

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мешалкин Е.А. Обеспечение пожарной безопасности многофункциональных зданий // Строительная безопасность. – М.: РИА «Индустрия безопасности», 2006. – С. 122-126.
2. Чесноков А. Использование современного стекла в строительстве // Оконная и фасадная практика. – 2007. – № 37. – С. 40-42.
3. Накорякова Ю.В., Олифиренко В.Н., Бычкова Е.В., Панова Л.Г. Составы и свойства огнезащитных композиций для создания пожаробезопасных стеклопакетов различного функционального назначения // Пластические массы. – 2006. – № 4. – С. 41-44.
4. Панова Л.Г., Накорякова Ю.В., Бычкова Е.В. Разработка конструкции светопрозрачных противопожарных окон на основе полимерных композитов // Химическая промышленность. – 2006. – № 9. – С. 447-452.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. В.Г. Крупкин.

Литовченко Дарья Игоревна – Энгельсский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.; e-mail: litovchenko89@yandex.ru; 413100, Саратовская обл., г. Энгельс, площадь Свободы, 17; тел.: 88453568618; кафедра химической технологии; аспирантка.

Бурмистров Игорь Николаевич – e-mail: glas100@yandex.ru; кафедра химической технологии; доцент.

Панова Лидия Григорьевна – e-mail: xt@techn.sstu.ru; кафедра химической технологии; профессор.

Litovchenko Dar'ya Igorevna – Engels Technological Institute (branch) Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.; e-mail: litovchenko89@yandex.ru; 17, Liberty square, Engels, Saratov region, 413100, Russia; phone: +78453568618; chair of chemical technology; postgraduate student.

Burmistrov Igor' Nikolaevich – e-mail: glas100@yandex.ru; chair of chemical technology; associate professor.

Panova Lidiya Grigor'evna – e-mail: xt@techn.sstu.ru; chair of chemical technology; professor.

УДК 662.612.3

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

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Ставится задача о возможности регулирования скорости горения и полноты сгорания полимерных материалов в энергетических установках с помощью электростатического поля. Для решения этой проблемы экспериментально исследованы особенности «свечевое» горения полимерных материалов в электростатическом поле. Получено, что максимальная температура пламени СКЭПТ, ПММА, СКД-2, СКН-26, СКМС-30 увеличивается примерно на 100К при наложении поля напряженностью 200 кВ/м. Электростатическое поле приводит к увеличению скорости горения всех рассмотренных полимеров.

Обнаружено, что пламена СКД-2, СКН-26, СКМС-30 имеют две заряженные зоны, на которые пламя разделяется в поперечном электростатическом поле. Особенностью горения этих каучуков в поле является смена режима горения в поле, направленном к поверхности топлива. При достижении определённой напряжённости поля происходит аномально высокое диспергирование поверхности горящего полимера. Наблюдаемый эффект есть результат реализации более высокой температуры в подповерхностном слое расплава полимера, по сравнению с температурой поверхности.

Горение; полимеры; электростатическое поле.

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

COMBUSTION FEATURES OF POLYMERS IN THE ELECTROSTATIC FIELD

The task of the possibility of controlling the speed of combustion and combustion efficiency of polymeric materials in power plants using electrostatic field. To address this issue experimentally investigate the features of "Candle" combustion of polymeric materials in an electrostatic field. It was found that the maximum flame temperature SKEPT, PMMA, SKD-2, SKN-26, SKMS-30 increased by 100K in the application of the field strength of 200 kV/m. The electrostatic field leads to an increase in the rate of burning all the above polymers.

It was found that the flame - SKD-2, SKN-26, SKMS-30 have two charged zones that are separated by the flame in the transverse electrostatic field. The peculiarity of these burning rubber in the field is regime change in the combustion field directed to the surface of the fuel. When reaching a certain field strength is anomalously high dispersion of the surface of the burning polymer. The observed effect is a result of the higher temperature in the subsurface layer of molten polymer, compared with a surface temperature.

Combustion; polymers; electric field.

При рассмотрении проблемы горючести полимерных материалов необходимо учитывать, что перед разработчиками материалов, в общем случае стоит задача регулирования горючести синтезированного материала. В зависимости от ситуации, с одной стороны, появляется необходимость антипирирования материала – при применении полимера в быту, в качестве конструкционных материалов и т.д.

С другой стороны, например, при использовании полимера в качестве связующего смесевых твёрдых топлив, топлива гибридных ракетных двигателей, необходимо увеличивать скорость горения, а лучше управлять параметрами горения в процессе работы изделия.

Если при создании полимерных материалов пониженной горючести обычно создают полимерные композиции, которые коксуется, вспениваются при пиролизе и самозатухают, то во втором случае регулирование (чаще увеличение) скорости горения производится интенсификацией теплообмена между пламенем и конденсированной фазой в процессе горения. Это обычно достигается закруткой потока окислителя.

В предлагаемой работе исследован способ управления процессом горения полимерного топлива путём воздействия электростатическим полем на зону горения. Известно, что пламя, несмотря на небольшую температуру, является плазмой с огромной, более чем на шесть порядков по концентрации ионов, неравновесностью. Наличие электрических явлений – появление ионов и электронов при горении, позволяет предположить о возможности влияния электрического поля на механизм реакции в пламени и процесс пиролиза. То есть, если мы имеем создание пламенем в процессе горения электрических явлений, то вправе ожидать влияния электрического поля на процессы горения.

Выбор электростатического поля в качестве инструмента по управлению параметрами горения выгоден с энергетической точки зрения. Поддержание электростатического поля не требует энергозатрат, также технически просто создать необходимое по конфигурации и величине электростатическое поле.

Существует довольно ограниченное количество работ по исследованию данной проблемы, особенно по взаимодействию с электростатическим полем. В работе [1] исследовано влияние переменного электрического поля на скорость распространения пламени по поверхности полимера во встречном потоке окислителя (горение кабеля). Линейная скорость распространения пламени увеличивается с ростом напряжения на электродах, в дальнейшем наблюдается её уменьшение [1]. Экстремальная зависимость скорости распространения объясняется механизмом

действия ионного ветра на пламя. Ионный ветер интенсифицирует подачу окислителя в зону горения при малых значениях напряжения на электродах, а с ростом напряжения увеличивает теплотери из фронта пламени.

В работе [2] изучено влияние поперечного электрического поля на процесс горения ПММА и СКН-40Т. Согласно представленным данным [2], электрическое поле увеличивает массовую скорость горения ПММА и СКН-40Т и максимальную температуру пламени для ПММА СКН-40Т. Полученные результаты объяснены авторами в свете влияния электрического поля на кинетику химических реакций. По мнению авторов [2], электрическое поле смещает химическое равновесие в сторону экзотермических реакций. В работе [3] полимер помещался на металлический электрод, сверху располагалось металлическое кольцо. Электрическое поле при положительном электроде увеличивает период индукции воспламенения полиметилметакрилата, полистирола, полиэтилена высокого и низкого давления и уменьшает при отрицательном потенциале на электроде [3]. В [4] исследовано горение самозатухающих материалов на основе полистирола в продольном поле, авторами установлено, что поле интенсифицирует процесс горения.

Исходя из скудного списка обзора видно, что в литературе вопрос горения полимеров в электрическом поле освещен недостаточно. В частности, отсутствуют исследования торцевого горения полимеров, а набор веществ ограничивается одним веществом (ПММА). Также недостаточно освещены вопросы изменения температуры пламени, полноты сгорания и массовой скорости горения конденсированных веществ в электрических полях. Имеющиеся результаты объяснены с точки зрения идеологии знаний о влиянии поля на горение газовых смесей. При этом рассмотрении не учитывается влияние поля на свойства топлива, что, как показывают исследования [5], не корректно.

В работе поставлена задача исследования возможности управления при помощи электростатического поля процессом горения полимеров с целью оптимизации работы энергетических установок (например гибридных ракетных двигателей), применяющих в качестве топлива полимеры. Поставленная цель требует исследования влияния поля на скорость горения и полноту сгорания полимеров.

Экспериментальный стенд и методика измерения массовой скорости горения методом непрерывного взвешивания и измерения максимальной температуры пламени описана в [6]. Исследуемый горящий образец помещался на электронные весы, соединенные с компьютером. В процессе горения компьютер регистрирует текущую массу образца. Далее, после обработки полученных данных, определяется массовая скорость горения. Измерение температуры производилось хромель алюмелевой микротермопарой диаметром 60 мкм.

Исследования проводились при конфигурациях электродов, представленных на рис. 1. Электроды на рисунке обозначены пунктирными линиями. Размеры электродов подбирались таким образом, чтобы электростатическое поле, создаваемое в зоне горения, было однородным. В работе напряженность поля изменялась в диапазоне 0–200 кВ/м. В качестве полимеров служили: ПММА, СКЭПТ, СКД-2, СКН-26, СКМС-30.

Наложение электрического поля, совпадающего по направлению с потоком горючего $\vec{E} \uparrow \uparrow$, на всю зону горения (схема электродов рис. 1,а) не изменяет форму пламени. Скорость горения всех полимеров увеличивается (рис. 2). На графике отрицательной выбрана напряженность направленная $-\vec{E} \uparrow \uparrow$, положительной соответствует направление $-\vec{E} \uparrow \downarrow$ (рис. 2). Изменение скорости горения наблюдается с напряженности поля 50 кВ/м. Наибольшее увеличение массовой скорости обнаружено для СКН-26 – скорость увеличивается на 50 %, наименьшее зафиксировано для СКД-2 – 10 % в диапазоне напряженностей 0–200 кВ/м.

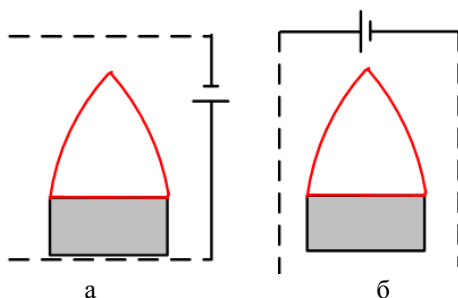


Рис. 1. Схемы расположения электродов

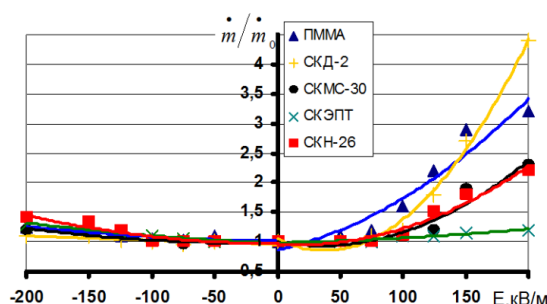


Рис. 2. Зависимость относительной скорости горения полимеров от напряжённости поля, наложенного интегрально

При $\vec{E} \uparrow \uparrow$ максимальная температура пламени увеличивается для ПММА на 110К, для СКД-2 на 60К, для СКМС-30 на 70К, для СКЭПТ на 80К, для СКН-26 на 150К на интервале E [75-150] кВ/м (рис. 3). Рост максимальной температуры горения говорит об увеличении полноты горения полимера при наличии электростатического поля.

Существенное влияние электростатического поля на скорость горения обнаружено, когда поле направленно против потока газа — $\vec{E} \uparrow \downarrow$. Пламя ПММА и СКЭПТ при воздействии электрического поля приобретает форму полусферы, высота факела снижается. График зависимости скорости горения от напряженности поля представлен на рис. 2.

Увеличение скорости горения начинается с напряженности поля 25 кВ/м для ПММА и 50 кВ/м для СКЭПТ. Для СКЭПТ не обнаруживается зависимость изменения массовой скорости горения от направления поля, в отличие от пламени ПММА, для которого увеличение массовой скорости достигает 300 %.

Результаты исследований максимальной температуры пламени в электрическом поле представлены на рис. 3. При $\vec{E} \uparrow \downarrow$ температура пламени увеличивается на 120К для ПММА, и 80К для СКЭПТ при напряженности 150 кВ/м.

Воздействие электрического поля, направленного к поверхности топлива, на процесс горения СКД-2, СКН-26, СКМС-30 приводит к смене режима горения, что характеризуется изменением цвета пламени, и появлению пульсаций, горение переходит в колебательный режим. Одновременно с возникновением колебаний увеличивается скорость горения (рис. 2). Наибольшее увеличение скорости горения (до 450 %) наблюдается у СКД-2, наименьшее — (до 230 %) для СКН-26. Влияние поля начинает проявляться с напряженности 50 кВ/м. Измерения максимальной температуры пламени в данном случае не производились вследствие пульсаций факела.

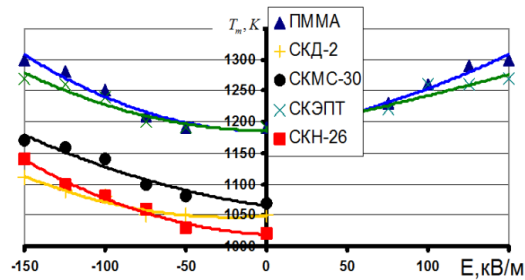


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры пламени от напряжённости поля

Смена режима горения – результат возникновения anomalно сильного диспергирования расплава полимера. Существование такого режима было впервые отмечено А.С. Штейнбергом [7], при экспериментах по линейному пиролизу и С.М. Решетниковым [8] при исследовании высокотемпературной кинетики термораспада полимеров по скорости газовой выделения. В обоих случаях наблюдалось резкое увеличение скорости термораспада при практически постоянной температуре поверхности.

Появление эффекта смены режима горения можно описать исходя из подхода используемого при описании горения жидкости с открытой поверхности [9]. Известно, что на поверхности конденсированной фазы при горении существует слой расплава. Основную роль в теплообмене при горении играет излучение [10]. Поставка тепла в ж-фазу происходит по закону Бугера.

Записываем и решаем уравнение теплопроводности в системе отсчёта связанной с поверхностью горения

$$a \frac{d^2 T}{dx^2} + U \frac{dT}{dx} + \frac{I_0 \alpha e^{-\alpha x}}{c\rho} = 0 \quad (1)$$

граничные условия:

$$x = 0, \quad T = T_s \quad (2)$$

$$x = \infty, \quad T = T_0 \quad (3)$$

где a – коэффициент температуропроводности, U – линейная скорость горения, c – удельная теплоемкость, ρ – плотность расплава полимера, T_s – температура поверхности. Величины $\alpha = 4,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}$, $\lambda = 0,19 \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$, $\rho = 910 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$,

$c = 2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кгК}}$, $U = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ взяты из [11].

Профиль температуры представлен на рис. 4. Температура на поверхности расплава определена экспериментально с помощью термопары и бралась 700К. На графике по оси абсцисс откладывается расстояние от поверхности расплава вглубь образца. Расчеты показывают, что температура в подповерхностном слое СКД-2 на глубине 2 мм превышает температуру поверхности T_s на 20К. В данном слое идет зарождение пузырьков газовой фазы. Наложение электрического поля приводит к появлению пондермоторных сил, изменяющих (увеличивающих) давление в зародышах [9], что способствует их росту. В результате происходит газификация подповерхностного слоя с максимальной температурой. Это сопровождается выбросом поверхностного слоя, т.е. приводит к возникновению anomalно высокого диспергирования.

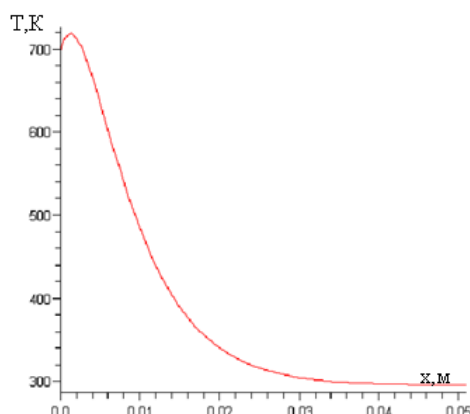


Рис. 4. Профиль температуры в расплаве СКД-2

Проведены исследования поведения пламени полимеров в поперечном электрическом поле, электроды располагаются по схеме рис. 1,б. В поле пламя ПММА, СКЭПТ отклоняется к отрицательному электроду (рис. 5,а). Данный факт свидетельствует о наличии избыточного положительного заряда в пламени при горении, что согласуется с данными работ [12, 13].

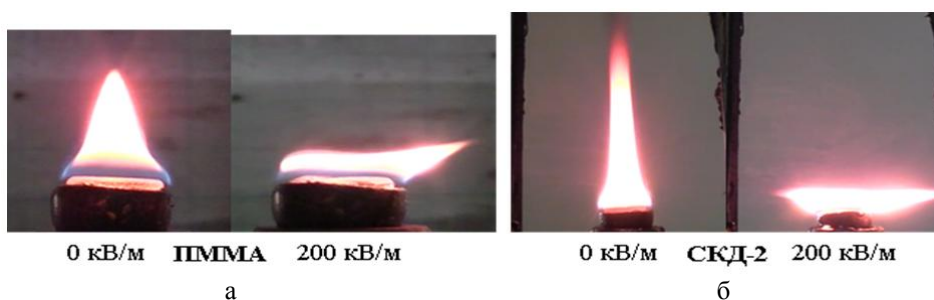


Рис. 5. Фотографии пламени ПММА и СКД-2 в поперечном электростатическом поле

В отличие от пламени ПММА и СКЭПТ, пламя полимеров СКД-2, СКН-26, СКМС-30 в электрическом поле разделяется на две четко выраженные зоны, одна из которых отклоняется к аноду, другая к катоду (рис. 5,б). Разделение пламени в данном случае свидетельствует о наличии разноименно заряженных областей. Измерения показали, что максимальная температура пламени в данных областях в пределах ошибки одинакова. Стоит отметить, что наблюдаемая смена режима горения в поле происходит только у полимеров с двумя заряженными зонами в пламени.

Выводы. В работе исследованы особенности горения ряда полимеров в электростатическом поле. Получены зависимости изменения скорости горения ПММА, СКЭПТ, СКД-2, СКН-26, СКМС-30 от напряженности внешнего электростатического поля.

Обнаружено, что изменение максимальной температуры пламени не зависит от направления поля и определяется только его напряженностью. Температура пламени увеличивается для полимеров порядка 100К.

Экспериментально обнаружено, что пламя полимеров СКД-2, СКН-26, СКМС-30 в электростатическом поле разделяются на две заряженные зоны.

Для этих полимеров в поле, направленном к поверхности топлива, обнаруживается смена режима горения, сопровождающаяся аномальным диспергированием.

Полученные результаты указывают на принципиальную возможность оптимизации энергетических установок электростатическим полем. Необходимо отметить большой «отклик» горячей системы на воздействие электростатического поля. Скорость горения увеличивается в несколько раз, в зависимости от полимера, а температура сгорания примерно на 100К.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пантелеев А.Ф. и др.* Влияние электрического поля на распространение пламени по поверхности твердого материала // Физика горения и взрыва. – 1992. – № 3. – С. 39-41.
2. *Подвальный А.А. и др.* Влияние электрического поля на процесс горения конденсированных систем // Физика горения и методы её исследования. – 1975. – Вып. 5. – С. 81-86.
3. *Мукашева А.К.* Экспериментальное исследование электрофизики высокомолекулярных соединений с наложением электрического поля // Тезисы докладов XV научно-теоретической конференции профессорско-преподавательского состава научных работников и аспирантов КерГУ. – Караганда, 1990. – 74 с.
4. *Колесов С.Н. и др.* Влияние электрического поля на горение самозатухающих материалов на основе полистиролов // Электрофизика горения, 1983. – С. 37.
5. *Решетников С.М., Зырянов И.А.* Влияние электростатического поля на макрокинетику горения алканов и керосина // Вестник КГТУ. – 2011. – № 1. – С. 120-128.
6. *Решетников С.М., Позолотин А.П.* Определение скорости горения полимеров в электростатическом поле методом непрерывного взвешивания // Общество, наука, инновации (НТК-2012): ежегод. открыт. всерос. науч.-технич. 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.
7. *Штейнберг А.С. и др.* Эффект диспергирования в процессах линейного пиролиза и горения полимеров. В сб» Горение и взрыв». – М.: Наука, 1972.
8. *Решетников С.М.* Высокотемпературное разложение полимерных материалов // Тепло- и массообмен в двигателях летательных аппаратов. -Межвузовский сборник КАИ. – 1975. – Вып. 158. – С. 18-24.
9. *Зырянов И.А., Решетников С.М., Гребенищikov Л.Т.* Особенности фазового перехода в электростатическом поле при горении жидкостей // XIV Минский международный форум по тепло- и массообмену. – Минск, 2012. – Т. 2. – Ч. 2. – С. 471-174.
10. *Гейдон А.Г.* Спектроскопия пламен: Пер. с англ. / Под ред. В.Н. Кондратьева. М.: Изд-во иностранной литературы, 1959. – 382 с.
11. *Федюкин Д.Л., Махлис Ф.А.* Технические и технологические свойства резин. – М.: Химия, 1985. – 240 с.
12. *Степанов Е.М., Дьячков Б.Г.* Ионизация в пламени и электрическое поле. – М.: Металлургия, 1968. – 311 с.
13. *Решетников С.М., Бобров А.С., Зырянов И.А.* Влияние электрического поля на структуру диффузионного пламени при различных коэффициентах избытка окислителя // Казань: «Известия вузов. Авиационная техника». – 2010. – № 2. – С. 59-62.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.А. Лиханов.

Решетников Станислав Михайлович – Вятский государственный университет; e-mail: rsm@e-kirov.ru; 610000 г. Киров ул. Московская, 36; тел.: +79128235294; д.т.н.; профессор.

Зырянов Илья Андреевич – e-mail: b185@mail.ru; тел. +79091356084; к.т.н.; доцент.

Позолотин Александр Павлович – e-mail: firewcross@mail.ru; тел. +79229136299; старший преподаватель.

Reshetnikov Stanislav Mikhailovich – Vyatka State University; e-mail: rsm@e-kirov.ru; 36, Moscow street, Kirov, 610000, Russia; phone: +79128235294; dr. of eng. sc. professor.

Zyryanov Ilya Andreevich – e-mail: b185@mail.ru; phone: +79091356084; cand. of eng. sc.; associate professor.

Pozolotin Alexandr Pavlovich – e-mail: firewcross@mail.ru; phone: +79229136299; senior lecturer.