

**Р. А. Крыев, А. М. Коробков, Е. Г. Белов,
С. В. Михайлов, Э. Р. Закирова**

ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ И ГАЛОГЕНСОДЕРЖАЩИХ ПОЛИМЕРОВ: ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

Ключевые слова: пиротехнические смеси, кремний, фторполимеры, скорость горения, энергетическая освещенность, продукты сгорания.

В статье представлены результаты экспериментальных исследований горения систем кремний-фтор-хлороорганические соединения (фторопласты марок Ф-3, Ф-32, Ф-4, Ф-40, Ф-42) в диапазоне изменения соотношения компонентов от 10 до 90 % масс. содержания горючего. Оценивалось время горения, энергетическая освещенность в диапазоне спектра 0,5-20,0 мкм по стандартной методике ГОСТ 2389-70. По полученным измерениям рассчитывалась скорость горения. Установлена экстремальная зависимость параметров горения с максимальными значениями линейной скорости горения и энергетической освещенности при содержании горючего в области 50 % масс. Определены концентрационные пределы горючести. Установлено, что концентрационный предел горючести для систем кремний – Ф-3 и кремний – Ф-40 составляет 40 – 80 % масс. содержания горючего; кремний – Ф-32 – 40 – 75 % масс. содержания горючего; кремний – Ф-42 и кремний – Ф-4 – 40 – 70 % масс. содержания горючего. В данных пределах поддерживается стабильное горение, при этом коэффициент уплотнения становится меньше с увеличением содержания кремния. Наибольшие значения энергетической освещенности достигаются для систем кремний – Ф-4 и кремний – Ф-40 и составляют 360-380 Вт/м². Характер образующихся твердых продуктов сгорания зависит от соотношения компонентов. До содержания горючего 50 % масс. при горении интенсивно образуется сажа. Микроскопический анализ данных продуктов показал, что они представляют собой нитевидные образования. Далее при увеличении содержания кремния более 50 % масс. количество сажи в продуктах горения снижается. Образуется твердый продукт сгорания в виде правильных колец.

**R. A. Kryev, A. M. Korobkov, E. G. Belov,
S. V. Mikhailov, E. R. Zakirova**

ENERGY-SATURATED MATERIALS BASED ON SILICON AND HALOGEN-CONTAINING POLYMERS: RESEARCH OF THE COMBUSTION PROCESS

Keywords: pyrotechnic mixtures, silicon, fluoropolymers, burning rate, energy luminance, combustion products.

The article presents the results of experimental studies of the combustion of silicon-fluorine-organochlorine compounds systems (fluoroplastics grades F-3, F-32, F-4, F-40, F-42) in the range of changing the ratio of components from 10 to 90% of the mass . fuel content. The burning time and energy illumination in the spectral range of 0.5-20.0 microns were assessed according to the standard GOST 2389-70 method. Based on the measurements obtained, the burning rate was calculated. An extreme dependence of combustion parameters with maximum values of linear combustion rate and energy illumination at a fuel content of 50 wt.% was established. Concentration limits of flammability have been determined. It has been established that the concentration limit of flammability for the silicon - F-3 and silicon - F-40 systems is 40 - 80 wt.% fuel content; silicon – F-32 – 40 – 75% wt. fuel content; silicon – F-42 and silicon – F-4 – 40 – 70% wt. fuel content. Within these limits, stable combustion is maintained, while the compaction coefficient becomes smaller with increasing silicon content. The highest values of energy illumination are achieved for the silicon - F-4 and silicon - F-40 systems and amount to 360-380 W/m². The nature of the resulting solid combustion products depends on the ratio of the components. Up to a fuel content of 50% wt. during combustion, soot is intensively formed. Microscopic analysis of these products showed that they are thread-like formations. Further, when the silicon content increases to more than 50% wt. the amount of soot in combustion products is reduced. A solid combustion product is formed in the form of regular rings.

Введение

Энергонасыщенные материалы на основе металлов и политетрафторэтилена привлекают внимание исследователей из-за высоких значений температуры горения и интенсивности излучения продуктов сгорания, возникающих при взаимодействии данных реагентов [1-5]. Однако исследование горения смеси кремния и фторполимера, в качестве которого использовался политетрафторэтилен, проводилось в основном за рубежом [6, 7]. В данной работе изучалось поведение при горении системы кремний-фторполимер (фторопласты различных марок) в условиях приближенных к применению в отечественной про-

мышленности с использованием сырьевой базы России. Работа по применению кремния в энергонасыщенных материалах проводится на кафедре Технология изделий из пиротехнических и композиционных материалов (КНИТУ).

Предварительно был проведен термодинамический расчет в пакете программ термодинамического анализа TERMPDS системы кремний-окислитель. В качестве окислителя были выбраны неорганические соединения (нитраты натрия, калия, бария, перхлорат калия) и фторопласт-4. По результатам данного расчета было установлено, что смесь кремния и фторопласта-4 (политетрафторэтилен) обладает более высокими значениями температуры горения и удельной теплотой сгорания, в отличие от составов кремния с

кислородсодержащими окислителями [8, 9].

На следующем этапе был проведен термодинамический расчет смесей кремния с различными фторопластами (Ф-3; Ф-32; Ф-40; Ф-42; Ф-4) в зависимости от соотношения компонентов. Установлено, что поведение системы кремний-фторопласт, независимо от их природы, существенно зависит от степени участия кислорода воздуха при термическом превращении, которое оказывает влияние, главным образом на температуру и состав конденсированных продуктов сгорания. При этом наибольшие значения температуры горения достигаются при содержании кремния 20-25 % масс. для систем кремний-фторопласт-3, кремний-фторопласт-32, кремний-фторопласт-4 и 5-10 % масс. содержания кремния для систем кремний-фторопласт-40, кремний-фторопласт-42 в случае использования собственных окислительных элементов смеси. При полном участии окислителя среды температура горения растет во всем диапазоне изменения концентрации горючего, при этом резкий подъем наблюдается в интервале 10-30 % масс. содержания кремния. Среди конденсированных продуктов сгорания наблюдаются такие как углерод, карбид кремния и несгоревший кремний, которые образуются при взаимодействии реагентов без участия среды; диоксид кремния, образующийся при дополнительном участии среды. Содержание того или иного продукта зависит от содержания кремния в составе. Также среди продуктов сгорания присутствуют вещества в газообразном состоянии, фториды и хлориды кремния, оксиды углерода, водорода в том случае, когда в химическом взаимодействии принимает участие кислород воздуха [10].

Объекты и методы исследования

На основе анализа результатов термодинамического расчета, опубликованных в статьях [8-10], были проведены экспериментальные исследования горения систем кремний – фтор-хлорорганические соединения (фторопласты марок Ф-3; Ф-32; Ф-40; Ф-42; Ф-4) в диапазоне изменения соотношения компонентов от 10 до 90 % масс. горючего. Природа полимеров выбиралась исходя из имеющейся номенклатуры и индивидуальных свойств, таких как содержание элементов фтора и хлора, в том числе количественное, а также теплофизические параметры (температура разложения, плавления и т.д.), свойства которых, в том числе структурные формулы, представлены в [11-15].

В качестве горючего использовался порошок кремния промышленного изготовления марки Кр-1, со средним размером частиц 16-19 мкм (определено по результатам дисперсного анализа на лазерном анализаторе Horiba Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950 в комплексной лаборатории «НаноАналитика»). Приготовление составов осуществлялось по принятой в пиротехнической промышленности методике. Формование образцов производилось методом глухого прессования на гидравлическом прессе ПСУ-50А по ГОСТ 310-60 при давлении 1000 кгс/см² (100 МПа) в пресс-инструменте диаметром 16,2 мм без оболочки.

Испытание образцов проводилось в вертикальной камере сжигания без обдува воздухом. Иницирование процесса горения смесей кремния и фторхлорорганики проводилось при дополнительном использовании воспламенительного пиротехнического состава, массой 0,5 г, который в свою очередь зажигался от нагретой спирали накаливания. Оценивалось время горения, энергетическая освещенность в диапазоне спектра 0,5-20,0 мкм по стандартной методике ГОСТ 2389-70. По полученным измерениям рассчитывалась скорость горения.

Обсуждение результатов исследования

Проведенные исследования позволили установить характер и концентрационные пределы горения, при данных условиях, кремния с различными фторопластами (рис. 1-2). Общей особенностью горения данных смесей является экстремальная зависимость параметров горения с максимальными значениями линейной скорости горения и энергетической освещенности при содержании горючего в области 50 % масс.

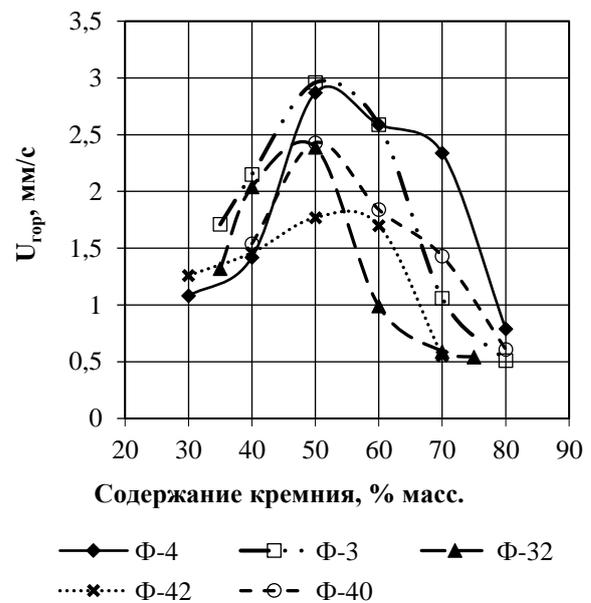


Рис. 1 – Зависимость линейной скорости горения (U_{top}) смеси кремний-фторорганика от содержания кремния

Fig. 1 – Dependence of the linear combustion rate (U_{burn}) of a silicon-fluororganic mixture on silicon content

Концентрационные пределы горения для систем кремний – фторполимер составляют:

- кремний – Ф-3 – 35 – 80 % масс. содержания горючего;
- кремний – Ф-32 – 35 – 75 % масс. содержания горючего;
- кремний – Ф-42 – 30 – 70 % масс. содержания горючего;
- кремний – Ф-40 – 40 – 80 % масс. содержания горючего;

– кремний – Ф-4 – 30 – 80 % масс. содержания горючего.

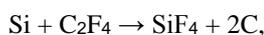
За предел горения было принято содержание кремния, при котором образец сгорал полностью. Как видно из полученных данных наиболее широким пределом горения обладает смесь из кремния и Ф-4. Однако, следует отметить, что для всех смесей нижний концентрационный предел горения составляет 30 – 40 % горючего; верхний концентрационный предел горения 70 – 80 %. Среди этих смесей следует выделить кремний – Ф-4 и кремний – Ф-42 которые устойчиво горят при концентрации горючего 30 %, что возможно связано с тем, что фторполимеры содержат максимальное количество фтора, 76 и 70 % соответственно.



Рис. 2 – Зависимость энергетической освещенности (E) смеси кремний-фторорганика от содержания кремния

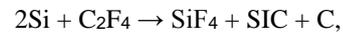
Fig. 2 – Dependence of irradiance (E) of a silicon-fluororganic mixture on silicon content

Известно, что максимальные значения параметров горения горючих смесей достигаются при концентрациях несколько выше стехиометрической, расчет которой производят по брутто-уравнению химической реакции или на основе результатов термодинамического расчета с использованием соответствующих программ, например, TERMPs. Стехиометрическое соотношение компонентов для смеси кремния и Ф-4, рассчитанное на основе уравнения химической реакции:



составляет 22 % масс. для кремния и 78 % масс. для фторопласта-4. При этом не учитывается участие кислорода воздуха. Подобный принцип расчета также приведен в соответствующих источниках [16-20] и согласуется с термодинамическим расчетом, проведенным на программе TERMPs [8-10], а также

по данным, представленных в зарубежной печати [21]. По результатам эксперимента при данной концентрации смесь не горит. Согласно данным термодинамического расчета системы кремний-Ф-4 при $\alpha = 0$ следует, что в качестве продуктов реакции, помимо SiF_4 , образуется SiC [8]. Учитывая данный факт, уравнение химической реакции записывается следующим образом:



а стехиометрическое соотношение компонентов составляет 36 % масс. для кремния и 64 % масс. для фторопласта-4. При данном соотношении компонентов смесь кремния и Ф-4 устойчиво горит при выбранных условиях эксперимента. Однако, максимальные значения параметров горения достигаются при концентрации кремния существенно превышающее, полученные значения.

Для получения объективной информации необходимо учитывать влияние кислорода воздуха на процесс горения. В реальных условиях образцы, подготовленные для сжигания, имеют плотность запрессовки менее единицы. Таким образом, априори, в процессе горения окислитель среды, заключенный, в том числе в межчастичное пространство гетерогенной системы, будет принимать участие в реакции горения. Тогда уравнение химической реакции, с учетом возможных продуктов реакции, полученных в результате термодинамического расчета при α больше нуля [8], можно записать следующим образом:



Стехиометрическое соотношение компонентов в этом случае составляет 39 % масс. для кремния, 46 % масс. для фторопласта-4 и 15 % масс. для кислорода воздуха. Суммарное содержание кремния и Ф-4 в системе составляет 85 %, так как при приготовлении пиротехнического состава используют определенное соотношение конденсированных компонентов, то 85 % можно принять за 100 % и, сделав пересчет для двухкомпонентной системы, получим, что соотношение компонентов при котором достигается стехиометрия составляет 46 % масс. для кремния и 54 % для фторопласта-4.

Таким образом, последнее уравнение химической реакции с гипотетическими продуктами наиболее полно отражает процесс горения системы кремний – Ф-4 и позволяет рассчитать ее стехиометрическую концентрацию, которая сходится с экспериментальными данными. Учитывая тот факт, что в реальных горючих системах максимальные значения параметров горения достигаются при концентрации горючего несколько выше стехиометрического, обусловленное диффузионными затруднениями, наибольшие значения скорости горения и энергетической освещенности для данной системы обнаруживаются при содержании кремния 50 % масс.

Так как все смеси кремния с фторхлорполимерами устойчиво горят при содержании горючего от

40 % до 70 %, то дальнейший анализ проведен в указанном диапазоне. Сравнительный анализ позволил установить, что при содержании кремния 40 % смеси с Ф-3 и Ф-32 имеют скорость горения 2,0-2,1 мм/с, а с Ф-4, Ф-40, Ф-42 – 1,40-1,55 мм/с. Увеличение содержания кремния до 50 % (несколько выше стехиометрического) приводит к повышению скорости горения до максимальных значений. Для систем кремний – Ф-3, кремний – Ф-4, до 3 мм/с; для систем кремний – Ф-40 и кремний – Ф-32 до 2,5 мм/с; для кремний – Ф-42 до 1,8 мм/с. Наибольшее увеличение происходит для системы кремний – Ф-4 (в 2 раза); для системы кремний – Ф-40 – 1,4 раза; кремний – Ф-3 – 1,6 раза; кремний – Ф-42 и кремний – Ф-32 – 1,2 раза. Дальнейшее увеличение содержания кремния приводит к уменьшению скорости горения до 2,5 мм/с для систем кремний – Ф-4 и кремний – Ф-3 в 1,11 и 1,14 раза соответственно. Наибольшее снижение наблюдается для системы кремний – Ф-32 в 2,4 раза; наименьшее снижение для смеси кремний – Ф-42 в 1,04 раза. Для системы кремний – Ф-40 снижение составляет 1,32 раза.

При содержании кремния 70 % скорость горения продолжает отличаться относительно максимальных значений. Наибольшее снижение наблюдается для системы кремний – Ф-32, кремний – Ф-42 и кремний – Ф-3 в 2,8-4,0 раза, наименьшее для смесей кремний – Ф-4 (1,2 раза) и кремний – Ф-40 (1,2 раза).

Общий анализ изменения скорости горения, рассматриваемых систем, показывает, что на отрезке изменения содержания кремния от 40 до 50 % масс. смеси кремния с фторхлорполимерами по резкому подъему данного параметра можно расположить в ряд: Si–Ф-32 → Si–Ф-42 → Si–Ф-3 → Si–Ф-40 → Si–Ф-4. На отрезке 50 – 60 % масс. содержания кремния по ее резкому уменьшению: Si–Ф-42 → Si–Ф-3 (Si–Ф-4) → Si–Ф-40 → Si–Ф-32. Таким образом, к наиболее реакционноспособным системам можно отнести смеси кремния с Ф-3, Ф-4 и Ф-40.

Анализ изменения энергетической освещенности для рассматриваемых систем показал, что наибольшее значения данного параметра достигаются для систем кремний – Ф-4 и кремний – Ф-40. Причем энергетическая освещенность практически одинакова для данных систем во всем диапазоне изменения концентрации кремния. На что также следует обратить внимание это, то, что рассматриваемый параметр горения позволяет четко выделить группы с близкими значениями параметров:

- 1) Кремний–Ф-4, кремний–Ф-40;
- 2) Кремний – Ф-42, кремний – Ф-32.

Система кремний – Ф-3 занимает промежуточное положение и близка по данному параметру к смеси кремния с Ф-40. Максимальное значение энергетической освещенности ($Вт/м^2$) достигается при соотношении горючее-окислитель 50/50 и составляет для систем: Si – Ф-4 – 362; Si – Ф-40 – 383; Si – Ф-3 – 291; Si – Ф-42 – 212; Si – Ф-32 – 183. Основными излучателями в ИК-области спектра при горении составов, содержащих кремний и фторорганический окислитель, являются сажа и диоксид кремния [22], наличие которых в продуктах сгорания подтверждается проведенными ранее термодинамическими расчетами.



Рис. 3 – Фотографии продуктов сгорания системы кремний-фторхлорполимер при содержании горючего менее 50 % масс. (общий вид)

Fig. 3 – Photographs of combustion products of the silicon-fluorochloropolymer system with a fuel content of less than 50% by weight

Характер продуктов горения рассматриваемых систем зависит от соотношения между горючим и окислителем. Условно, до содержания горючего 50 % масс. включительно при горении интенсивно образуются сажистые продукты горения, представляющие из себя «пух» (рис. 3). Микроскопический анализ данных продуктов показал, что они представляют собой нитевидные образования (рис. 4). Далее при увеличении содержания кремния более 50 % количество сажистых продуктов горения снижается. Образуется твердый продукт сгорания в виде правильных колец, по-видимому, такие образования возможны из-за разности температуры в центре образца и по периферии (рис. 5). Отдельно следует отметить спиновый режим горения всех образцов кремний – фторорганика, в особенности при содержании кремния больше 50 % масс., при котором на поверхности цилиндрического образца возникает небольшое светящееся пятно, движущееся по спирали по внешней части образца.



Рис. 4 – Микрофотографии продуктов сгорания системы кремний-фторхлорполимер при содержании горючего менее 50 % масс. (увеличение 200x)

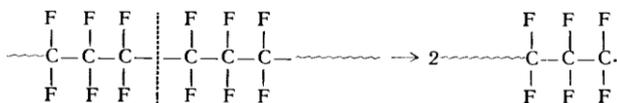
Fig. 4 – Microphotographs of combustion products of the silicon-fluorochloropolymer system with a fuel content of less than 50% by weight (magnification 200x)



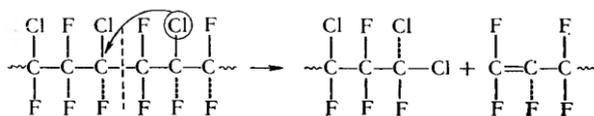
Рис. 5 – Фотографии продуктов сгорания системы кремний-фторхлорполимер при содержании горючего более 50 % масс. (общий вид)

Fig. 5 – Photographs of combustion products of the silicon-fluorochloropolymer system with a fuel content of more than 50% by weight

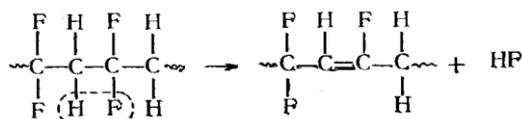
Различие в параметрах горения исследуемых смесей определяется кинетикой и составом продуктов разложения полимеров, которые в данном случае относятся к общему классу фторполимеров, но различаются элементным набором вещества, что в конечном итоге сказывается на свойствах вещества и поведении при горении. Например, пиролиз Ф-4 протекает по следующему механизму: разрыв связей в главной цепи приводит к образованию двух радикалов, которые в дальнейшем служат центрами реакции деполимеризации, протекающей по радикальному механизму и приводящей к образованию мономера.



Если же во фторполимере кроме атомов фтора содержатся атомы хлора, то благодаря меньшей энергии связи С-Сl атом хлора способен мигрировать, реакция будет протекать по другому механизму (реакция диспропорционирования макрорадикалов) и выход мономера уменьшится.



При наличии во фторполимере атомов водорода деструкция сопровождается образованием и отщеплением HF, в результате чего выход мономера практически равен нулю [11, 23-26].



Следует отметить, что при горении гетерогенных

конденсированных систем проявляется синергизм, при котором большое значение приобретает взаимодействие компонентов в процессе их термического взаимодействия, которое в свою очередь зависит, в том числе и от взаимного расположения дисперсных компонентов внутри системы и на поверхности горения [27]. Например, алюминий, магний, титан, цирконий и сплав АМ существенного влияния на температуру начала разложения Ф-32Л не оказывают, а кремний, медь, железо, цинк и никель приводят к резкому её снижению. Кривые ДТА показывают, что в присутствии алюминия, магния и сплава АМ тепловыделения незначительны, а в присутствии остальных металлов более существенны [11].

Заключение

В результате проведенных исследований получены закономерности горения кремния с фторхлорполимерами. Установлены концентрационные пределы горючести систем кремний-фторопласт-4, фторопласт-40, фторопласт-42, фторопласт-3, фторопласт-32, уплотненных при давлении прессования 100 МПа, которые составили 30-80 % масс. содержания горючего. Максимальные значения скорости горения и энергетической освещенности достигаются при содержании кремния 50 % масс. для всех систем.

Литература

1. Ш. Л. Гусейнов, С. Г. Федоров, *Нанопорошки алюминия, бора, боридов алюминия и кремния в высокоэнергетических материалах*. Торус пресс, Москва, 2015. 256 с.
2. G. Boskovic, D. Negoicic, *Sci. Tech. Rev.*, **59**, 1, 70-77 (2009).
3. Е.-С. Koch, *Propell. Explos. Pyrot.*, **31**, 1, 3-19 (2006).
4. Е.-С. Koch, *Propell. Explos. Pyrot.*, **26**, 1, 3-11 (2001).
5. Е.-С. Koch, A. Dochnahl, *Propell. Explos. Pyrot.*, **25**, 37-40 (2000).
6. Е.-С. Koch, D. Clement, *Propell. Explos. Pyrot.*, **32**, 3, 205-212 (2007).
7. A. Ksistczak, H. Boniuk, S. Cudzilo, *J. Therm. Anal. Calorim.*, **74**, 2, 569-574 (2003).
8. Р. А. Крыев, Л.К. Нурисламова, А.М. Коробков, *Вестник технологического университета*, **22**, 12, 68-70 (2019).
9. Р. А. Крыев, Л. К. Нурисламова, А. М. Коробков, *Всероссийская научно-методическая конференция «Современные проблемы специальной технической химии»* (Казань, Россия, 25-27 ноября, 2019). КНИТУ, Казань, 2019. с. 82-83.
10. Р. А. Крыев, А. М. Коробков, С. В. Михайлов, Э. Р. Закирова, *Вестник технологического университета*, **26**, 3, 53-57 (2023).
11. Ф. П. Мадыкин, Н. А. Тихонова, *Компоненты и продукты сгорания пиротехнических составов. Т.2. Полимеры и олигомеры*. Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, Казань, 2008.492 с.
12. Ю. А. Паншин, С. Г. Малкович, Ц. С. Дунаевская, *Фторопласты*. Химия, Ленинград, 1978. 232 с.
13. З. Л. Баскин, Д. А. Шабалин, Е. С. Выражейкин, С. А. Дедов, *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева)*, **LI**, 3, 13-23, (2008).
14. П. Таррант, В кн. *Фтор и его соединения*. Т. 2. Издательство «Иностранной литературы», Москва, 1956. с. 219-290.
15. М. Гудлицкий, *Химия органических соединений фтора*. ГНТХЛ, Москва, 1961. с. 309-316.

16. Г. А. Петров, А. Г. Петров, *Скорость распространения волны гомогенно–гетерогенных реакций в открытой гетерогенной химической системе*. Химия, Москва, 2001. 192 с.
17. А. А. Шидловский, *Основы пиротехники*. Машиностроение, 1973. 320 с.
18. В. Э. Мельников, *Современная пиротехника*. ППП «Типография «Наука», Москва, 2014. 480 с.
19. Н. М. Вареных [и др.], *Пиротехника*. КНИТУ, Казань, 2015. с. 61-62.
20. И. А. Абдуллин [и др.], *Гражданская пиротехника*. КНИТУ, Казань, 2013. с. 134-135.
21. Cole D. Yarrington, Steven F. Son, Timothy J. Foley, *Journal of Propulsion and Power*, **26**, 4, 734-743 (2010).
22. Chengkuan Shi, Jian Ju, Zejun Li, Zefeng Guo, Hua Guan, *3rd International Conference on Chemistry and Energy Research* (Shenzhen, China, October 23-25, 2020). IOP Publishing, Shenzhen, 2021. Volume 639. P. 012021.
23. Н. Н. Бахман, А. Ф. Беляев, *Горение гетерогенных конденсированных систем*. Изд-во «Химия», Москва, 1967. 228 с.
24. Р. М. Асеева, Г. Е. Заиков, *Горение полимерных материалов*. Наука, Москва, 1981. 280 с.
25. С. М. Решетников, И. С. Решетников, *Анатомия горения*. НГСС, Москва, 2014. 247 с.
26. С. Мадорский, *Термическое разложение органических полимеров*. Мир, Москва, 1967. 328 с.
27. С. А. Рашковский. Дисс. докт. физ.-мат. наук, Ин-т проблем механики РАН, Москва, 2004. 430 с.
10. R. A. Kryev, A. M. Korobkov, S. V. Mikhailov, E. R. Zakirova, *Herald of Technological University*, 26, 3, 53-57 (2023).
11. F. P. Madyakin, N. A. Tikhonova, Components and combustion products of pyrotechnic compositions. T.2. Polymers and oligomers. Publishing house Kazan. state technol. University, Kazan, 2008. 492 p.
12. Yu. A. Panshin, S. G. Malkovich, Ts. S. Dunaevskaya, *Fluoroplastic. Chemistry*, Leningrad, 1978. 232 p.
13. Z. L. Baskin, D. A. Shabalin, E. S. Vyrasheikin, S. A. Dedov, Ros. chem. and. (*Journal of Russian Chemical Society named after D.I. Mendeleev*), LII, 3, 13-23, (2008).
14. P. Tarrant, In the book. Fluorine and its compounds. T. 2. Publishing house "Foreign Literature", Moscow, 1956. p. 219-290.
15. M. Gudlitsky, *Chemistry of organic fluorine compounds*. GNTHL, Moscow, 1961. p. 309-316.
16. G. A. Petrov, A. G. Petrov, Velocity of propagation of a wave of homogeneous–heterogeneous reactions in an open heterogeneous chemical system. Chemistry, Moscow, 2001. 192 p.
17. A. A. Shidlovsky, *Fundamentals of pyrotechnics*. Mechanical engineering, 1973. 320 p.
18. V. E. Melnikov, *Modern pyrotechnics*. PPP "Printing house "Nauka", Moscow, 2014. 480 p.
19. N. M. Varenykh [etc.], *Pyrotechnics*. KNRTU, Kazan, 2015. p. 61-62.
20. I. A. Abdullin [et al.], *Civil pyrotechnics*. KNRTU, Kazan, 2013. p. 134-135.
21. Cole D. Yarrington, Steven F. Son, Timothy J. Foley, *Journal of Propulsion and Power*, 26, 4, 734-743 (2010).
22. Chengkuan Shi, Jian Ju, Zejun Li, Zefeng Guo, Hua Guan, *3rd International Conference on Chemistry and Energy Research* (Shenzhen, China, October 23-25, 2020). IOP Publishing, Shenzhen, 2021. Volume 639. P. 012021.
23. N. N. Bakhman, A. F. Belyaev, *Combustion of heterogeneous condensed systems*. Publishing house "Chemistry", Moscow, 1967. 228 p.
24. R. M. Aseeva, G. E. Zaikov, *Combustion of polymeric materials*. Nauka, Moscow, 1981. 280 p.
25. S. M. Reshetnikov, I. S. Reshetnikov, *Anatomy of combustion*. NGSS, Moscow, 2014. 247 p.
26. S. Madorsky, *Thermal decomposition of organic polymers*. Mir, Moscow, 1967. 328 p.
27. S. A. Rashkovsky. Diss. doc. physics and mathematics Sciences, Institute of Problems of Mechanics RAS, Moscow, 2004. 430 p.

References

1. Sh. L. Guseinov, S. G. Fedorov, *Nanopowders of aluminum, boron, aluminum and silicon borides in high-energy materials*. Toruspress, Moscow, 2015. 256 p.
2. G. Boskovic, D. Negoicic, *Sci. Tech. Rev.*, **59**, 1, 70-77 (2009).
3. E.-C. Koch, *Propell. Explos. Pyrot.*, **31**, 1, 3-19 (2006).
4. E.-C. Koch, *Propell. Explos. Pyrot.*, **26**, 1, 3-11 (2001).
5. E.-C. Koch, A. Dochnahl, *Propell. Explos. Pyrot.*, **25**, 37-40 (2000).
6. E.-C. Koch, D. Clement, *Propell. Explos. Pyrot.*, **32**, 3, 205-212 (2007).
7. A. Ksistczak, H. Boniuk, S. Cudzilo, *J. Therm. Anal. Calorim.*, **74**, 2, 569-574 (2003).
8. R. A. Kryev, L. K. Nurislamova, A. M. Korobkov, *Herald of Technological University*, 22, 12, 68-70 (2018).
9. R. A. Kryev, L. K. Nurislamova, A. M. Korobkov, All-Russian scientific and methodological conference "Modern problems of special technical chemistry" (Kazan, Russia, November 25-27, 2019). KNRTU, Kazan, 2019. p. 82-83.

© **Р. А. Кривев** – к.т.н., доцент кафедры Технологии изделий из пиротехнических и композиционных материалов (ТИПКМ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, kryivra@corp.knrtu.ru; **А. М. Коробков** – д.т.н., профессор кафедры ТИПКМ, КНИТУ, spektr@kstu.ru; **Е. Г. Белов** – д.т.н., профессор кафедры ТИПКМ, КНИТУ, spektr@kstu.ru; **С. В. Михайлов** – к.т.н., доцент кафедры ТИПКМ, КНИТУ, spektr@kstu.ru; **Э. Р. Закирова** – студент кафедры ТИПКМ, КНИТУ, spektr@kstu.ru.

© **R. A. Kryev** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Department of Technologies of Products from Pyrotechnic and Composite Materials (TPPCM), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, kryivra@corp.knrtu.ru; **A. M. Korobkov** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, the TPPCM department, KNRTU, spektr@kstu.ru; **E. G. Belov** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, the TPPCM department, KNRTU, spektr@kstu.ru; **S. V. Mikhailov** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, the TPPCM department, KNRTU, spektr@kstu.ru; **E. R. Zakirova** – Student, the TPPCM department, KNRTU, spektr@kstu.ru.