student of National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic

e-mail: asadzade@rambler.ru

Нуриева Лале Имран гызы, научный сотрудник НИИ Аэрокосмической информатики Национального аэрокосмического агентства. г. Баку, Азербайджанская Республика

Lale I. Nurieva, Researcher, Research Institute of Aerospace Informatics, National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic