

УДК 622.276

**ОПТИМАЛЬНЫЙ ВЫБОР РЕЖИМНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
СЖИГАНИЯ ПОПУТНОГО ГАЗА ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ
СТЕПЕНИ НЕРАВНОМЕРНОСТИ АЭРОЗОЛЬНОГО
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА В ЗОНАХ НЕФТЕГАЗОВОГО
ПРОИЗВОДСТВА**

**OPTIMUM CHOICE OF REGIME INDICATORS
OF ASSOCIATED PETROLEUM GAS BURNING FOR MINIMIZING
THE DEGREE OF AEROSOLIC AIR POLLUTION
IN OIL AND GAS PRODUCTION AREAS**

И.Х. Асадов

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

Ilgar H. Asadov

National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic

e-mail: asadzade@rambler.ru

Аннотация. В статье решается задача минимизации неравномерности загрязненности зоны сжигания попутного газа. Решение данной задачи предусматривает минимизацию дисперсии коэффициента эмиссии, который будучи случайной величиной, является неслучайной функцией другой случайной величины – температуры пламени сжигания газа. Принято допущение, что распределение вероятности температуры подчиняется нормальному закону.

Задача оптимизации решена по методу безусловной вариационной оптимизации. Для этого на искомую оптимальную функцию налагается

некоторое ограничение, позволяющее несколько сузить класс возможных функций.

Решение оптимизационной задачи позволило получить такой вид зависимости коэффициента эмиссии от температуры, при котором этот коэффициент, будучи случайной величиной, обладает минимальной дисперсией.

Аналогичным образом может быть решена вторая задача, смысл которой заключается в минимизации дисперсии функции зависимости объёма сжигаемого попутного газа от температуры.

Abstract. The article solves the problem of minimizing the uneven contamination of the associated gas combustion zone. The solution to this problem involves minimizing the dispersion of the emission coefficient, which, being a random variable, is a nonrandom function of another random variable – the temperature of the gas burning flame. The assumption is made that the probability distribution of temperature obeys the normal law.

The optimization problem is solved by the method of unconditional variational optimization. To this end, a certain restriction is imposed on the desired optimal function, which allows us to narrow the class of possible functions somewhat.

The solution of the optimization problem made it possible to obtain such a form of the dependence of the emission coefficient on temperature at which this coefficient, being a random variable, has minimal dispersion.

In a similar way, the second problem can be solved, the meaning of which is to minimize the variance of the function of the dependence of the associated gas burned volume on temperature.

Ключевые слова: сажа; попутный газ; оптимизация; дисперсия; температура сжигания

Key words: soot; associated petroleum gas; optimization; dispersion; combustion temperature

Введение

Как отмечается в работе [1], аэрозоли, эмитируемые при сжигании попутного газа, в основном имеют вид сажи или черного углерода (black carbon) который сильно ослабляет оптическую радиацию Солнца. Сжигание попутного газа часто осуществляется на участках производства нефти или газа в случае нехватки трубопроводов для транспортировки газа или для устранения опасности чрезмерного увеличения давления на соответствующем производственном оборудовании. Только в 2012 г. общий объем сожженного попутного газа в мировом масштабе достиг 143 млрд м³, что составляло 3,5 % объема всего добываемого газа. Согласно [2], неутилизованная часть попутного газа сжигается на факельных установках, которые позволяют перевести вредные вещества в менее опасные. Например, сероводород при сгорании превращается в сернистый газ, оксид углерода в диоксид углерода и т.д.

Как отмечается в работе [3], сажа представляет собой значительную опасность для здоровья человека из-за мелкого размера ее частиц, она оказывает негативное воздействие на сердечно-сосудистые, респираторные, репродуктивные органы человека, что диктует необходимость разработки новых методов для точной оценки степени генерации сажи при сжигании попутного газа, а также оптимальных технологических режимов для частичной нейтрализации влияния сажи.

В период 1983–2012 гг. был предложен ряд методов по измерению количества сажи, эмитируемой при сжигании попутного газа [4, 5]. Основу этих методов составляло улавливание сажи с помощью специального фильтра. В работе [6] предложен метод измерения массового потока сажи в полевых условиях с помощью фотометрической установки. Однако в данной работе не учтено влияние скорости ветра на процесс эмиссии сажи. Согласно работе [3], во многих директивных документах внимание

сосредотачивается на аэрозольных частицах $PM_{2,5}$, включающих в себя сажу. При этом эмиссия сажи при сжигании попутного газа оценивается с помощью коэффициента эмиссии, определяющего количество эмитируемой сажи при сжигании единичного объема газа. Однако использование этого показателя диктует необходимость влияния нескольких случайных по характеру внешних и режимных показателей.

В работах [6–8] были изложены теоретические основы и результаты экспериментального исследования метода «Sky-LOSA», предназначенного для оценки скорости эмиссии сажи при сжигании газа. В этом методе учитывалось как ослабление небесной оптической радиации сажей, так и скорость распространения потока эмитируемых частиц.

Вместе с тем, задача нейтрализации вредного влияния эмитируемой сажи в зонах массового сжигания попутного газа может быть решена, по нашему мнению, путем не столько разработки сложных методик измерения эмитируемой сажи, а путем создания методик оптимального производственного режима сжигания попутного газа, позволяющих перераспределить весь объем сажи в целях получения равномерного фона загрязненности сажей в зоне нефтегазового производства.

Предлагаемый метод

Изложим физические основы предлагаемого метода. Как отмечено в работе [9], известные оценки коэффициента эмиссии изменяются в пределах $0,13–1,75 \text{ г/м}^3$. При этом при температуре, близкой к температуре адиабатического сжигания газа ($\approx 2500 \text{ К}$), происходит полное сжигание газа, что приводит к эмиссии минимального объема сажи. Наоборот, при низкой температуре сжигания (700 К) происходит максимальная эмиссия сажи. Следуя работе [9], зависимость коэффициента эмиссии от температуры можно представить в виде линейной функции:

$$Y = Y_0 - k_1(x - x_0), \quad (1)$$

где Y – коэффициент эмиссии сажи при температуре x ;

Y_0 – коэффициент эмиссии сажи при температуре x_0 .

Общий вид ломанной кривой выражения (1) показан на рисунке 1 (k_1 – крутизна линии функции (1)).

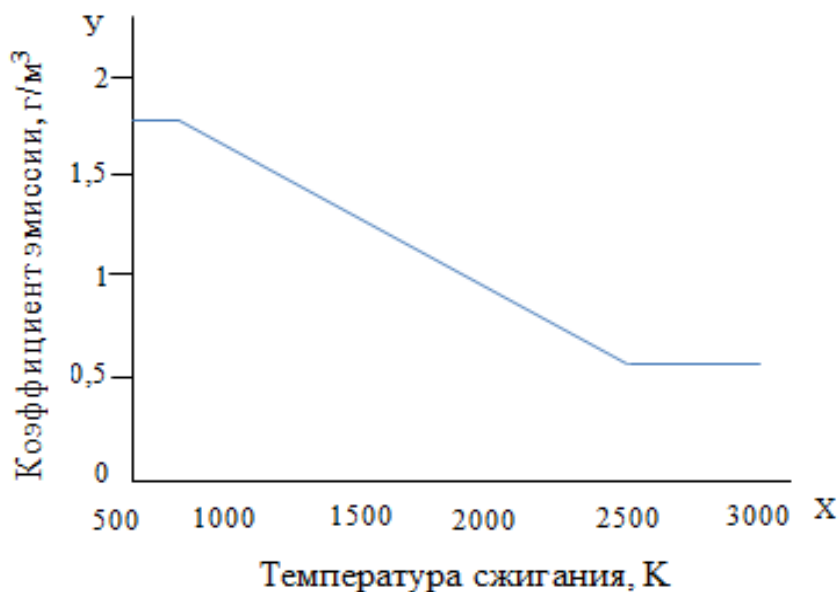


Рисунок 1. Линейная аппроксимация функциональной зависимости коэффициента эмиссии от температуры сжигания газа

Наиболее важной статистической характеристикой процесса сжигания газа является температура пламени. Гистограмма температуры пламени показана на рисунке 2.

Как видно из гистограммы, приведенной на рисунке 2, плотность вероятности распределения температуры пламени сжигания попутного газа может быть аппроксимирована в первом приближении нормальным законом, т.е.

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \exp \left[\frac{-(x-x_0)^2}{\sigma_x^2} \right]. \quad (2)$$

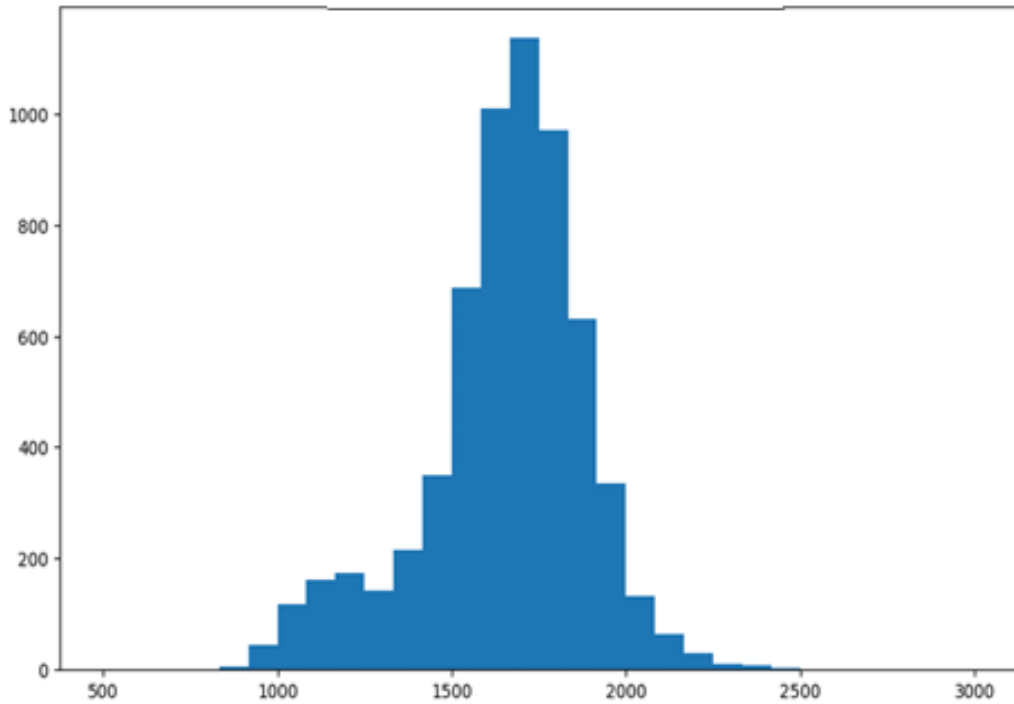


Рисунок 2. Гистограмма распределения температуры сжигания газа.

С учетом выражений (1) и (2) дисперсию случайной величины y можно вычислить по следующему выражению:

$$D(y) = \int_0^{x_{\max}} \frac{[y_0 - k_1(x - x_0)]^2}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_x} \cdot \exp\left[-\frac{(x - x_0)^2}{\sigma_x^2}\right] dx . \quad (3)$$

С учетом (1)–(3) сформируем следующую задачу оптимизации: определить функциональную зависимость при $y = f(x)_{opt}$, при которой дисперсия y достигла бы минимальной величины. При этом допускаем, что объемы сжигаемого газа во всех факельных установках одинаковы.

Для решения вышеуказанной задачи оптимизации наложим некоторое ограничительное условие на искомую функцию $y(x)$ в виде:

$$\int_0^{x_{\max}} y(x) dx = c . \quad (4)$$

Таким образом, суть предлагаемой оптимизационной задачи заключается в нахождении такой функциональной зависимости $y = f(x)_{opt}$,

которая, удовлетворяя условию (4), привела бы приведенный ниже функционал цели F_k к минимальной величине:

$$F = \int_0^{x_{\max}} \frac{f(x)^2}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_x} \cdot \exp \left[\frac{-(x-x_0)^2}{\sigma_x^2} \right] dx + \lambda \left[\int_0^{x_m} f(x) dx - c \right]. \quad (5)$$

Решение задачи (5) позволит получить такой вид зависимости коэффициента эмиссии от температуры, при котором этот коэффициент, будучи случайной величиной, обладал бы минимальной дисперсией.

Отметим, что можно рассмотреть другую разновидность вышеуказанной оптимизационной задачи, если перейти на показатель $\gamma = \gamma(x)$:

$$\gamma(x) = V(f) \cdot f(x), \quad (6)$$

где $V(x)$ – функция распределения сжигаемых объемов попутного газа по коэффициенту эмиссии.

В этом случае функционал цели (5) имеет следующий вид:

$$F_1 = \int_0^{x_m} \frac{[V(f) \cdot f(x)]^2}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_x} \cdot \exp \left[\frac{-(x-x_0)^2}{\sigma_x^2} \right] dx + \lambda \left[\int_0^{x_m} f(x) dx - c \right]. \quad (7)$$

Рассмотрим решение задачи (5).

Решение оптимизационной задачи

Выражение (5) является математическим представлением задачи безусловной вариационной оптимизации. Решение этой задачи согласно [10] должно удовлетворить условию:

$$\frac{\partial \left\{ \frac{f(x)^2 \cdot \exp \left[\frac{-(x-x_0)^2}{\sigma_x^2} \right]}{\sigma_x \cdot \sqrt{2\pi}} + \lambda \left[\int_0^{x_m} f(x) dx - c \right] \right\}}{\partial f(x)} = 0. \quad (8)$$

Из условия (8) получим:

$$\frac{2f(x)}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2}\right] + \lambda = 0 . \quad (9)$$

Из выражения (9) находим

$$f(x) = -\frac{\lambda \sigma_x \sqrt{2\pi}}{2 \cdot \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2}\right]} . \quad (10)$$

С учетом выражений (4) и (10) получим:

$$-\int_0^{x_m} \frac{\lambda \cdot \sigma_x \cdot \sqrt{2\pi}}{2 \cdot \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2}\right]} dx = C . \quad (11)$$

Из (11) находим

$$\lambda = -\frac{2C \int_0^{x_m} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2}\right] dx}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} . \quad (12)$$

Обозначим значение λ , вычисленное по выражению (12), как λ_0 . В этом случае выражение (10) перепишем:

$$f(x) = \frac{C_1}{\exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2}\right]} , \quad (13)$$

где $C_1 = C \cdot \int_0^{x_m} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2}\right] dx$.

Можно показать, что при решении (13) целевой функционал (5) достигает минимальной величины, т.к. вторая производная интегранта в (5) по $f(x)$ имеет положительный знак.

Отметим, что решение задачи (7) дало выражение:

$$f(x) = \frac{C_2}{\exp\left[\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2}\right]}, \quad (14)$$

$$\text{где } C_2 = C \cdot \int_0^x V(f)^{-2} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2}\right] dx. \quad (15)$$

Таким образом, решения обеих рассматриваемых задач имеют одинаковый вид, они отличаются масштабным коэффициентом.

Выводы

Отмечено, что вопрос об оценке и минимизации загрязненности зоны сжигания попутного газа сажей в основном решается в направлении разработки новых методов измерения концентрации сажи.

Вместе с тем, относительная несовершенство таких методов выдвигает на первый план задачи выравнивания степени загрязненности зоны сжигания попутного газа. Решение данной задачи предлагается с помощью минимизации дисперсии случайной величины коэффициента эмиссии, являющейся неслучайной функцией случайной величины – температуры пламени сжигания газа. При этом функция распределения вероятности температуры аппроксимирована нормальным законом.

Для решения задачи оптимизации путем применения метода безусловной вариационной оптимизации искомой оптимальной функции зависимости коэффициента эмиссии от температуры налагается некоторое ограничение, позволяющее несколько сузить класс возможных функций. Аналогичным образом также решена вторая задача, смысл которой заключается в минимизации дисперсии общего количества попутного газа.

Список используемых источников

1. Huang K., Fu J.S. A Global Gas Flaring Black Carbon Emission Rate Dataset From 1994 to 2012 // *Scientific Data*. 2016. 3:160104. URL: <https://www.nature.com/articles/sdata2016104.pdf> (дата обращения: 29.04.2020). DOI: 10.1038/sdata.2016.104.
2. Дроздова Т.И., Суковатиков Р.Н. Экологический риск от выбросов загрязняющих веществ при сжигании попутного нефтяного газа нефтегазоконденсатного месторождения // *XXI век. Техносферная безопасность*. 2017. Т. 2. № 3. С. 88-101.
3. McEwen J.D.N., Johnson M.R. Black Carbon Particulate Matter Emission Factors For Buoyancy-Driven Associated Gas Flares // *Journal of the Air and Waste Management Association*. 2012. Vol. 62. No. 3. P. 307-321, DOI: 10.1080/10473289.2011.650040.
4. Pohl J.H., Lee J., Payne R., Tichenor B.A. Combustion Efficiency of Flares // *Combustion Science and Technology*. 1986. Vol. 50. No. 4-6. P. 217-231. DOI: 10.1080/00102208608923934.
5. Siegel K.D. Degree of Conversion of Flare Gas in Refinery High Flares: Cand. ... Sci. Diss. Karlsruhe: University of Karlsruhe, 1980.
6. Johnson M.R., Devillers R.W., Thomson K.A. Quantitative Field Measurement of Soot Emission from a Large Gas Flare Using Sky-LOSA // *Environmental Science and Technology*. 2011. Vol. 45. P. 345-350. DOI: 10.1021/es102230y.
7. 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. Issue 9. P. 1017-1029. DOI: 10.1080/02786826.2013.809401.
8. Conrad B.M., Johnson M.R. Field Measurements of Black Carbon Yields from Gas Flaring // *Environmental Science and Technology*. 2017. Vol. 51. No. 3. P. 1893-1900. DOI: 10.1021/acs.est.6b03690.

9. Caseiro A., Gehrke B., Rücker G., Leimbach D., Kaiser J.W. Gas Flaring Activity and Black Carbon Emissions in 2017 Derived from Sentinel-3A SLSTR // *Earth System Science Data*. 2019. July. URL: <https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2019-99/essd-2019-99.pdf> DOI: 10.5194/essd-2019-99. (дата обращения: 30.04.2020).
10. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Наука, 1974. 432 с.

References

1. Huang K., Fu J.S. A Global Gas Flaring Black Carbon Emission Rate Dataset from 1994 to 2012. *Scientific Data*, 2016, 3:160104. URL: <https://www.nature.com/articles/sdata2016104.pdf> (accessed 29.04.2020). DOI: 10.1038/sdata.2016.104.
2. Drozdova T.I., Sukovatikov R.N. Ekologicheskii risk ot vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv pri szhiganii poputnogo neftyanogo gaza neftegazokondensatnogo mestorozhdeniya [Environmental Effects of Oil and Gas Combustion Pollutant Emissions at Oil-Gas Condensate Deposits]. *XXI vek. Tekhnosfernaya bezopasnost' – XXI Century. Technosphere Safety*, 2017, Vol. 2, No. 3, pp. 88-101. [in Russian].
3. McEwen J.D.N., Johnson M.R. Black Carbon Particulate Matter Emission Factors for Buoyancy-Driven Associated Gas Flares. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 2012, Vol. 62, No. 3, pp. 307-321, DOI: 10.1080/10473289.2011.650040.
4. Pohl J.H., Lee J., Payne R., Tichenor B.A. Combustion Efficiency of Flares. *Combustion Science and Technology*, 1986, Vol. 50, No. 4-6, pp. 217-231. DOI: 10.1080/00102208608923934.
5. Siegel K.D. *Degree of Conversion of Flare Gas in Refinery High Flares: Cand. Sci. Diss.* Karlsruhe, University of Karlsruhe, 1980.

6. Johnson M.R., Devillers R.W., Thomson K.A. Quantitative Field Measurement of Soot Emission from a Large Gas Flare Using Sky-LOSA. *Environmental Science and Technology*, 2011, Vol. 45, pp. 345-350. DOI: 10.1021/es102230y.
7. 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, Issue 9, pp. 1017-1029. DOI: 10.1080/02786826.2013.809401.
8. Conrad B.M., Johnson M.R. Field Measurements of Black Carbon Yields from Gas Flaring. *Environmental Science and Technology*, 2017, Vol. 51, No. 3, pp. 1893-1900. DOI: 10.1021/acs.est.6b03690.
9. Caseiro A., Gehrke B., Rucker G., Leimbach D., Kaiser J.W. Gas Flaring Activity and Black Carbon Emissions in 2017 Derived from Sentinel-3A SLSTR. *Earth System Science Data*, 2019, July. URL: <https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2019-99/essd-2019-99.pdf> DOI: 10.5194/essd-2019-99. (accessed 30.04.2020).
10. Elsgolts L.E. *Differentsial'nye uravneniya i variatsionnoe ischislenie* [Differential Equations and Calculus of Variations]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 432 p. [in Russian].

Сведения об авторе

About the author

Асадов Ильгар Хикмет оглы, аспирант Национального аэрокосмического агентства, специалист местной структуры нефтяной компании CAMERON, г. Баку, Азербайджанская Республика

Ilgar H. Asadov, Post-graduate Student of National Aerospace Agency, Specialist of Local Structure of CAMERON COMPANY, Baku, Azerbaijan Republic

e-mail: asadzade@rambler.ru