УДК 351.862

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ФАКЕЛОВ СЖИГАНИЯ ПОПУТНОГО ГАЗА В НЕФТЕГАЗОПРОИЗВОДСТВЕ

RESEARCH OF ENERGY INDICATORS OF RADIATION OF ASSOCIATED GAS COMBUSTION FLARES IN OIL AND GAS PRODUCTION

Ильгар Хикмет оглы Асадов
Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку,
Азербайджанская Республика

Рамиз Ахмед оглы Эминов
Азербайджанский государственный университет нефти
и промышленности, г. Баку, Азербайджанская Республика

Рена Омар кызы Гусейнова Азербайджанский архитектурно-строительный университет, г. Баку, Азербайджанская Республика

Ilgar H. Asadov National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic

Ramiz A. Eminov

Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku,

Azerbaijan Republic

Rena O. Huseynova

Azerbaijan University of Architecture and Civil Engineering, Baku,

Azerbaijan Republic

e-mail: asadzade@rambler.ru



Аннотация. Статья посвящена исследованию радиационной безопасности наземных измерений энергетических показателей излучения факелов сжигания попутного газа в нефтегазопроизводстве. Исследуется термальная безопасность операторов инфракрасных измерительных систем при осуществлении наземных измерений режимных показателей факелов, углеводородных газовых широко практикуемых В нефтегазопроизводстве. Такой наземный контроль режимных показателей факелов необходим для валидации космической информации, получаемой от различных спутников, осуществляющих контроль за газовыми факелами.

Показано, при условии принятия некоторых интегральных ЧТО функции ограничительных условий применительно К взаимосвязи основных режимных показателей проводимых наземных измерений можно вычислить оптимальный вид этой зависимости, при реализации которой операторы измерительной системы могут получить минимальную термальную радиационную дозу.

Abstract. The article is devoted to the study of the radiation safety of ground-based measurements of the energy indicators of radiation from flares of associated gas combustion in oil and gas production. Thermal safety of operators of infrared measuring systems in the course of ground measurements of operating parameters of hydrocarbon gas flares, widely practiced in oil and gas production, is investigated. Such ground control of the performance indicators of the flares is necessary to validate the space information received from various satellites monitoring gas flares.

It is shown that, provided that some integral limiting conditions are adopted in relation to the function of interconnection of the main operating parameters of the ground measurements carried out, it is possible to calculate the optimal form of this dependence, in the implementation of which the operators of the measuring system can obtain the minimum thermal radiation dose.



Ключевые слова: газовый факел; термальная радиация; наземные измерения; нефтегазопроизводство; оптимизация

Keywords: gas torch; thermal radiation; ground measurements; oil and gas production; optimization

Введение

Общепринятой и научно доказанной причиной глобального потепления климата является увеличение содержания парниковых газов (CO_2 , CH_4 , водяные пары, O_3 и т.д.) в атмосфере.

прямо Увеличение содержания СО₂ в атмосфере связано антропогенной деятельностью И. В частности, co сжиганием углеводородных газов в факелах. Несмотря на малый долевой процент этого фактора, проблема сжигания попутного газа считается важнейшей экологической проблемой из-за эмиссии в атмосферу также огромного количества сажи, различных малых газов (NO_x, SO₄ и др.), имеющих климатическое воздействие, а также из-за термального воздействия на окружающую среду.

Исследование и учет существующих в масштабе всей планеты факелов углеводородного газа в настоящее время осуществляется с помощью космических средств. Существуют несколько космических программ, целью которых является дистанционный учет объемов сжигаемых углеводородных газов в факелах. Вместе с тем, хорошо известно, что всякая космическая измерительная информация должна пройти валидацию, т.е. сопоставление с контрольными наземными измерениями. Такие валидационные измерения осуществляются с помощью специальных наземных измерительных систем, устанавливаемых в разумной близости от факелов.



Статья посвящена исследованию радиационной безопасности наземных измерений энергопоказателей излучения факелов сжигания попутного газа в нефтегазопроизводстве.

Исследуется термальная безопасность операторов инфракрасных измерительных систем при осуществлении наземных измерений режимных показателей углеводородных газовых факелов, широко практикуемых в нефтегазопроизводстве.

Показано, что при условии принятия некоторых интегральных ограничительных условий применительно К функции взаимосвязи основных режимных показателей проводимых наземных измерений можно вычислить оптимальный вид этой зависимости, при реализации которой операторы измерительной системы МОГУТ получить минимальную термальную радиационную дозу.

Аналитический обзор

Одной из главных угроз для успешной жизнедеятельности человека все еще неизменно является глобальное потепление климата, вызванное увеличением содержания парниковых газов (CO_2 , CH_4 , водяные пары, O_3 и т.д.) в атмосфере [1–3].

Увеличение CO_2 атмосфере содержания В прямо связано антропогенной деятельностью И, В частности, co сжиганием углеводородных газов в факелах. Несмотря на малый долевой процент этого фактора ($\approx 1 \%$ согласно [4]), проблема сжигания попутного газа считается важнейшей экологической проблемой из-за эмиссии в атмосферу огромного количества сажи, различных малых газов (NO_x, SO₄ и др.), также климатическое воздействие, имеющих a также из-за термального воздействия на окружающую среду.

Исследование и учет существующих в масштабе всей планеты факелов углеводородного газа в настоящее время осуществляется с помощью космических средств. Так, например, существуют такие космические



программы контроля, как GGFR (Инициатива Всемирного Банка по глобальному уменьшению объемов сжигания газа) [5]; DLR (Программа картирования высокотемпературных объектов и событий) [6]; BIROS (Двухспектральная оптическая инфракрасная система контроля) [6] и др.

Вместе с тем, хорошо известно, что информация, получаемая от космических средств контроля, должна быть верифицирована с помощью наземных средств контроля. Верификация космических данных включает в себя калибровку бортовых измерителей и валидацию достоверности получаемых с борта сообщений. В настоящее время существует много работ, посвященных исследованию данного вопроса, в частности [7–9].

Так, в работе [7] рассмотрены вопросы проведения наземных спектральных измерений эмиссии CO_2 и CH_4 , возникающий в результате сжигания углеводородного газа в факелах. Для проведения измерений используется инфракрасный Фурье–спектрометр (FITR).

В работе [8] рассмотрены вопросы наземных измерений эмиссии метана, сажи, этана от факелов сжигания природного газа. Согласно этой работе, неполное сгорание природного газа в факелах приводит к увеличению эмиссии сажи и метана в атмосферу. При этом отсутствует всякая корреляционная связь между фактором эмиссии и скоростью ветра.

В работе [9] сообщается о разработке новой методики наземных оптических измерений показателей эмиссии сажи при сжигании попутного газа в факелах «Sky — LOSA». Данная методика также предусматривает проведения прямых полевых оптических измерений в зоне факела. Таким образом, актуализируется вопрос о допустимом термальном воздействии на операторов измерителей систем, с учетом стремления исследователей максимально сократить расстояние между измерительной аппаратурой и факелом для получения более достоверных результатов.

Следует отметить, что вопрос термального воздействия инфракрасной радиации рассмотрен в ряде работ [10-12].



Как отмечается в известной экспериментальной работе [10], для вычисления термальной радиации, исходящей от факела, необходимо иметь данные о температуре и эмиссионной способности факела.

Указано [10], что интенсивность тепловой радиации, исходящей от факела, в зависимости от расстояния до факела может быть может быть аппроксимирована следующим выражением:

$$I = ax^b , (1)$$

где I – интенсивность, кBт/м 2 ;

x – расстояние между осевой линией факела и радиометром, м;

a, b – постоянные коэффициенты.

Экспериментальные результаты, полученные в работе [10], приведены в таблице 1 с указанием конкретных формул аппроксимации для проведения вычислений, графики полученных зависимостей представлены на рисунке 1.

Таблица 1. Аппроксимационные выражения зависимости интенсивности термального излучения от расстояния между осевой линией факела и измерителем

Номер испытаний	Формула аппроксимации	\mathbb{R}^2
11	$I = 3877x^{-2.96}$	0.81
12	$I = 4669x^{-3.0}$	0.81
13	$I = 2043x^{-2.6}$	0.87
21	$I = 1183x^{-2.3}$	0.91

Эти выражения отображают общую зависимость (1).

Что касается риска подверженности отрицательному влиянию термальной радиации, то согласно [11] такой риск может быть оценен по выражению

$$V = I^{\frac{4}{3}}t \tag{2}$$



где V – термальная доза, $((\kappa B \tau/M^2)^{4/3}) \cdot c$;

I – радиационный поток, кВт/м²;

t – время, с.

С учетом вышеизложенного рассмотрим предлагаемый метод расчета суммарной дозы в режиме оптимальной серии измерений.

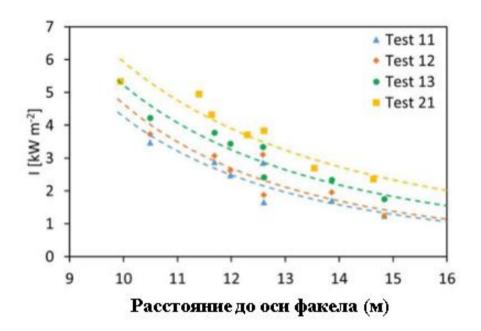


Рисунок 1. Зависимость интенсивности термального излучения от расстояния между осевой линией факела и измерителем

Предлагаемый метод

Предположим, что имеется факел сжигания углеводородного газа, и измерения последовательно осуществляются в некоторых точках на дистанции от факела до исходной точки.

Считаем, что на i—е измерение затрачивается суммарное время:

$$t_i = t_0 + i\Delta t; \quad i = \overline{1, n}; \quad t_0 + n\Delta t = t_{max}, \tag{3}$$

где t_0 – время проведения измерений;

i· Δt – время захода на позицию i.

Схематично (3) проиллюстрировано на рисунке 2. При этом, естественно, считаем, что оператор из-за мер предосторожности не может



одним заходом на позиции провести все измерения. Заходы на позиции i осуществляются последовательно, с выходом из позиции.

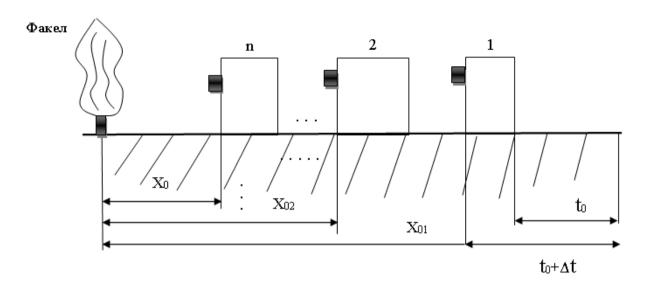


Рисунок 2. Схематическое представление серии измерений на различных расстояниях от факела

Радиационный поток определим по следующей формуле:

$$I = ax^{-b}, (4)$$

где a, b – const.

Из выражений (2) и (4) получим

$$V_i = [a(x_i)^{-b}]^{\frac{4}{3}} \cdot (t_0 + i\Delta t).$$
 (5)

С учетом (5) суммарную дозу термальной радиации вычислим как

$$V_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{n} [a(x_i)^{-b}]^{\frac{4}{3}} \cdot (t_0 + i\Delta t) .$$
 (6)

Если выражение (6) условно написать в непрерывной форме, то получим модельную непрерывную аппроксимацию суммы (6):

$$V_{\rm H} = \int_0^{t_{max}} [a \cdot (x_i)^{-b}]^{\frac{4}{3}} \cdot t dt . \tag{7}$$

Применительно к модели (7) введем на рассмотрение следующую функцию связи



$$x = x(t) . (8)$$

При этом функция (8) формально определяет взаимно однозначную связь между позицией x и временем t, затрачиваемым на измерения в позиции x.

Также введем следующее ограничительное условие

$$\int_0^{t_{max}} x(t)dt = C; C = const.$$
 (9)

Геометрический смысл (9) показан на рисунке 3.

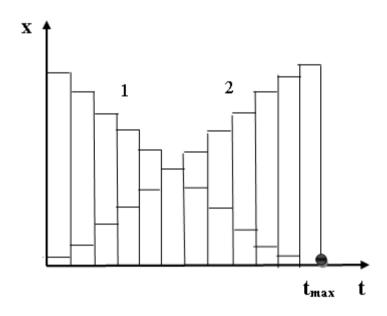


Рисунок 3. Геометрический смысл ограничительного условия

Смысл ступенчатой кривой *I* (рисунок 3) заключается в том, что вблизи факела измерения должны быть проведены тщательно, т.е. здесь требуется потратить больше времени, т.к. вблизи факела результат измерений более информативен.

В свою очередь, смысл ступенчатой кривой 2 заключается в том, что вблизи факела можно получить наибольшую дозу радиации, и поэтому здесь измерения должны быть проведены максимально оперативно.



С учетом выражений (7), (8), (9) составим следующую задачу безусловной вариационной оптимизации, цель которой заключается в нахождения такого вида функции x(t), при котором целевой функционал F достиг бы экстремального значения:

$$F = \int_0^{t_{max}} [a \cdot (x_i)^{-b}]^{\frac{4}{3}} \cdot t dt + \lambda \left[\int_0^{t_{max}} x(t) dt - C \right], \tag{10}$$

где λ – множитель Лагранжа.

Решение задачи (10), согласно [13], должна удовлетворить условию

$$\frac{d\left\{a^{\frac{4}{3}} \cdot x(t)^{\frac{-b4}{3}} \cdot t + \lambda \cdot x(t)\right\}}{dx(t)} = 0. \tag{11}$$

Из (11) получим

$$\frac{-b4}{3} \cdot a^{\frac{4}{3}} \cdot x(t)^{\left(\frac{-b4}{3} - 1\right)} \cdot t + \lambda = 0. \tag{12}$$

Из (12) находим

$$x(t)^{-\left(\frac{b4}{3}+1\right)} = \frac{\lambda}{\frac{b4}{3} \cdot a^{\frac{4}{3}} \cdot t} \,. \tag{13}$$

Из (13) находим

$$x(t) = \sqrt[\frac{\frac{b4}{3}+1}{\frac{b4}{3}\cdot a^{\frac{4}{3}}\cdot t}}$$
 (14)

Для вычисления λ можно воспользоваться выражениями (9) и (14). Вычисленную таким способом обозначим как λ_0 .

Таким образом, нетрудно показать, что при

$$x = \sqrt[\frac{\frac{b4}{3} + 1}{\frac{b4}{3} \cdot a^{\frac{4}{3}} \cdot t}}$$
 (15)

целевой функционал (10) достигает минимума, т.к. повторная производная (12) по x(t) дает положительную величину.



Выводы

Исследована термальная безопасность операторов инфракрасных измерительных систем при осуществлении наземных измерений режимных показателей углеводородных газовых факелов. Такой наземный контроль режимных показателей факелов необходим для валидации космической информации, получаемой с различных спутников, осуществляющих контроль за газовыми факелами.

Показано, что при условии принятия некоторых интегральных ограничительных условий применительно функции К взаимосвязи основных режимных показателей проводимых наземных измерений можно вычислить оптимальный вид этой зависимости, при реализации которой операторы измерительной системы могут получить минимальную радиационную дозу.

Список используемых источников

- 1. Луговой О.В., Полбин А.В. О распределении бремени сокращения выбросов парниковых газов между поколениями // Журнал новой экономической ассоциации. 2016. № 3 (31). С. 12-39. DOI: 10.31737/2221-2264-2016-31-3-1.
- 2. Лопатин В.Н., Муравых А.И., Грицевич И.Г. Глобальное изменение климата, проблемы и перспективы реализации Киотского протокола в Российской Федерации. М.: РАГС, ЮНЕП, WWF-Россия, 2005. 40 с.
- 3. Логинов В.Ф., Коляда В.В. Влияние урбанизации на увеличение термических ресурсов юга Беларуси // Природопользование. 2010. № 18. С. 9-15.
- 4. Soszynska A., Sauberlich T., Fischer C., Borch J., Otremba F., Raulke R. Analysis of the Gas Flare Flame with IR Cameras // Materials of SPIE Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications X. Strasbourg, France. 2019. Vol. 11156. Article Number 1115606. DOI: 10.1117/12.2532887.



- 5. Global Gas Flaring Reduction Partnership (GGFR). Global Gas Flaring Data // The World Bank. 28.07.2019. URL: https://www.worldbank.org/en/programs/gasflaringreduction#7 (дата обращения: 24.08.2021).
- 6. Zhukov B., Lorenz E., Oertel D., Wooster M., Roberts G. Experience of Detection and Quantitative Characterization of Fires during the Experimental Small Satellite Mission BIRD. DLR-Forschungsbericht, 2005. 96 p. URL: https://elib.dlr.de/10817/ (дата обращения: 24.08.2021).
- 7. Haus R., Wilkinson R., Heland J., Schafer K. Remote Sensing of Gas Emissions on Natural Gas Flares // Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A. 1998. Vol. 7. Number 4. P. 853-862. DOI: 10.1088/0963-9659/7/4/020.
- 8. Gvakharia A., Kort E.A., Brandt A., Peischl J., Ryerson T.B., Schwarz J.P., Smith M.L., Sweeney C. Methane, Black Carbon and Ethane Emissions from Natural Gas Flares in the Bakken Shale, North Dakota // Environmental Sciences and Technology. 2017. Vol. 51. Issue 9. P. 5317-5325. DOI: 10.1021/acs.est.6b05183.
- 9. Conrad B.M., Johnson M.R. Field Measurements of Black Carbon Yields from Gas Flaring // Environmental Sciences and Technology. 2017. Vol. 51. Issue 3. P. 1893-1900. DOI: 10.1021/acs.est6b03690.
- 10. Zhang B., Liu Y., Laboureur D., Mannan M.S. Experimental Study on Propane Jet Fire Hazards: Thermal Radiation // Industrial and Engineering Chemistry Research. 2015. Vol. 50. Issue 37. P. 9251-9256.
- 11. Methods of Approximation and Determination of Human Vulnerability for Offshore Major Accident Hazard Assessment // Health and Safety Executive. 2011. URL: https://www.hse.gov.uk/foi/internalops/hid_circs/technical_osd/spc_tech_osd_30/spctecosd30.pdf (дата обращения: 24.08.2021).



- 12. Torvi D.A., Hadjisophocleous G.V., Hum J.K. A New Method for Estimating the Effects of Thermal Radiation from Fires on Building Occupants // Government of Canada. 2000. URL: https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=de8afe4a-d14b-4f5a-9000-2ae8cebf9a62 (дата обращения: 24.08.2021).
- 13. Эльгольц Л.Э. Диффееренциальные уравнения и вариационное ичсичление. М.: Наука, 1974. 432 с.

References

- 1. Lugovoi O.V., Polbin A.V. O raspredelenii bremeni sokrashcheniya vybrosov parnikovykh gazov mezhdu pokoleniyami [On Intergenerational Distribution of the Burden of Greenhouse Gas Emissions]. *Zhurnal novoi ekonomicheskoi assotsiatsii Journal of the New Economic Association*, 2016, No. 3 (31), pp. 12-39. DOI: 10.31737/2221-2264-2016-31-3-1. [in Russian].
- 2. Lopatin V.N., Muravykh A.I., Gritsevich I.G. *Global'noe izmenenie klimata, problemy i perspektivy realizatsii Kiotskogo protokola v Rossiiskoi Federatsii* [Global Climate Change, Problems and Prospects for the Implementation of the Kyoto Protocol in the Russian Federation]. Moscow, RAGS, YuNEP, WWF-Rossiya Publ., 2005. 40 p. [in Russian].
- 3. Loginov V.F., Kolyada V.V. Vliyanie urbanizatsii na uvelichenie termicheskikh resursov yuga Belarusi [Influence of Urbanization on the Increase of Thermal Resources of the South of Belarus]. *Prirodopol'zovanie Nature Management*, 2010, No. 18, pp. 9-15. [in Russian].
- 4. Soszynska A., Sauberlich T., Fischer C., Borch J., Otremba F., Raulke R. Analysis of the Gas Flare Flame with IR Cameras. *Materials of SPIE Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications X*. Strasbourg, France. 2019. Vol. 11156. Article Number 1115606. DOI: 10.1117/12.2532887.
- 5. Global Gas Flaring Reduction Partnership (GGFR). Global Gas Flaring Data. *The World Bank*. 28.07.2019. Available at: https://www.worldbank.org/en/programs/gasflaringreduction#7 (accessed 24.08.2021).



- 6. Zhukov B., Lorenz E., Oertel D., Wooster M., Roberts G. *Experience of Detection and Quantitative Characterization of Fires during the Experimental Small Satellite Mission BIRD*. DLR-Forschungsbericht, 2005. 96 p. Available at: https://elib.dlr.de/10817/ (accessed 24.08.2021).
- 7. Haus R., Wilkinson R., Heland J., Schafer K. Remote Sensing of Gas Emissions on Natural Gas Flares. *Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A*, 1998, Vol. 7, Number 4, pp. 853-862. DOI: 10.1088/0963-9659/7/4/020.
- 8. Gvakharia A., Kort E.A., Brandt A., Peischl J., Ryerson T.B., Schwarz J.P., Smith M.L., Sweeney C. Methane, Black Carbon and Ethane Emissions from Natural Gas Flares in the Bakken Shale, North Dakota. *Environmental Sciences and Technology*, 2017, Vol. 51, Issue 9, pp. 5317-5325. DOI: 10.1021/acs.est.6b05183.
- 9. Conrad B.M., Johnson M.R. Field Measurements of Black Carbon Yields from Gas Flaring. *Environmental Sciences and Technology*, 2017, Vol. 51, Issue 3, pp. 1893-1900. DOI: 10.1021/acs.est6b03690.
- 10. Zhang B., Liu Y., Laboureur D., Mannan M.S. Experimental Study on Propane Jet Fire Hazards: Thermal Radiation. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2015, Vol. 50, Issue 37, pp. 9251-9256.
- 11. Methods of Approximation and Determination of Human Vulnerability for Offshore Major Accident Hazard Assessment. *Health and Safety Executive*. 2011. URL: https://www.hse.gov.uk/foi/internalops/hid_circs/technical_osd/spc_tech_osd_30/spctecosd30.pdf (accessed 24.08.2021).
- 12. Torvi D.A., Hadjisophocleous G.V., Hum J.K. A New Method for Estimating the Effects of Thermal Radiation from Fires on Building Occupants. *Government of Canada*. 2000. Available at: https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=de8afe4a-d14b-4f5a-9000-2ae8ce bf9a62 (accessed 24.08.2021).



13. Elgolts L.E. *Diffeerentsial'nye uravneniya i variatsionnoe ichsichlenie* [Differential Equations and Calculus of Variations]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 432 p. [in Russian].

Сведения об авторах

About the Authors

Ильгар Хикмет оглы Асадов, аспирант Национального аэрокосмического агентства, г. Баку, Азербайджанская Республика

Ilgar H. Asadov, Post-graduate Student of National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic

e-mail: asadzade@rambler.ru

Рамиз Ахмед оглы Эминов, канд. техн. наук, Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, доцент кафедры «Поиск и разведка месторождений нефти и газа», г. Баку, Азербайджанская Республика

Ramiz A. Eminov, Candidate of Engineering Sciences, Azerbaijan State Oil and Industry University, Assistant Professor of Search and Survey of Oil and Gas Deposits Department, Baku, Republic of Azerbaijan

e-mail: Eminovramiz@mail.ru

Рена Омар кызы Гусейнова, канд. техн. наук, Азербайджанский архитектурно-строительный университет, доцент кафедры «Информационные технологии и системы», г. Баку, Азербайджанская Республика

Rena O. Huseynova, Candidate of Engineering Sciences, Azerbaijan University of Architecture and Civil Engineering, Assistant Professor of Information Technology and Systems Department, Baku, Republic of Azerbaijan e-mail: renahuseynova55@gmail.com