

Научная статья

УДК 614.845.1; DOI: 10.61260/2218-130X-2023-3-28-35

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ В «КОРОННОМ» ПЛАМЕНИ

✉ Кожевин Дмитрий Федорович.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ [Yagmort\\_KDF@mail.ru](mailto:Yagmort_KDF@mail.ru)

*Аннотация.* При исследовании «Коронного» пламени были замечены особенности формирования «Короны» при горении различных жидкостей. «Корона» различается по таким параметрам, как высота пиков («зубьев Короны»), частота образования пиков и частота смены пиков. Из анализа параметров «Короны» были получены фазовые портреты различных жидкостей. Оценка фазовых портретов жидкостей легла в основу нового подхода определения параметров горения жидкостей, где под частотой смены пиков представляется скорость химической реакции, а под частотой образования пиков – частота появления зон смеси с одинаковым качественным и количественным составом активных радикалов, характеризующихся высотой соответствующего пика.

*Ключевые слова:* «Коронное» пламя, горючие жидкости, активные радикалы, параметры горения жидкостей

**Для цитирования:** Кожевин Д.Ф. Определение параметров процессов горения в «Коронном» пламени // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2023. № 3. С. 28–35. DOI: 10.61260/2218-130X-2023-3-28-35.

Scientific article

## DETERMINATION OF PARAMETERS OF COMBUSTION PROCESSES IN THE «CROWN» FLAME

✉ Kozhevin Dmitry F.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ [Yagmort\\_KDF@mail.ru](mailto:Yagmort_KDF@mail.ru)

*Abstract.* When studying the «Crown» flame, features of the formation of the «Crown» during the combustion of various liquids were noticed. The «Crown» differs in such parameters as the height of the peaks («Crown teeth»), the frequency of peak formation and the frequency of peak changes. From the analysis of the «Crown» parameters, phase portraits of various liquids were obtained. The assessment of phase portraits of liquids formed the basis of a new approach to determining the combustion parameters of liquids, where the frequency of peak changes represents the rate of a chemical reaction, and the frequency of peak formation represents the frequency of occurrence of mixture zones with the same qualitative and quantitative composition of active radicals, characterized by the height of the corresponding peak.

*Keywords:* «Corona» flame, flammable liquids, active radicals, combustion parameters of liquids

**For citation:** Kozhevin D.F. Determination of parameters of combustion processes in the «Crown» flame // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2023. № 3. P. 28–35. DOI: 10.61260/2218-130X-2023-3-28-35.

## Введение

Науке известны различные виды пламен – турбулентное, ламинарное, диффузионное, кинетическое, «голубой вихрь», плоские пламена и т.д. Каждое пламя образуется при соответствующем характере горения: если смесь горючего и окислителя предварительно подготовлена, то такое горение носит название кинетического, если горючее и окислитель предварительно не смешаны и смешиваются в процессе горения, то такое горение называют диффузионным [1]. Если пламя при диффузионном горении имеет спокойный безвихревой характер, то его называют ламинарным; вихревое пламя с постоянно изменяющейся геометрической формой – турбулентным. Относительно недавно китайскими учеными был открыт новый вид пламени, который не относится ни к кинетическому, ни к диффузионному. Оно получило название «Голубой вихрь» [2]. Автором был открыт новый вид пламени – «Коронное пламя», названное так по причине характерной формы, похожей на корону. На установку для получения «Коронного» пламени получен патент на изобретение № 2782077. Настоящая статья посвящена исследованию «Коронного» пламени, образующегося при горении различных жидкостей.

## Материалы и методы исследования

«Коронное» пламя представляет собой пламя, при котором горение происходит в небольшой области – по периметру очага горения (рис. 1).

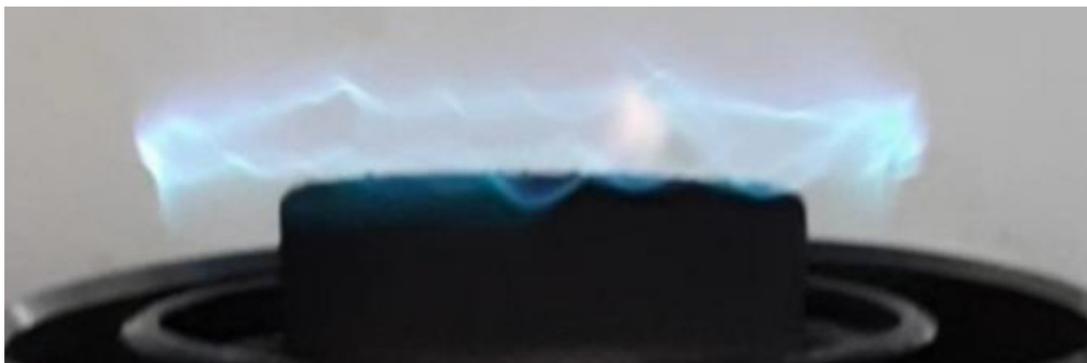


Рис. 1. «Коронное» пламя при горении гексана

«Коронное» пламя представляет интерес по трем основным причинам:

– пламя не является объемным, оно представляет собой полоску фронта пламени, так как взаимодействие горючего и окислителя происходит только с наружной стороны – стороны подачи окислителя, с внутренней стороны фронта пламени внутрь установки выделяются только продукты сгорания;

– пламя представляет собой замкнутую постоянно изменяющуюся синусоиду;

– сгорание большинства жидкостей (проведены эксперименты с алканами, спиртами, кетонами, керосином, уайт-спиритом, дизельным топливом) в «Коронном» пламени происходит до продуктов полного сгорания.

Факт образования фронта пламени в форме синусоиды («короны») при горении жидкостей дал следующие направления исследования «Коронного» пламени:

– анализ факторов, влияющих на его образование;

– условия его получения;

– исследование его характеристик.

Анализ факторов, влияющих на образование «Коронного» пламени, и условия его получения будут рассмотрены отдельно в других работах автора.

## Результаты исследования и их обсуждение

При проведении предварительных экспериментов с различными жидкостями выявлено, что «Корона» при горении разных жидкостей имеет различную форму. Под формой понимается частота пиков ( $C_{\text{пик}}$ ) – «зубьев Короны» и высота этих пиков ( $h_{\text{пик}}$ ). Кроме того, время смены пиков ( $t_{\text{пик}}$ ) также отличается для разных жидкостей.

Для определения численных параметров  $C_{\text{пик}}$ ,  $h_{\text{пик}}$ ,  $t_{\text{пик}}$  проведены эксперименты с видеофиксацией «Коронного» пламени для различных жидкостей.

Фиксация пламени на видео с четырех сторон (рис. 2) дает возможность сделать его проекцию на плоскость во времени (развертку, рис. 3). Характер распределения пиков показывает частоту пульсаций в пламени.

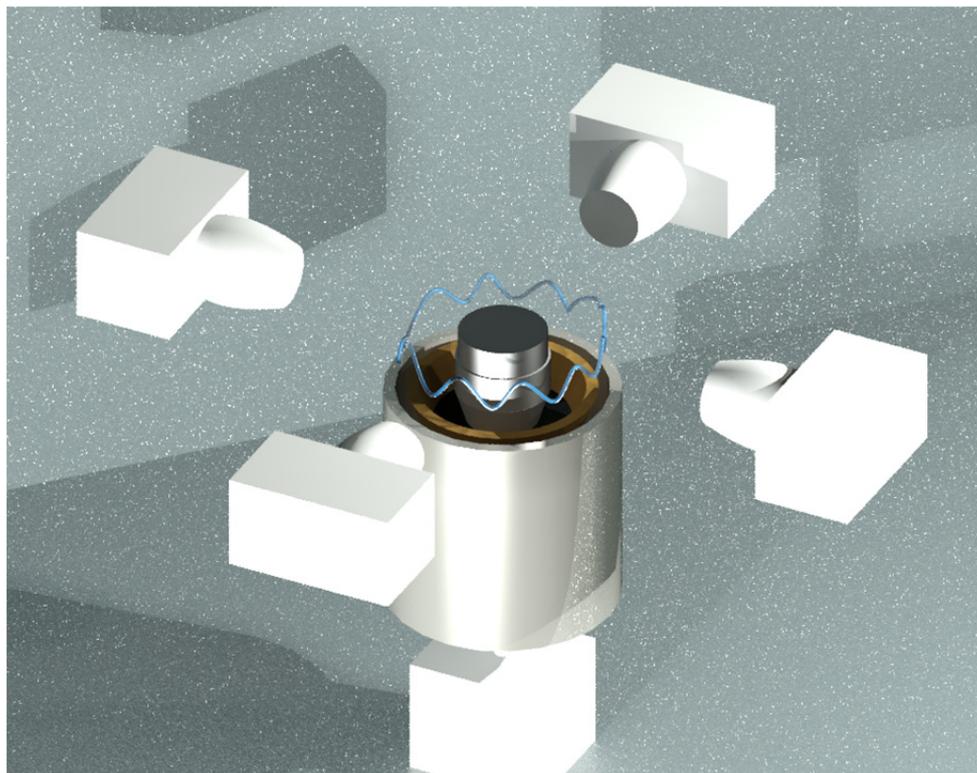


Рис. 2. Размещение камер при съемке коронного пламени

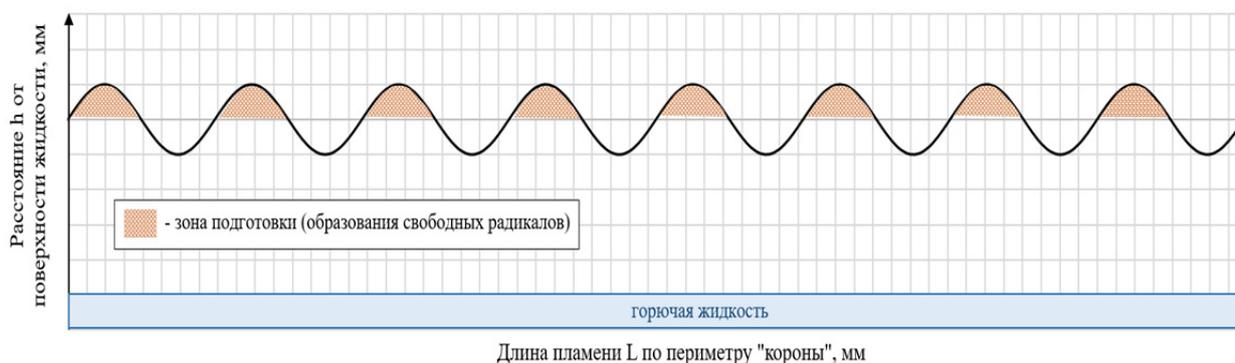


Рис. 3. Развертка пламени на плоскости в момент времени  $t_1$

График изменения положения верхней точки «Коронного» пламени относительно поверхности горючей жидкости имеет вид синусоиды. Так как процесс горения является сложным, его можно описать только дифференциальными уравнениями Навье-Стокса,

которые аналитически почти не имеют решения. Сложный процесс, обобщенное описание которого дифференциальными уравнениями нереализуемо, возможно описать исходя из анализа визуализации этих процессов [3]. С этой точки зрения анализ упрощенной модели «Коронного пламени» в виде синусоиды имеет весомые перспективы.

До недавнего момента применение графического метода к изучению пламени было не реализуемо. Открытие «Коронного пламени» (патент № 2782077) и получение его развертки в виде синусоиды позволяет применять графический подход для исследования пламени.

Согласно теории Н.Н. Семенова (радикально-цепной механизм самовоспламенения) [4–7] процесс горения идет не в одну стадию, а многостадийно с образованием промежуточных активных радикалов. При диффузионном или кинетическом горении образуется объемное пламя, в котором образование и распределение активных радикалов по объему проанализировать невозможно [8, 9]. В «Коронном» пламени его фронт сформирован в тонкую линию в форме синусоиды, причем под её пиками формально размещается зона подготовки активных радикалов. Высота пиков при этом различается из-за отличий в качественном и количественном составе активных радикалов.

Если пики отсутствуют, это указывает на сходный качественный и количественный состав радикалов в зоне подогрева перед фронтом пламени.

Следовательно, расстояние от «пика» до «ямы» фактически является коэффициентом пропорциональности скорости химической реакции, то есть  $\cos(h)=L$  – это косинус скорости химической реакции, при  $L=1$  частота соударения максимальна, качественный и количественный состав радикалов одинаков.

Исходя из химизма процесса окисления, скорость химической реакции зависит от скорости подачи горючего и скорости подачи окислителя:

$$\cos(x) = \cos(u_{\text{гор}}) + \cos(u_{\text{ок}}).$$

Схема подачи окислителя в установке приведена на рис. 4.

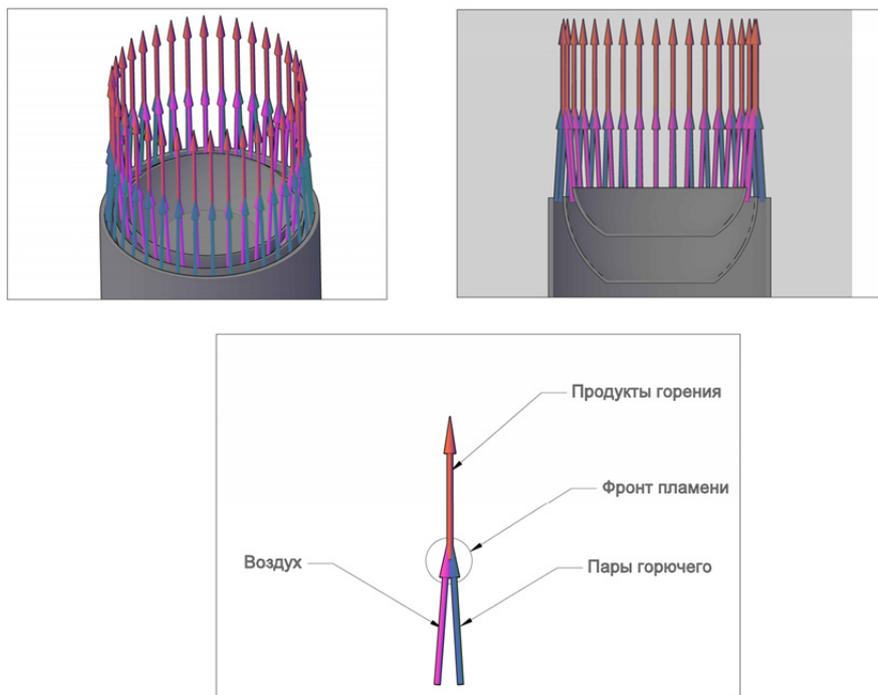


Рис. 4. Схема потоков воздуха, паров горючего и продуктов горения при формировании «Коронного» пламени

Скорость  $U_{ок}$  на установке (патент № 2782077) возможно определить численно. Скорость подачи горючего также возможно определить численно, исходя из температуры жидкости и её физико-химических свойств.

Анализируя полученную синусоиду для различных жидкостей, возможно определить фактические значения характеристик горения рассматриваемой жидкости. Причем численное описание процесса с помощью анализа синусоид (гармонические колебания) возможно рассчитать аналитически, что открывает новые перспективы для изучения процессов горения.

Кроме того, возможно анализировать процесс горения по фазовому портрету «Коронного» пламени на видео (рис. 5), полученному с помощью высокоскоростной камеры, где скорость химической реакции предположительно соответствует смене пиков синусоиды в единицу времени.

За полное время химической реакции принимается максимальное время на фазовом портрете в заданный момент времени.

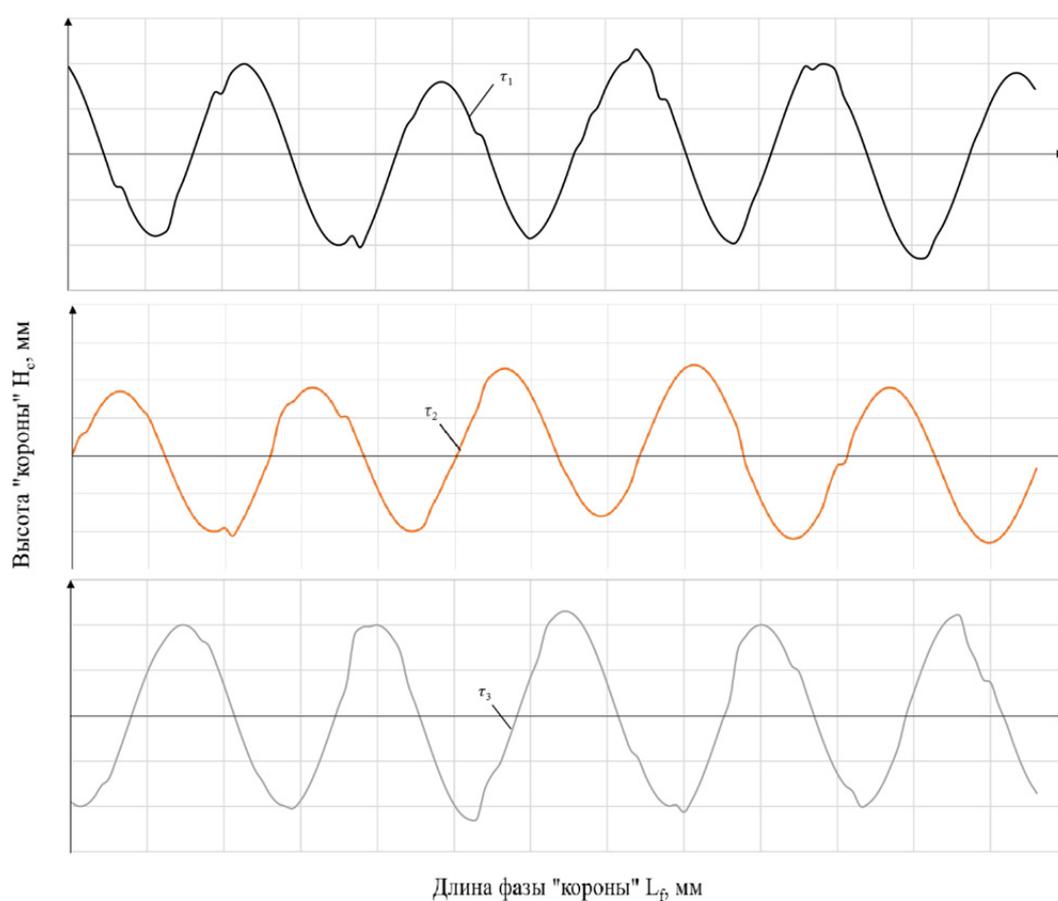
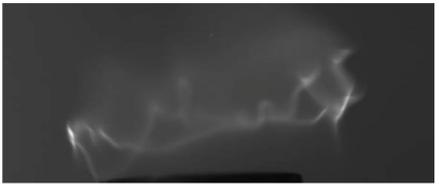
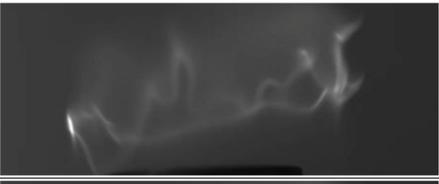
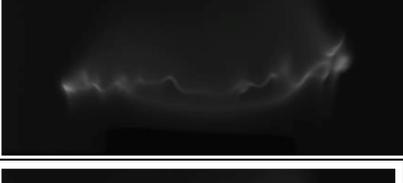
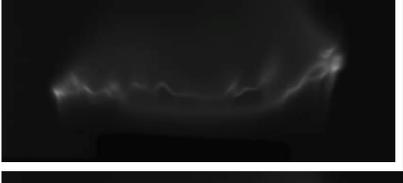
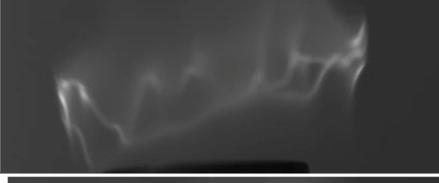
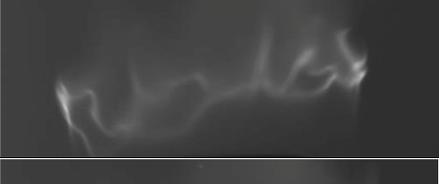


Рис. 5. Изменение фазового портрета «Коронного» пламени во времени

На высокоскоростной камере со скоростью 1 000 кадров в секунду были получены фазовые портреты «Коронного» пламени для следующих жидкостей: гептан, октан, нонан. Эти фазовые портреты приведены в таблице.

Таблица

**Изменение фазовых портретов жидкостей во времени**

Время, мс	Жидкость		
	Гептан	Октан	Нонан
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			

Из данных таблицы следует, что чем длиннее углеродная цепь, тем больше частота пиков и меньше их высота, кроме того уменьшается расстояние от зеркала жидкости до «Коронного» пламени. Условные фазовые портреты жидкостей приведены на рис. 6.

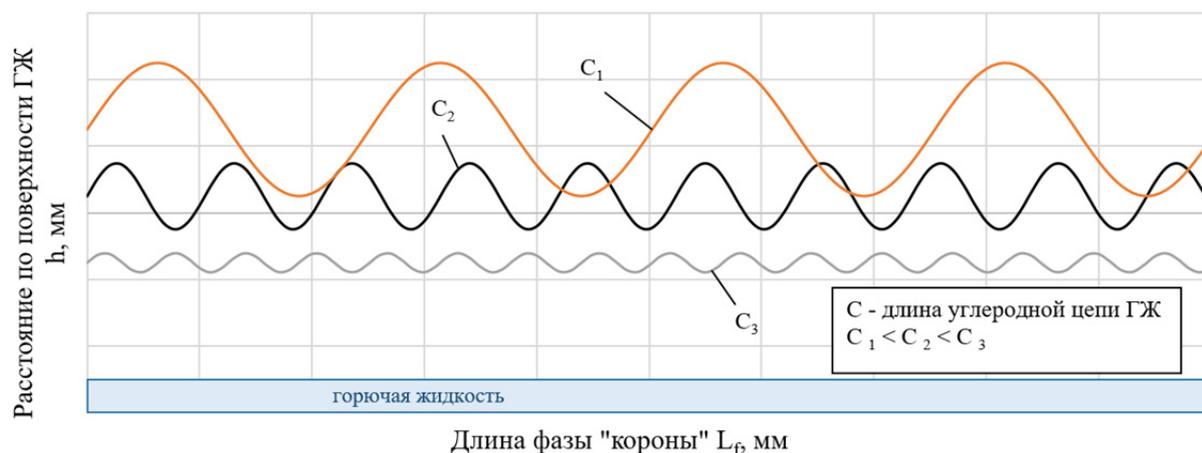


Рис. 6. Изменение фазовых портретов «Коронного» пламени в зависимости от длины углеродной цепи горючей жидкости

### Выводы

Описанные в статье результаты получены в натуральных экспериментах, их трактовка является гипотетической. Получение закономерностей на основе этой гипотезы требует дополнительных исследований.

В статье описан принципиально новый подход к определению характеристик пламен, в том числе кинетических параметров. Применение предлагаемого подхода в совокупности с существующими позволит с новой точки зрения подойти к определению кинетических параметров процесса горения.

Кроме научных аспектов следует отметить, что полученное «Коронное» пламя достаточно красиво визуально.

### Список источников

1. Тидеман Б.Е., Сциборский Д.Б. Химия горения. Л., 1935.
2. Xiao H., Gollner M.J., Oran E.S. From fire whirls to blue whirls and combustion with reduced pollution. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 113, 9457–9462 (2016).
3. Хаос. Создание новой науки / Джеймс Глик: пер. с англ. М. Нахмансона, Е. Барашковой. М.: Изд-во АСТ: CORPUS, 2023. 432 с.
4. Семёнов Н.Н. Самовоспламенение и цепные реакции // Успехи химии. Российская академия наук, 1967. Т. 36. № 1. С. 3–22.
5. Химическая энциклопедия / Н.С. Зефирова [и др.]. М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. Т. 5 (Три-Ятр). 783 с. ISBN 5-85270-310-9.
6. Денисов Е.Т. Кинетика гомогенных химических реакций. М.: Высш. шк., 1988. 391 с. ISBN 5-06-001337-5.
7. Денисов Е.Т., Саркисов О.М., Лихтенштейн Г.И. Химическая кинетика. М.: Химия, 2000. 568 с. ISBN 5-7245-1062-6.
8. Всеобщая история химии. История учения о химическом процессе. М.: Наука, 1981.
9. Семенов Н.Н. Цепные реакции. М.: Наука, 1986.

**References**

1. Tideman B.E., Sciborskij D.B. Himiya goreniya. L., 1935.
2. Xiao H., Gollner M.J., Oran E.S., From fire whirls to blue whirls and combustion with reduced pollution. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 113, 9457–9462 (2016).
3. Хаос. Sozдание novej nauki / Dzhejms Glik: per. s angl. M. Nahmansona, E. Barashkovej. M.: Izd-vo AST: CORPUS, 2023. 432 s.
4. Semyonov N.N. Samovosplamnenie i cepnye reakcii // Uspekhi himii. Rossijskaya akademiya nauk, 1967. T. 36. № 1. S. 3–22.
5. Himicheskaya enciklopediya / N.S. Zefirov [i dr.]. M.: Bol'shaya Rossijskaya enciklopediya, 1998. T. 5 (Tri-Yatr). 783 s. ISBN 5-85270-310-9.
6. Denisov E.T. Kinetika gomogennyh himicheskikh reakcij. M.: Vyssh. shk., 1988. 391 s. ISBN 5-06-001337-5.
7. Denisov E.T., Sarkisov O.M., Lihtenshtejn G.I. Himicheskaya kinetika. M.: Himiya, 2000. 568 s. ISBN 5-7245-1062-6.
8. Vseobshchaya istoriya himii. Istoriya ucheniya o himicheskom processe. M.: Nauka, 1981.
9. Semenov N.N. Cepnye reakcii. M.: Nauka, 1986.

**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 15.09.2023; одобрена после рецензирования: 24.09.2023; принята к публикации: 30.07.2023

**Information about the article:**

The article was submitted to the editorial office: 15.09.2023; approved after review: 24.09.2023; accepted for publication: 30.07.2023

*Сведения об авторах:*

**Кожевин Дмитрий Федорович**, начальник кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: Yagmort\_KDF@mail.ru. SPIN-код: 9647-7196

*Information about authors:*

**Kozhevin Dmitriy F.**, chief of the physical and chemical bases of the burning and extinguishing processes department of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovskiy ave., 149), candidate of technical sciences, e-mail: Yagmort\_KDF@mail.ru, SPIN: 9647-7196