

Р. В. Халиков

(Академия Государственной противопожарной службы МЧС России;
e-mail: vokilah@rambler.ru)

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ РАЗВЕТВЛЁННО-ЦЕПНОГО ГОРЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ЗАМКНУТОМ ОБЪЁМЕ ГАЗОКОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ

РЕЗЮМЕ

Введение. В статье проанализирована роль теплового и цепного горения при пожаре в замкнутом объёме газокompрессорных станций. Определён механизм разветвлённо-цепного горения предельных углеводородов в газовой фазе. Проведён анализ существующих моделей горения предельных углеводородов. Составлена вероятностная модель разветвлённо-цепного горения предельных углеводородов в замкнутом объёме газокompрессорных станций, которая основывается на энергетических характеристиках носителей цепей в разветвлённо-цепном процессе горения.

Цель исследования – установление модели качественной взаимосвязи между кинетическими механизмами разветвлённо-цепного процесса горения предельных углеводородов и участвующими в нём носителями цепи (атомами и радикалами) в замкнутом объёме газокompрессорных станций.

Методы исследования. Для получения результатов использовались общенаучные и специальные методы научного познания – анализ, синтез, теория разветвлённо-цепного процесса горения, теория теплового горения, теория энергетического распределения Больцмана.

Результаты исследования. Проведён анализ основных механизмов кинетики химической реакции горения в замкнутом объёме газокompрессорных станций. Установлена качественная модель взаимосвязи между кинетическими механизмами разветвлённо-цепного процесса горения предельных углеводородов и участвующими в нём носителями цепи (атомами и радикалами) в замкнутом объёме газокompрессорных станций.

Заключение. С использованием полученной вероятностной модели можно рассчитать вероятность наступления разветвлённо-цепного процесса горения предельных углеводородов в замкнутых объёмах газокompрессорных станций для различных реакционных цепей. Это позволяет выбрать наиболее оптимальное управление химической реакцией горения в данных условиях, то есть определить как провести объёмное тушение наиболее эффективно. Найденная модель не противоречит существующим моделям, а полученные результаты подтверждаются эмпирическими данными.

Ключевые слова: вероятностная модель, разветвлённо-цепной процесс, газокompрессорные станции, замкнутые пространства, энергетическая структура, газофазное горение.

Для цитирования: Халиков Р. В. Вероятностная модель разветвлённо-цепного горения предельных углеводородов в замкнутом объёме газокompрессорных станций // Технологии техносферной безопасности. – 2021. – Вып. 1 (91). – С. 42-52. <https://doi.org/10.25257/TTS.2021.1.91.42-52>

1. Актуальность темы исследования

Вопросы обеспечения пожаровзрывобезопасности замкнутых объёмов газокomppressorных станций являются чрезвычайно важными для нормального функционирования инфраструктуры страны, эта и другие проблемы рассмотрены в работах [1-3]. Анализ работ [1-4] позволяет сделать вывод о том, что при пожарах в замкнутых объёмах газокomppressorных станций горение происходит в газовой фазе. Наибольшую опасность представляют пожары, связанные с горением природного газа и масел газоперекачивающих агрегатов, представляющих собой смесь предельных углеводородов [4, 5].

В работе [1] на основе анализа режима регулируемого вентилируемого пожара и его временных характеристик был сделан вывод о необходимости рассмотрения ингибирования горения на данных объектах в рамках теории разветвлённо-цепных процессов горения, то есть создания модели разветвлённо-цепного горения предельных углеводородов в замкнутом объёме газокomppressorных станций. Существуют модели [6, 7], описывающие горение смеси метана и воздуха, однако, несмотря на то, что они описывают процесс в многостадийной форме (более 2000 элементарных реакций). Они не отражают закономерностей химической кинетики процесса, что не позволяет их применить для рассмотрения горения других алканов. Существуют модели [8-14], описывающие процесс горения метановоздушных и этановоздушных смесей в интегральной форме. Однако в них отсутствует детальное описание разветвлённо-цепного механизма, что ограничивает их применение для процессов ингибирования.

2. Вероятностная модель разветвлённо-цепного процесса горения

Модель, описывающая химические аспекты пламенного горения, может быть представлена с учётом вероятностной характеристики процесса горения, которая позволяет максимально приблизить описание процесса горения к реальным условиям в момент пожара и его тушения, так как процесс пожаротушения нестационарен. Для составления данной модели необходимо рассмотреть механизмы, по которым протекает газофазное горение. Горение может быть реализовано двумя принципиально разными путями: тепловым и разветвлённо-цепным процессом [15]. В рамках теплового горения скорость химической реакции напрямую зависит от поступления тепла в систему, условие теплового горения может быть записано следующим образом [15]:

$$q_+ > q_-; \quad (1)$$

$$\frac{dq_+}{dT} > \frac{dq_-}{dT}, \quad (2)$$

где q_+ – скорость тепловыделения, $кДж/с$;

q_- – скорость теплоотвода, $кДж/с$;

T – температура, $К$.

В рамках тепловой теории процесс горения представлялся в виде одностадийной реакции, когда продукты реакции непосредственно получаются из горючего и окислителя. Однако подобное представление процесса не способно описать влияние малых концентраций ингибитора в смеси на кинетику химической реакций, при условии, что большая часть реакций ингибирования является экзотермическими реакциями [15].

Описать подобные процессы можно с помощью теории **разветвлённо-цепного процесса (РЦП)** горения, кинетика химической реакции в которой определяется взаимодействием активных промежуточных частиц – атомов и радикалов с реагентами. Общая схема разветвлённо-цепного процесса горения может быть представлена следующим образом [15]:



где A и B – исходные реагенты;

x, y, z – монорадикалы и бирадикал соответственно.

Как видно из зависимостей (3)-(7), на первом этапе происходит образование активных частиц – **носителей реакционных цепей (НЦ)** в зоне горения, затем начинается процесс разветвления и обрыва цепей. Необходимо отметить, что НЦ в силу своей высокой реакционной способности не только участвуют в РЦП горения, но и адсорбируются на свободных поверхностях и рекомбинируют. Поэтому необходимым условием РЦП является превышение скорости образования НЦ над их гибелью.

Для составления вероятностной модели РЦП горения необходимо рассмотреть энергетическое распределение частиц Больцмана и определить минимально необходимую энергию активации, для начала процесса горения в тепловом (E_a) и разветвлённо-цепном (E_r) процессе (рис. 1).

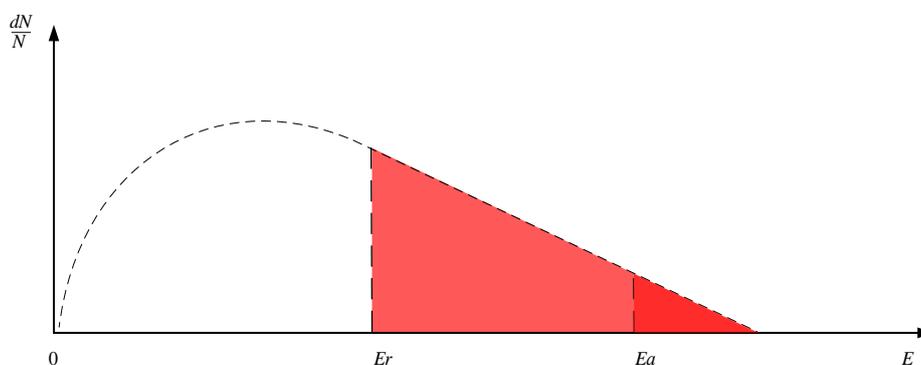


Рис. 1. Схема распределения частиц в зоне химической реакции горения по энергиям при определённой температуре

Вывод: на рис. 1 доля частиц, способных реагировать друг с другом ограничивается линией графика, осью абсцисс и перпендикуляром, проведённым к E_a , доля частиц в смеси, реагирующих с НЦ ограничивается линией графика, осью абсцисс и перпендикуляром, проведённым к E_r . Таким образом, путь реакции горения по РЦП менее энергозатратен, поэтому при составлении вероятностной модели разветвлённо-цепного процесса горения за основу возьмём РЦП. Кроме этого, рассмотрение моделей в работе [7] позволяет сделать предположение, что все реакции горения предельных углеводородов в замкну-

том объёме в стандартных условиях пожара в конечном итоге сводятся к РЦП горения водорода, открытого Н. Н. Семеновым и С. Н. Хиншелвудом [15]. Предположим, что это не так, тогда образование конечных продуктов в результате разветвлённо-цепного процесса будет ограничено, более того, данное утверждение противоречит условиям наступления РЦП (выражения (3)-(7)). Поэтому в основу вероятностной модели горения возьмём РЦП горения водорода [15].

Таким образом, составление вероятностной модели газофазных процессов горения предельных углеводородов, происходящих в замкнутых объёмах газокomppressorных станций, сводится к совмещению моделей, описанных в работах [6-14] и вероятностной теоремы Байеса, которая позволяет установить причинно-следственную связь между процессами. Полученная модель выглядит следующим образом:

$$P(\text{РЦП}) = \frac{P\left(\frac{N_{\text{Цактив}}}{N_{\text{Цобщ}}}\right)P(N_{\text{Цобщ}})}{P(N_{\text{Цактив}})}, \quad (8)$$

где $P(\text{РЦП})$ – вероятность наступления теоретического РЦП горения;

$P(N_{\text{Цактив}})$ – общее количество реакций НЦ с реагентами, приводящими к наступлению РЦП горения водорода; появление конкретного исхода среди остальных возможных;

$P(N_{\text{Цобщ}})$ – общее количество возможных реакций НЦ и реагентов.

В качестве входных данных для расчёта примем модель горения метано-воздушной и этановоздушных смесей, описанных в работе [7]. Результаты расчётов занесены в табл. 1, фактором разветвления называют разность скоростей разветвления и обрыва НЦ при единичной концентрации [15].

Таблица 1

Актуализированная модель горения метана и этана
в замкнутом объёме газокomppressorной станции

№ п/п	Вещество	Начальная элементарная реакция	Число вероятностных этапов реакции, n с учётом фактора разветвления	Вероятность разветвления, полученная по выражению (8), $P(\text{РЦП})$	Итог реакционного процесса
1	CH ₄	CH ₄ + ·H	$n + 4$	0,735	разветвление
		CH ₄ + ·OH	$n + 2$	0,138	гибель НЦ
		CH ₄ + ·CH ₃	n	0,027	гибель НЦ
2	C ₂ H ₆	C ₂ H ₆ + ·H	$n + 6$	0,633	разветвление
		C ₂ H ₆ + ·OH	$n + 3$	0,412	разветвление
		C ₂ H ₆ + ·CH ₃	$n + 8$	0,368	разветвление
		C ₂ H ₆ + ·C ₂ H ₅	$n + 4$	0,115	гибель НЦ
		C ₂ H ₆ + ·C ₂ H ₄	$n + 4$	0,103	гибель НЦ
		C ₂ H ₆ + ·C ₂ H ₂	$n + 4$	0,106	гибель НЦ
		C ₂ H ₆ + ·C ₂ H ₄ OH	$n + 2$	0,10	гибель НЦ
		C ₂ H ₆ + ·C ₂ H ₃ (OH) ₂	$n + 2$	0,087	гибель НЦ

Для установления взаимосвязи между полученными вероятностными характеристиками и реальным наступлением РЦП при пожарах в замкнутых объёмах газокompрессорных станций необходимо ввести энергетический интервал НЦ. Он устанавливает границы, в которых возникновение РЦП наиболее вероятно. Это связано с тем, что НЦ, обладающие энергией намного большей E_r , быстро покидают зону реакции и слабо участвуют в разветвлении цепи, а НЦ, обладающие энергией намного меньшей E_r , практически не попадают в зону интенсивного РЦП горения. Поэтому для оценки наступления реального РЦП горения углеводородов в замкнутом объёме газокompрессорной станции принимаем допустимый интервал разветвления (рис. 2), построенный в соответствии с энергетическими характеристиками НЦ, участвующий в радикальных реакциях разветвления [12, 16, 17].



Рис. 2. Интервальная схема разветвлённо-цепного процесса горения предельных углеводородов в замкнутом объёме

Вывод: согласно интервальной схеме РЦП (рис. 2), разветвление цепи в условиях пожара в замкнутом пространстве газокompрессорных станций наступает в интервале вероятности P (РЦП) от 0,15 до 0,75, вычисленной по формуле (8). Данное положение учитывалось при составлении табл. 1 для горения метановоздушной и этановоздушной смесей в замкнутых объёмах газокompрессорных станций.

На основании данных табл. 1 построим поясняющие гистограммы и графики (рис. 3-5).

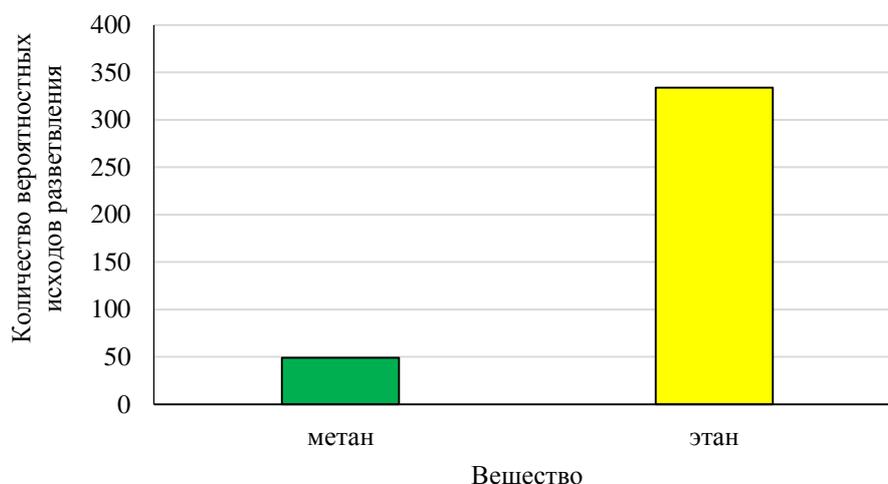


Рис. 3. Гистограмма зависимости общего количества вероятностных исходов разветвления для горения различных предельных углеводородов

Вывод: увеличение числа углеродов в составе предельных углеводов снижает вероятность наступления РЦП в условиях пожара. Это связано с тем, что увеличивается общее количество возможных вероятных исходов перед началом РЦП горения водорода, так как углеводороды с большим числом молекул углерода способны образовывать большее число углеводородных радикалов [6-8].

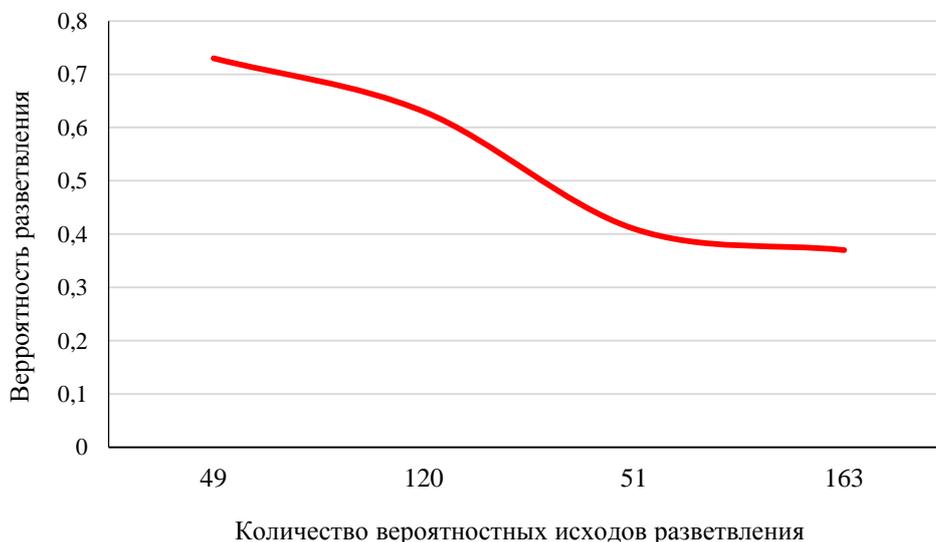


Рис. 4. График зависимости вероятности разветвления от количества вероятностных исходов разветвления

Общий анализ гистограммы (рис. 3) и графика (рис. 4) позволяет сделать вывод о том, что с увеличением молекулярной массы углеводов РЦП процесс происходит менее интенсивно. То есть его роль в сравнении с тепловым воспламенением снижается. Данное утверждение подтверждается увеличением количества продуктов неполного сгорания при увеличении их молекулярной массы [7].

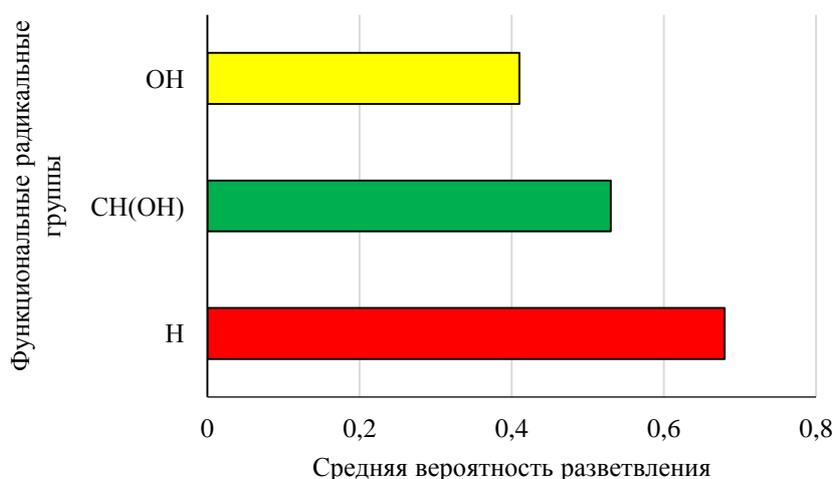


Рис. 5. Гистограмма вероятности разветвления цепи горения при взаимодействии с предельным углеводородом различных функциональных радикальных групп

В соответствии с гистограммой (рис. 5) можно сделать вывод, что для процессов химического торможения реакции горения в замкнутом объёме газокompрессорной станции в первую очередь необходимы радикалы водорода, так как они являются определяющими в РЦП.

3. Заключение

Полученная модель РЦП горения предельных углеводородов не противоречит моделям, описанным в работах [6-14], эмпирические данные [7-10] подтверждают справедливость установленной модели. Полученные в результате использования вероятностной модели данные позволяют рассчитать вероятность наступления РЦП горения предельных углеводородов в замкнутых объёмах газокompрессорных станций для различных реакционных цепей. Это даёт возможность выбрать ингибитор горения, блокирующий функциональные радикальные группы, обладающие наибольшей средней вероятностью разветвления цепи горения при взаимодействии с предельными углеводородами. Таким образом, использование найденных ингибиторов горения в области пожаротушения позволит повысить эффективность объёмного тушения пожаров.

Исследование проводится при поддержке Фонда содействия инновациям по договору № 15204ГУ/2020 от 05.06.2020

Литература

1. *Роенко В. В., Халиков Р. В.* Пожаровзрывобезопасность замкнутых пространств объектов газокomppressorных станций // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2020. № 1. С. 30-35. <https://doi.org/10.25257/FE.2020.1.30-35>
2. *Быков А. И.* Методика оценки массы природного газа, участвующего в образовании огненного факела при разрыве магистрального газопровода // Пожаровзрывобезопасность. 2015. Т. 24, № 9. С. 48-54. <https://doi.org/10.18322/PVB.2015.24.09.48-54>
3. *Пожаркова И. Н., Елфимова М. В., Лагунов А. Н.* Моделирование пожаров в машинных отделениях объектов теплоэнергетического комплекса // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2019. № 1. С. 39-45.
4. *Storesund K. L.* Fire incidents and potential fire incidents on Norwegian oil and gas installations // SPFR Report. 2015. https://www.researchgate.net/publication/325869491_Fire_incidents_and_potential_fire_incidents_on_Norwegian_oil_and_gas_installations
5. *Роенко В. В., Пряничников А. В., Бондарев Е. Б.* Применение температурно-активированной воды для тушения пожаров турбинных масел на объектах теплоэнергетики // Технологии техносферной безопасности. 2015. Вып. 4 (62). С. 84-93. <http://academygps.ru/ttb>.
6. *Купцова А. Ф.* Математическое моделирование кинетики химических процессов // Матер. междунар. научн. конф. "Уфимская осенняя математическая школа". Уфа: Башкирский государственный университет, 2019. С. 125-126.
7. *Прокофьев В. Г.* Дискретная модель горения донорно-акцепторной смеси // Физика горения и взрыва. 2020. Т. 56, № 2. С. 22-27. <https://doi.org/10.15372/FGV20200204>
8. *Фомин П. А., Троцюк А. В., Васильев А. А.* Приведенная модель химической кинетики детонационного горения метана // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2016. № 2 (4). С. 45-56.
9. *Пальмский И. Б., Пальмский В. И., Фомин П. А.* Конвекция Рэлея-Бенара в химически активном газе, находящемся в состоянии химического равновесия // Физика горения и взрыва. 2017. Т. 53, № 2. С. 3-14. <https://doi.org/10.15372/FGV20170201>
10. *Фёдоров А. В., Хмель Т. А., Лаврук С. А.* Выход волны гетерогенной детонации в канал с линейным расширением. I. Режимы распространения // Физика горения и взрыва. 2017. Т. 53, № 5. С. 104-114. <https://doi.org/10.15372/FGV20170513>
11. *Лаврук С. А.* Дифракция гетерогенной детонационной волны в канале с расширением // Тезисы докладов XI Всеросс. конф. молодых учёных "Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии". Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН. Новосибирск: изд-во: Параллель, 2017. С. 72-73.
12. *Drakon A. V., Eremin A. V., Azatyan V. V.* Features of Haloalkane Effect on the Concentration Limits and Induction Time for the Ignition of Methane-Oxygen Mixtures // Doklady Physical Chemistry. 2019. Vol. 484. Pp. 20-22. <https://doi.org/10.1134/S0012501619010068>
13. *Azatyan V. V., Petukhov V. A., Prokopenko V. M., Timerbulatov T. R.* Possible Gravitational Stratification of Components in Mixtures of Reaction Gases // Russian Journal of Physical Chemistry. 2019. Vol. 93. No. 5. Pp. 986-987. <https://doi.org/10.1134/S0036024419050030>
14. *Lytras I., Mitsopoulos E.P., Dogkas E., Koutmos P.* Алгебраическая модель для описания хемиллюминесценции в моделях турбулентного горения пропана // Физика горения и взрыва. 2020. Т. 56, № 3. С. 36-50. <https://doi.org/10.15372/FGV20200304>
15. *Азатян В. В.* Цепные реакции в процессах горения, взрыва и детонации газов: монография. Черноголовка: Объединенный институт высоких температур РАН. 2017. 431 с.
16. *Льюис Б., Эльбе Г.* Горение, пламя и взрывы в газах. Пер. с англ. М.: Мир, 1968. 592 с.
17. *Вестбрук С. К., Уртъев П. А.* Использование химической кинетики для расчёта критических параметров газовой детонации // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 6. С. 65-76.

Материал поступил в редакцию 22 июля 2020 г.; принят к публикации 7 декабря 2020 г.

R. V. Khalikov

(Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia;
e-mail: vokilah@rambler.ru)

PROBABILISTIC MODEL OF BRANCHED-CHAIN COMBUSTION OF SATURATED HYDROCARBONS IN A CLOSED VOLUME OF GAS COMPRESSOR STATIONS

ABSTRACT

Introduction. The article analyzes the role of thermal and chain combustion in a fire in a closed volume of gas compressor stations. The mechanism of the branched-chain combustion of saturated hydrocarbons in the gas phase has been determined. The analysis of existing models of combustion of saturated hydrocarbons is carried out. Probabilistic model of branched-chain combustion of saturated hydrocarbons in a closed volume of gas compressor stations based on the energy characteristics of the chain carriers in the branched-chain combustion process has been compiled.

The purpose of the study is to establish a model of qualitative relationship between the kinetic mechanisms of the branched-chain combustion process of saturated hydrocarbons and the chain carriers involved in it (atoms and radicals) in the closed volume of gas compressor stations.

Research methods. To obtain the results the general scientific and special methods of scientific knowledge – the analysis, synthesis, theory of branched-chain combustion process, thermal theory of combustion, theory of energy Boltzmann distribution, were used.

The results of the study. The analysis of the main mechanisms of the kinetics of the chemical reaction of combustion in a closed volume of gas compressor stations was carried out. A qualitative model of the relationship between the kinetic mechanisms of the branched-chain combustion process of saturated hydrocarbons and the chain carriers involved in it (atoms and radicals) in the closed volume of gas compressor stations is established.

Conclusion. The obtained probabilistic model allows us to calculate the probability of the occurrence of branched-chain combustion of saturated hydrocarbons within the closed volumes of gas compressor stations for different reaction chains. It allows us to choose the most effective control of chemical reactions of combustion under these conditions, that is, to define how to perform volumetric extinguishing most effectively. The found model does not contradict existing models, and the results obtained are confirmed by empirical data.

Key words: probabilistic model, branched-chain process, gas compressor stations, closed spaces, energy structure, gas-phase flame.

The research is carried out with the support of the Innovation Assistance Fund under the agreement No. 15204GU/2020 dated 05.06.2020

For citation: Khalikov R. V. Probabilistic model of branched-chain combustion of saturated hydrocarbons in a closed volume of gas compressor stations. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti / Technology of technosphere safety*, 2021, vol. 1 (91), pp. 42-52 (in Russian). <https://doi.org/10.25257/TTS.2021.1.91.42-52>

References

1. Royenko V. V., Khalikov R. V. Fire and explosion safety of enclosed spaces of gas-compressor stations. *Pozhary i chrezvychainye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya / Fire and emergencies: prevention, elimination*, 2020, no. 1, pp. 30-35 (in Russian). <https://doi.org/10.25257/FE.2019.1.12-18>.
2. Bykov A. I. Method of estimating of the natural gas mass involved in the formation of a fiery torch at break of the main pipeline. *Pozharovzrubebezopasnost / Fire and explosion safety*, 2015, vol. 24, no. 9, pp. 48-54 (in Russian). <https://doi.org/10.18322/PVB.2015.24.09.48-54>
3. Pozharkova I. N., Elfimova M. V., Lagunov A. N. Simulation of fire in the engine rooms of heat power complex objects. *Sibirskiy pozharno-spasatel'nyy vestnik / Siberian Fire and Rescue Bulletin*, 2019, no. 1, pp. 39-45 (in Russian).
4. Storesund K. L. Fire incidents and potential fire incidents on Norwegian oil and gas installations. *SPFR Report*, 2015. Available at: https://www.researchgate.net/publication/325869491_Fire_incidents_and_potential_fire_incidents_on_Norwegian_oil_and_gas_installations
5. Roenko V. V., Pryanichnikov A. V., Bondarev E. B. The use of temperature-activated water to extinguish fires of turbine oils in thermal power engineering facilities. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti / Technology of technosphere safety*, 2015, vol. 4 (62), pp. 84-93. Available at: <http://academygps.ru/ttb> (in Russian).
6. Kupcova A. F. Mathematical modeling of kinetics of chemical processes. *Mater. mezhdunar. nauchn. konf. "Ufimskaya osennyaya matematicheskaya shkola"* [Proceed. of International Scientific Conference "Ufa Autumn Mathematical School"], Ufa, Bashkir State University, 2019, pp. 125-126.
7. Prokofev V. G. Discrete model of combustion of a donor-acceptor mixture. *Fizika goreniya i vzryva / Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 22-27 (in Russian). <https://doi.org/10.15372/FGV20200204>
8. Fomin P. A., Trotsyuk A. V., Vasiliev A. A. Reduced model of chemical kinetics of detonation combustion of methane, *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti / Bulletin of the scientific center for work safety in the coal industry*, 2016, no. 2 (4), pp. 45-56 (in Russian).
9. Palymskiy I. B., Palymskiy V. I., Fomin P. A. Rayleigh–benard convection in a chemically active gas in the chemical equilibrium state. *Fizika goreniya i vzryva / Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2017, vol. 53, no. 2, pp. 123-133. <https://doi.org/10.1134/S0010508217020010>
10. Fedorov A. V., Khmel' T. A., Lavruk S. A. Exit of a heterogeneous detonation wave into a channel with linear expansion. I. Propagation regimes. *Fizika goreniya i vzryva / Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2017, vol. 53, no. 5, pp. 585-595. <https://doi.org/10.1134/S0010508217050136>
11. Lavruk S. A. *Difraktsiya geterogennoy detonatsionnoy volny v kanale s rasshireniem* [Diffraction of a heterogeneous detonation wave in a channel with expansion]. *Tezisy dokladov XI Vseross. konf. molodykh uchenykh "Problemy mekhaniki: teoriya, eksperiment i novye tekhnologii"* [Proceed. of XI All-Russian Conference Young Scientists "Problems of mechanics: theory, experiment, and new technologies"], S. A. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk, Parallel' Publ., 2017, pp. 72-73.
12. Drakon A. V., Eremin A. V., Azatyan V. V. Features of Haloalkane Effect on the Concentration Limits and Induction Time for the Ignition of Methane-Oxygen Mixtures. *Doklady Physical Chemistry*. 2019, vol. 484, pp. 20-22. <https://doi.org/10.1134/S0012501619010068>
13. Azatyan V. V., Petukhov V. A., Prokopenko V. M., Timerbulatov T. R. Possible Gravitational Stratification of Components in Mixtures of Reaction Gases. *Russian Journal of Physical Chemistry*, 2019, vol. 93, no. 5, pp. 986-987. <https://doi.org/10.1134/S0036024419050030>

14. Lytras I., Mitsopoulos E.P., Dogkas E., Koutmos P. Algebraic model for chemiluminescence emissions suitable for using in complex turbulent propane flame simulations. *Fizika goreniya i vzryva / Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2020, vol. 56, no. 3, pp. 36-50 (in Russian). <https://doi.org/10.15372/FGV20200304>

15. Azatyan V. V. *Tsepnye reaktsii v protsessakh goreniya, vzryva i detonatsii gazov: monografiya* [Chain reactions in combustion, explosion and detonation of gases: monograph]. Chernogolovka, Joint Institute for High Temperatures RAS Publ., 2017, 431 p.

16. Lewis B., Elbe G. *Gorenje, plamya i vzryvy v gazakh* [Combustion, Explosions and Flame in Gases]. Transl. from Engl., Moscow, Mir Publ., 1968, 592 p.

17. Vestbruk S. K., Urt'yev P. A. *Ispol'zovanie khimicheskoy kinetiki dlya rascheta kriticheskikh parametrov gazovoy detonatsii* [Using chemical kinetics to calculate critical parameters of gas detonation]. *Fizika goreniya i vzryva / Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 1983, vol. 19, no. 6, pp. 65-76.

Received July 22, 2020; accepted December 7, 2020

Информация об авторе

ХАЛИКОВ Ринат Валерьевич
адъюнкт факультета подготовки научно-педагогических кадров; Академия Государственной противопожарной службы МЧС России; Российская Федерация, 129366, г. Москва, улица Бориса Галушкина, 4; ORCID: 0000-0002-0842-4989; РИНЦ Author ID: 1045928; e-mail: vokilah@rambler.ru

Information about the author

KHALIKOV Rinat Valerevich
Postgraduate Student, Faculty of Training of Scientific and Pedagogical Personnel; Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia; Russian Federation, 129366, Moscow, Borisa Galushkina St., 4; ORCID: 0000-0002-0842-4989; RSCI Author ID: 1045928; e-mail: vokilah@rambler.ru