

УДК 662.612.3

**ГОРЕНИЕ ПОЛИМЕРОВ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ**

© 2013 С. М. Решетников, А. П. Позолотин, И. А. Зырянов

Вятский государственный университет

Представлены результаты экспериментального исследования влияния внешнего электростатического поля на массовую скорость горения и температуру пламени полиметилметакрилата (ПММА), бутадиен-нитрильного каучука (СКН-26), бутадиен-стирольного каучука (СКМС-30), этиленпропиленового каучука (СКЭПТ), полибутадиенового каучука (СКД-2), локализованного в разных участках зоны горения.

*Горение, электрическое поле, полимеры.*

Проблема управления макрокинетическими параметрами горения (скорость, температура горения, полнота сгорания) углеводородных топлив является важной технической задачей, для решения которой применяются различные методы. Наиболее распространенными являются механические (установка в камеры сгорания дополнительных конструктивных элементов) и химические (введение в состав топлива и окислителя различных добавок). Однако существуют и менее разработанные методы управления процессами горения в энергетических установках с помощью физических полей (электрических, магнитных, электромагнитных, акустических и т.д.) [1–3]. В литературе приводятся результаты исследований горения газовых топлив в электрических полях [1–5], менее изученными остаются конденсированные вещества, в частности, полимеры, которые используются как связующие в смесевых твердых ракетных топливах, выступают в качестве топлив для гибридных ракетных двигателей (ГРД) и в качестве «жертвенных» покрытий космических летательных аппаратов [6–7]. Применение электрических полей для управления горением конденсированных веществ затруднено из-за отсутствия систематических исследований.

В работе [8] исследовано распространение пламени по поверхности полимера во встречном потоке окислителя в радиальном переменном электрическом

поле. Линейная скорость распространения пламени увеличивается с ростом напряжения, а потом наблюдается её уменьшение [8]. Экстремальная зависимость скорости распространения объясняется действием ионного ветра на пламя. Авторами [9] изучено влияние поперечного электрического поля на процесс горения полимеров ПММА и СКН-40Т. Согласно представленным данным [9] электрическое поле увеличивает массовую скорость горения ПММА на 120% и СКН-40Т на 180%, максимальную температуру пламени для ПММА на 14%, СКН-40Т на 18%. Полученные результаты объяснены в свете влияния электрического поля на кинетику химических реакций. Электрическое поле, созданное по схеме электрод-кольцо, при положительном электроде увеличивает период индукции воспламенения полиметилметакрилата, полистирола, полиэтилена высокого и низкого давления и уменьшает при отрицательном потенциале на электроде [10–11]. В [12] исследовано горение самозатухающих материалов на основе полистирола в продольном поле: авторами установлено, что поле способствует улучшению процесса горения. Объяснение механизма воздействия поля на горение авторами сводится к рассмотрению процессов в пламени. В [8,12] результаты объяснены с позиции возникновения в пламени ионного ветра. В [9–11] отмечается влияние поля на кинетику химических реакций. Однако в [1] авторами по-

казано существование обоих механизмов воздействия при горении газовых топлив. При объяснении авторы не учитывают влияние поля на процессы, протекающие в к-фазе полимера, для жидких углеводородных топлив это влияние необходимо учитывать [13].

Горение гибридного топлива – сложный физико-химический процесс, включающий в себя протекание процесса горения в диффузионном и кинетическом режимах [7]. Сгорание топлива происходит в основном за счет диффузионного режима, который в самом простейшем случае реализуется при торцевом горении. Преимуществом электростатического управления процессом горения является то, что создаваемое поле почти не требует затрат энергии на его поддержание.

Исходя из вышеотмеченного, в работе поставлена задача: получение закономерностей влияния электростатического поля на макропараметры горения с це-

лю построения системы знаний о механизмах воздействия.

В качестве предметов исследования выбраны: полиметилметакрилат (ПММА), бутадиен-нитрильный каучук (СКН-26), бутадиен-стирольный каучук (СКМС-30), этиленпропиленовый каучук (СКЭПТ), полибутадиеновый каучук (СКД-2).

Экспериментальная установка включает в себя: горелку, установленную на весы ВСЛ-200/0,1, источник высокого напряжения НСР 35-35000, сетчатые электроды размерами (12\*12 мм), микротермопару диаметром 60 мкм, плату сбора данных PCI 1802Н, компьютер, фотокамеру Canon SX200IS и видеокамеру Panasonic HDC-TM10 [14].

Электростатическое поле создаётся между сетчатыми электродами, расположенными на расстоянии 6 см, согласно схеме рис.1.

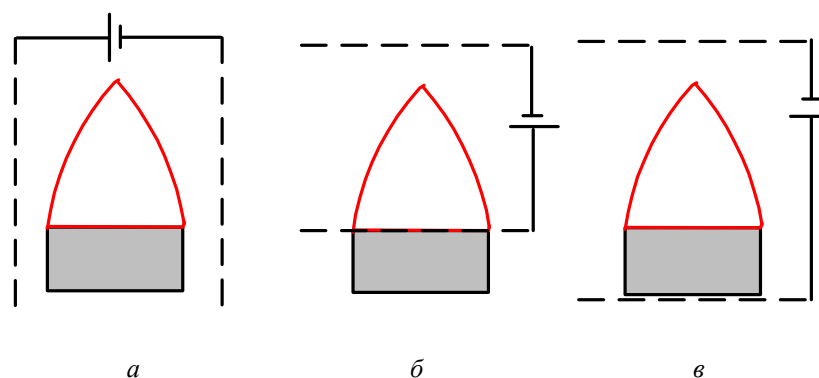


Рис.1 Схемы расположения электродов

Условно зону горения можно разделить на зону газофазных реакций и к-фазу. Для исследования процессов, протекающих в пламени, электроды располагаются согласно рис.1, а, б. Чтобы отделить процессы, протекающие при горении в к-фазе, электроды располагаются согласно рис.1, в.

Массовая скорость горения полимера измеряется непрерывным взвешиванием образца. Метод подробно описан в [14]. Относительная погрешность метода

не превышает 12%. Температура пламени измеряется при помощи хромель-алюмелевой микротермопары диаметром 60 мкм.

В поперечном электростатическом поле, созданном согласно рис.1, а, пламя ПММА, СКЭПТ отклоняется к отрицательному электроду рис.2, а, а СКД-2, СКН-26, СКМС-30 разделяется на две чётко выраженные зоны, одна из которых отклоняется к аноду, другая к катоду (рис.2, б).

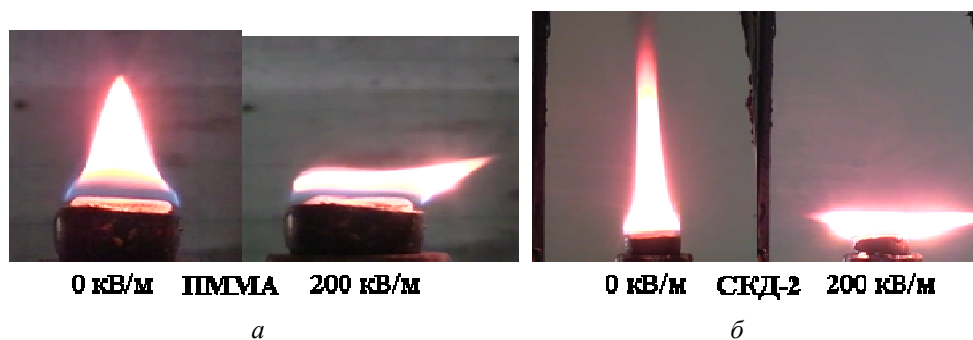


Рис.2. Фотографии пламени ПММА и СКД-2 в поперечном электростатическом поле

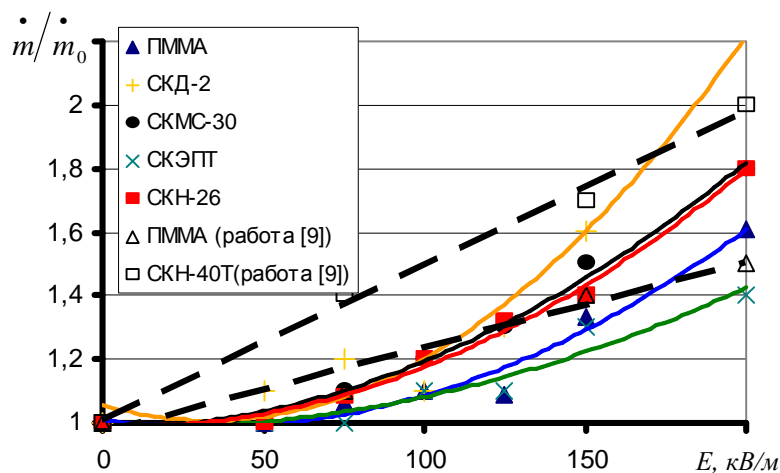


Рис.3. Зависимость относительной скорости горения полимеров от напряжённости поперечного электростатического поля

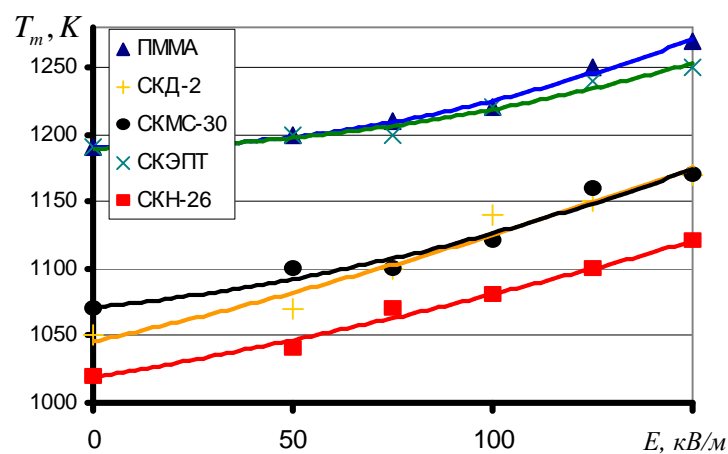


Рис.4. Зависимость максимальной температуры пламени от напряжённости поля

Массовая скорость горения и максимальная температура пламени в поперечном электростатическом поле возрастают (рис.3 и 4). Это свидетельствует об увеличении полноты сгорания полимера.

Наложение электрического поля при схемах электродов рис.1, б и в требует учёта направления поля. Так, при воздействии поля, направленного по потоку горючего, здесь и далее обозначим его -  $\vec{E} \uparrow\uparrow$ , пламя ПММА и СКЭПТ становится конусообразным [16]. Для СКД-2, СКМС-30, СКН-26 изменение геометрии не наблюдается. При обратном направлении

поле направлено к поверхности топлива и обозначено -  $\vec{E} \uparrow\downarrow$ , пламя ПММА и СКЭПТ приобретает форму полусферы, высота пламени снижается [16].

Массовая скорость горения в  $\vec{E} \uparrow\uparrow$  возрастает для всех исследуемых полимеров кроме СКД-2 (рис. 5). При обратном направлении поля скорость уменьшается для ПММА и СКЭПТ и увеличивается для СКД-2, СКМС-30, СКН-26 (рис. 5). Максимальная температура пламени для всех полимеров в  $\vec{E} \uparrow\uparrow$  возрастает, а в  $\vec{E} \uparrow\downarrow$  снижается (рис. 6) для ПММА и СКЭПТ.

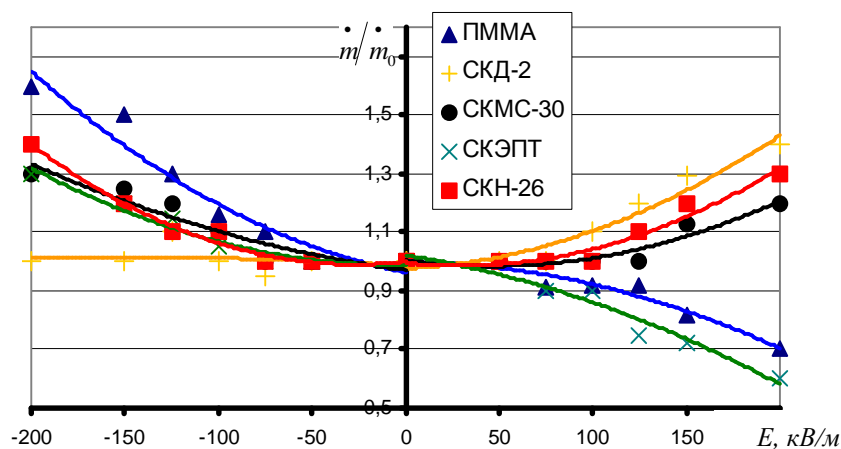


Рис.5. Зависимость относительной скорости горения полимеров от напряжённости поля, локализованного в области факела

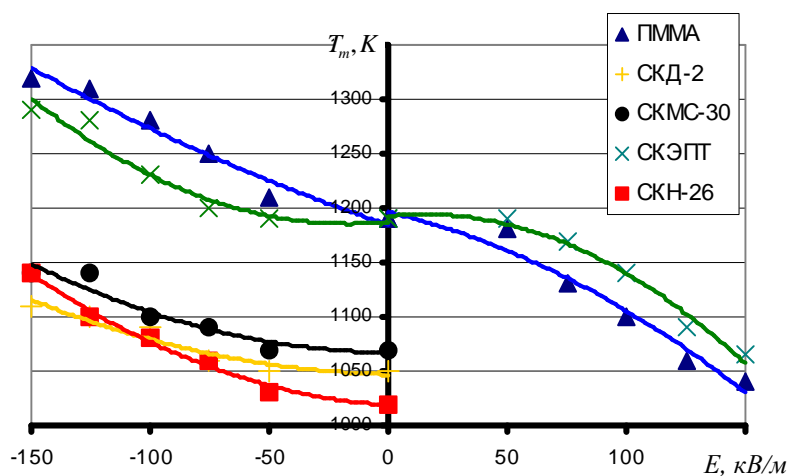


Рис.6. Зависимость максимальной температуры пламени от напряжённости поля

Для поля, наложенного интегрально на всю зону горения (см. рис.1, в), изменение геометрии пламени аналогично воздействию на факел  $\vec{E} \uparrow \uparrow$ , изменение скорости горения происходит аналогично полю, локализованному в области факела (рис.7).

Существенное влияние обнаружено в  $\vec{E} \uparrow \downarrow$ , пламя ПММА и СКЭПТ прижи-

мается к поверхности к-фазы. Для СКД-2, СКН-26, СКМС-30 наблюдается переход горения в пульсационный режим, для которого характерны колебания пламени и резкое увеличение скорости горения (рис. 7).

Температура пламени возрастает для всех горючих вне зависимости от направления поля (рис. 8).

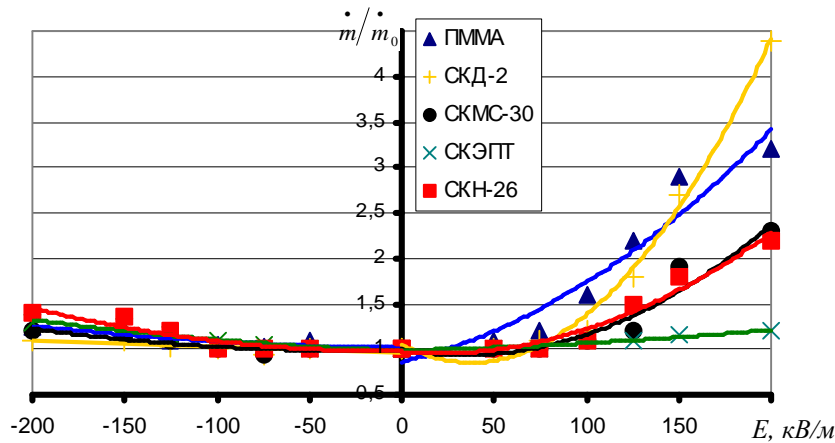


Рис.7. Зависимость относительной скорости горения полимеров от напряжённости поля, наложенного интегрально

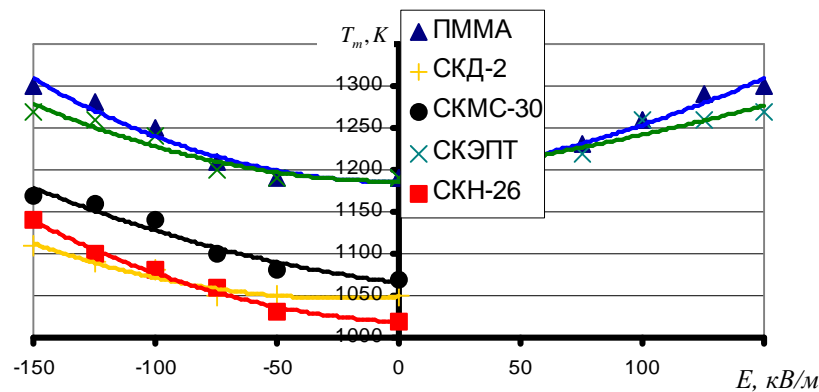


Рис.8. Зависимость максимальной температуры пламени от напряжённости поля

Под действием массовых сил происходит разделение заряженных частиц пламени СКД-2, СКН-26, СКМС-30 на две зоны (см. рис. 2) [17]. Отклонение ПММА и СКЭПТ к отрицательному электроду свидетельствует о преобладании положительно заряженных частиц в пламени, что

характерно для свечеобразного пламени газов и жидкостей [13, 15]. Полученные изменения скорости горения и температуры пламени для ПММА хорошо согласуются с работой [9] в исследуемом интервале напряжённостей (см. рис. 3, а). Увеличение температуры пламени подтвер-

ждает воздействие поля на кинетику химических реакций в пламени [9, 18]. Действие массовых сил со стороны поля приближает горячие зоны к поверхности к-фазы [15], увеличивая величину теплового потока, что приводит к росту массовой скорости горения. Аналогичные явления наблюдаются для случая рис.1, б, в. Однако в случае пульсационного горения проявляются эффекты, описанные в [19]. Согласно данным [19] жидкий расплав полимера находится в метастабильном состоянии, при повышении темпов нагрева которого наблюдается взрывное вскипание. Метастабильное состояние может быть реализовано путём других внешних воздействий, например, изменения поверхностного натяжения под действием электростатического поля [20], заменой процесса испарения взрывным кипением [13].

Таким образом, влияние электростатического поля на макропараметры горения полимеров зависит от ионизационных процессов в пламени и расположения сетчатых электродов в зоне горения. Для полимеров, имеющих две заряженные зоны в пламени, наблюдается увеличение скорости горения. Для ПММА и СКЭПТ изменение скорости горения зависит от места наложения поля на зону горения. Возможный механизм воздействия поля на горение заключается в появлении массовых сил и изменении химических реакций в пламени. Режим пульсационного горения СКД-2, СКН-26, СКМС-30 обусловлен переходом расплава полимера в метастабильное состояние, которое сопровождается диспергированием.

### Библиографический список

1. Степанов, Е.М. Ионизация в пламени и электрическое поле [Текст] / Е.М. Степанов, Б.Г. Дьячков. – М.: Металлургия, 1968. – 311 с.
2. Афанасьев, В.В. Диагностика и управление устойчивостью горения в камерах сгорания энергетических установок

[Текст] / В.В. Афанасьев, Н.И. Кидин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 176 с.

3. Кидин, Н.И. Влияние внешних электромагнитных полей на процессы горения [Электронный ресурс] / Н.И. Кидин. – Режим доступа: [http://www.ism.ac.ni/sgv/rf/1\\_21\\_rt](http://www.ism.ac.ni/sgv/rf/1_21_rt).

4. Лаутон, Д. Электрические аспекты горения [Текст] / Д. Лаутон, Ф. Вайнберг; пер. с англ.; под ред. В. А. Попова. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.

5. Третьяков, П.К. Воздействие лазерным излучением и электрическим полем на горение углеводородовоздушных смесей / П.К.Третьяков, А.В.Тупикин, В.Н.Зудов // Новосибирск: Физика горения и взрыва. – 2009. – Т.45. – №4. – С. 22–25.

6. Алемасов, В.Е. Теория ракетных двигателей [Текст] / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегаллин, А.П. Тишин. – М.: Машиностроение, 1989. – 464 с.

7. Процессы в гибридных ракетных двигателях [Текст] / [А.М. Губертов и др.]; под ред. А.С. Коротаева. – М.: Наука, 2008. – 405 с.

8. Влияние электрического поля на распространение пламени по поверхности твердого материала [Текст] / [А.Ф. Пантелеев и др.] // Физика горения и взрыва. – 1992. – №3. – С. 39–41.

9. Влияние электрического поля на процесс горения конденсированных систем [Текст] / [А.А. Подвальный и др.] // Физика горения и методы её исследования. – 1975. – Вып. 5. – С. 81–86.

10. Мукашева, А.К. Экспериментальное исследование электрофизики высокомолекулярных соединений с наложением электрического поля [Текст] / А.К. Мукашева // Тез. докл. XV науч.-теоретич. конф. профессорско-преподавательского состава научных работников и аспирантов КерГУ. – Караганда, 1990. – 74 с.

11. Мукашева, А.К. Электрофизические явления, возникающие при горении высокомолекулярных соединений [Текст] / А.К. Мукашева, В.Л. Сториченко // Влияние переноса в сложных многокомпо-

нентных системах: сб. науч. тр. – Караганда, 1990. – С. 128-131.

12. Влияние электрического поля на горение самозатухающих материалов на основе полистиролов [Текст] / [С.Н. Колесов и др.] // Электрофизика горения. – 1983. – С. 37.

13. Решетников, С.М. Влияние электростатического поля на макрокинетику горения алканов и керосина [Текст] / С.М. Решетников, И.А. Зырянов // Вестн. КГТУ. – Казань. – 2011. – №1. – С. 120–128.

14. Решетников, С.М. Определение скорости горения полимеров в электростатическом поле методом непрерывного взвешивания [Электронный ресурс] / С.М. Решетников, А.П. Позолотин // Общество, наука, инновации (НТК-2012): ежегод. открыт. всерос. науч.-техн. конф., 18-29 апр. 2012.: сб. материалов / Вят. гос. ун-т; отв. ред. С.Г. Литвинец. – Киров, 2012. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) / (Электротехнический факультет. Секция "Физика и теплотехника". Статья № 2.

15. Решетников, С.М. Влияние электрического поля на структуру диффузионного пламени при различных коэф-

фициентах избытка окислителя [Текст] / С.М. Решетников, А.С. Бобров, И.А. Зырянов // Изв. вузов. Авиационная техника. – Казань. – 2010. – №2. – С. 59–62.

16. Зырянов, И.А. Горение конденсированных веществ в электростатическом поле [Текст] / И. А. Зырянов, А.П. Позолотин // Вестн. СГАУ. – Самара. – 2011. – №5(29). – С. 104–107.

17. Anbarafshan, R. Flames in horizontal electric field, deviation and oscillation [Text] / R. Anbarafshan, H. Azizinaghsh, R. M. Namin // IJTR. – 2011. – N3. – P. 20-30.

18. Ламинарное пропановоздушное пламя в слабом электрическом поле [Текст] / [П.К. Третьяков и др.] // Физика горения и взрыва. – 2012. – Т.48. – №2. – С. 9–14.

19. Шленский, О.Ф. Режимы горения материалов [Текст] / О.Ф. Шленский, В.С. Сиренко, В.А. Егорова. – М.: Машиностроение, 2011. – 220 с.

20. Савиных, Б.В. Свойства переноса диэлектрических жидкостей и тепло-массообмен в электрических полях [Текст] / Б.В. Савиных, Ф.М. Гумеров. – Казань: ФЭН, 2002. – 384 с.

## COMBUSTION OF POLYMERS IN THE ELECTROSTATIC FIELD

© 2013 S. M. Reshetnikov, A. P. Pozolotin, I. A. Zyryanov

Vyatka State University

The paper presents the results of the experimental study of the influence of an external electrostatic field on the mass burning rate and flame temperature of PMMA, SKD-2, SKN-26, SKMS-30, SKEPT localized in different parts of the combustion zone.

*Combustion, electric field, polymers.*

### Информация об авторах

**Решетников Станислав Михайлович**, доктор технических наук, профессор, Вятский государственный университет. E-mail: [rsm@e-kirov.ru](mailto:rsm@e-kirov.ru). Область научных интересов: макрокинетика горения конденсированных веществ, влияние внешних физических полей на параметры горения углеводородных топлив.

**Позолотин Александр Павлович**, аспирант, Вятский государственный университет. E-mail: [firewxcross@mail.ru](mailto:firewxcross@mail.ru). Область научных интересов: горение полимеров, влияние внешних электрических полей на горение.

**Зырянов Илья Андреевич**, кандидат технических наук, Вятский государственный университет. E-mail: [b185@mail.ru](mailto:b185@mail.ru). Область научных интересов: макрокинетика горения конденсированных веществ, влияние внешних электрических полей на горение.

**Reshetnikov Stanislav Mikhailovich**, doctor of technical science, professor of the physics department, Vyatka State University. E-mail: [rsm@e-kirov.ru](mailto:rsm@e-kirov.ru). Area of research: macrokinetics of combustion of condensed substances, influence of external physical fields on the combustion parameters of hydrocarbon fuels.

**Pozolotin Alexander Pavlovich**, postgraduate student, Vyatka State University. E-mail: [firewxcross@mail.ru](mailto:firewxcross@mail.ru). Area of research: combustion of polymers, influence of external electric fields on combustion.

**Zyryanov Ilya Andreevich**, candidate of technical science, Vyatka State University. E-mail: [b185@mail.ru](mailto:b185@mail.ru). Area of research: macrokinetics of combustion of condensed substances, influence of external electric fields on combustion.