

На правах рукописи



**ПОЗОЛОТИН АЛЕКСАНДР ПАВЛОВИЧ**

**ГОРЕНИЕ ПОЛИМЕРОВ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ**

Специальность:

05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань 2013

Работа выполнена на кафедре физики ФГБОУ ВПО «Вятский государственный университет» (г. Киров)

Научный руководитель: **Решетников Станислав Михайлович**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Вятский государственный университет», профессор кафедры «Физика»

Официальные оппоненты: **Саттаров Альберт Габдулбарович**  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ»,  
доцент кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки»

**Халтуринский Николай Александрович**  
доктор химических наук, профессор  
ФГБУН «Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук (ИХФ РАН)», г.н.с., отдела горения и взрыва

Ведущая организация: ФКП «Государственный научно-исследовательский институт химических продуктов (ГосНИИХП)», г.Казань

Защита состоится 18 декабря 2013 г в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.079.02 при ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ» по адресу: 420111, г. Казань, ул. К.Маркса, д. 10 (зал заседаний Ученого Совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ».

Автореферат разослан 11 ноября 2013г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат технических наук,  
доцент



А.Г. Каримова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Полимеры используются как связующие в смесевых твердых ракетных топливах, выступают в качестве топлива для гибридных ракетных двигателей (ГРД) и теплозащитных покрытий космических летательных аппаратов. В последнее время разработки специалистов России (ГНЦ ФГУП Исследовательский центр имени М.В.Келдыша), США, Франции и др. стран подтвердили эффективность и высокие эксплуатационные качества ГРД. Данные двигатели имеют преимущества по сравнению с другими типами двигателей: экологичность и безопасность работы, низкая стоимость топлива. Несмотря на все преимущества, эти типы двигателей имеют ряд проблем, которые связаны с горением твердого компонента топлива. Они заключаются в неравномерном выгорании и коксовании топлива, а также в управлении процессом горения.

Применяются различные технологические приемы и методы регулирования процесса горения в ГРД. Изменение скорости горения гибридного топлива можно достичь путем изменения теплового потока в к-фазу, добавление в топливо активных реагентов, а полноты сгорания - за счет установки систем турбулизации и закрутки потока. Существуют менее распространенные методы управления процессами горения с помощью физических полей (электрических, магнитных, электромагнитных и акустических и т.д.).

В настоящей работе исследуется возможность использования электростатического поля для регулирования процесса горения топливного блока ГРД.

Большой вклад в изучение влияния электрических полей на горение углеводородных топлив внесли: М.М. Арш, Е.М. Степанов, А.Н. Максимов, В.В. Афанасьев, Н.И. Кидин, С.А. Аbruков и др. Использование электрических полей для эффективной работы ракетных двигателей и других энергетических установок приводится в работах: Р.А. Гафурова, В.В. Афанасьева, Н.И. Кидина, и др. Большинство работ посвящено вопросам горения газообразных топлив. Работы, посвященные исследованию горения СТТ, полимеров и других конденсированных веществ в электрических полях практически отсутствуют. В литературе не освещены вопросы влияния электростатического поля на температуру пламени, полноту сгорания, массовую скорость горения полимеров. Отсутствие этой информации препятствует разработке и внедрению систем управления процессом горения электростатическим полем.

Исходя из вышесказанного, актуальным является исследование особенностей горения полимеров в электростатическом поле с целью использования этого поля в качестве инструмента для управления параметрами горения в ГРД.

**Цель работы.** Изучение влияния электростатического поля на скорость горения и максимальную температуру пламени полимеров с целью управления процессом горения в ГРД и других энергоустановках.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Создание экспериментального стенда и разработка методики эксперимента, позволяющего определять скорость распространения пламени по поверхности полимера, массовую скорость и максимальную температуру пламени при торцевом горении, массовую скорость горения в канале в зависимости от напряженности и направления воздействия электростатического поля.

2. Исследование влияния электростатического поля на скорость распространения пламени по поверхности полимеров.

3. Экспериментальное исследование торцевого горения полимеров в электростатическом поле.

4. Экспериментальное исследование горения полимеров в канале в электростатическом поле.

#### **Объекты исследования.**

Полиметилметакрилат (ПММА), бутадиен-нитрильный каучук (СКН-26), бутадиен-стирольный каучук (СКМС-30), этиленпропиленовый каучук (СКЭПТ), полибутадиеновый каучук (СКД-2).

#### **Методы исследования.**

Измерение массовой скорости горения полимеров методом непрерывного взвешивания, микротермопарное измерение температуры пламени, измерение скорости распространения пламени по поверхности полимера с последующим сбором данных и обработкой их при помощи измерительного вычислительного комплекса, скоростная фото и видео съемка пламени.

#### **Научная новизна:**

1. Впервые экспериментально получены зависимости скорости распространения пламени по поверхности полимеров от напряженности и направления электростатического поля.

2. Впервые экспериментально получены зависимости массовой скорости горения, температуры пламени при торцевом горении полимеров от величины и направления напряженности электростатического поля.

3. Экспериментально обнаружено разделение пламени каучуков (СКД-2, СКН-26, СКМС-30) на две заряженные зоны при воздействии поперечного электростатического поля.

4. Впервые для каучуков (СКД-2, СКН-26, СКМС-30) обнаружена смена режима горения (результат перехода газификации расплава полимера во взрывное кипение) при воздействии электростатического поля.

5. Впервые экспериментально получено влияние электростатического поля на горение полимеров в канале.

#### **На защиту выносятся**

Зависимость скорости распространения пламени по поверхности полимеров (ПММА и СКД-2) от направления и величины напряженности электростатического поля.

Зависимость массовых скоростей горения и температуры пламени от направления и величины напряженности электростатического поля при торцевом горении ПММА, СКД-2, СКН-26, СКЭПТ, СКМС-30.

Наличие в пламени (СКД-2, СКН-26, СКМС-30) двух разноименно заряженных зон.

Смена режима горения каучуков (СКД-2, СКН-26, СКМС-30), которая объясняется переходом процесса газификации расплава полимера во взрывное кипение.

Влияние радиального электростатического поля на горение полимера в канале.

**Достоверность** результатов работы подтверждается соответствующей точностью и тарировкой измерительных систем (сертификаты поверки приборов), воспроизводимостью результатов экспериментов, использованием современных компьютерных аппаратных и программных средств сбора и обработки данных, удовлетворительным согласованием тестовых результатов с работами других исследователей.

#### **Практическая ценность.**

Полученные результаты дают инструмент для управления скоростью горения в ГРД и других энергетических установках, в качестве топлива которых используются полимеры, с целью повышения их энергоэффективности и экологичности. Обнаруженные эффекты воздействия поля на горение расширяют систему знаний о процессе горения. Электростатическое поле дает новый метод изучения процесса горения.

Работа выполнена в рамках НИР №59 Вятского государственного университета по теме «Макрокинетика горения конденсированных веществ в электрическом поле», а также при частичной поддержке гранта РФФИ 10-07-00528-а. Работа отмечена грантом «У.М.Н.И.К. 2012» № p/17247 по теме «Разработка технологии повышения энергоэффективности и экологичности процесса горения твердых углеводородных топлив с использованием электростатического поля».

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях: Всероссийская научно-техническая конференция «Наука –производство-технология –экология» Киров, 2009; Всероссийская научно-техническая конференция «Наука –общество - инновации» Киров, 2010, 2011, 2012, 2013; Всероссийская научная конференция студентов физиков и молодых ученых ВНКСФ-16 г. Волгоград, 2010; ВНКСФ-17 г.Екатеринбург, 2011; ВНКСФ-18 г.Красноярск, 2012, ВНКСФ-19 г. Архангельск, 2013; Всероссийская научная конференция с элементами научной школы для молодежи «Проведение научных исследований в области синтеза, свойств и переработки ВМС, в также воздействия физических полей на протекание химических реакций» Казань, 2010; VII-VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей» Самара, 2010,2012; Международная научная конференция «Туполевские чтения» Казань, 2010, 2011, 2012; Международная конференция «Полимерные материалы пониженной горючести» Вологда, 2011, Таганрог, 2013; Международная молодежная научная конференция «VII Тинчуринские чтения» Казань,2012.

По результатам работ автор удостоен наград: диплом II степени международной научной конференции «Туполевские чтения» Казань, 2010; диплом I степени международной научной конференции «Туполевские чтения» Казань, 2011; диплом за лучший доклад среди аспирантов и молодых ученых на

всероссийской конференции ВНКСФ-17 г. Екатеринбург, 2011, ВНКСФ-19 г. Архангельск; диплом I степени международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» Казань, 2012, диплом I степени международной научной конференции «XX Туполевские чтения» Казань, 2012; дипломом за высокий уровень доклада VII международной научной конференции «Полимерные материалы пониженной горючести» Таганрог, 2013.

#### **Личный вклад автора.**

Основные результаты получены лично автором под руководством д.т.н., профессора Решетникова С.М.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 19 научных работ: из них 16 тезисы докладов научно-технических конференций, 3 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК для публикации основных результатов диссертаций.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация изложена на 97 страницах и состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений. Список литературы включает 112 источника. Работа иллюстрирована 56 рисунками и содержит 3 таблицы.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### ***Введение***

**Во введении** обоснована актуальность работы, определена её цель, объект и предмет исследования, сформулированы научные результаты, выносимые на защиту, определены их научная новизна и практическая значимость.

### ***Обзор литературы***

**В первой главе** представлен литературный обзор, рассматривающий процессы горения полимеров, и сопутствующие им ионизационные явления в пламени. Рассмотрены модели диффузионного горения полимеров и модели горения в ГРД. Отмечается, что при горении углеводородных топлив в пламени образуются положительные и отрицательные ионы сверхравновесных концентраций порядка  $10^{18} \text{ м}^{-3}$ , которые образуются за счет реакций хемоионизации, хотя равновесная концентрация равняется  $10^{13} \text{ м}^{-3}$ .

Рассмотрены закономерности воздействия электрических полей на горение конденсированных веществ. Показано, что электрическое поле способно как интенсифицировать, так и подавлять горение веществ. Отмечено отсутствие экспериментальных исследований горения полимеров в электростатических полях.

Представлен обзор экспериментальных методов исследования процесса горения (измерение скорости горения и температуры пламени) в электрическом поле.

На основании анализа литературных данных сформулированы цели и задачи работы.

### ***Экспериментальная часть***

Исследование скорости распространения пламени по поверхности полимера проводится на установке, схема которой приведена на рис.1.

Экспериментальная установка представляет собой кварцевую трубу длиной 500 мм и диаметром 74 мм, расположенную горизонтально. В центре трубы устанавливается исследуемый образец. С одного конца трубы через регулятор расхода и ротаметр РМ-4Г подводится воздух.

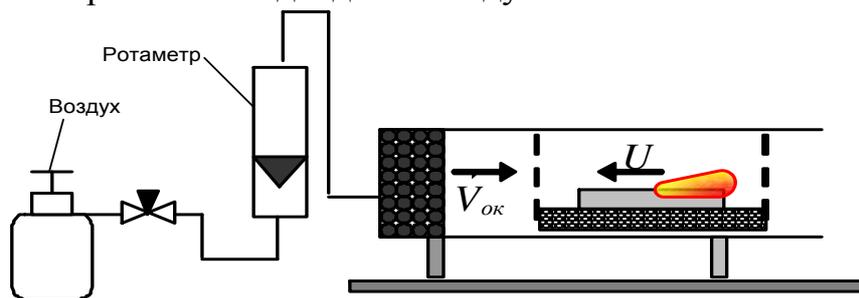


Рис.1 Схема экспериментальной установки для изучения распространения пламени

Скорость ( $\vec{U}$ ) распространения пламени определяется по видеозаписи. Расход воздуха ( $\vec{V}_{ок}$ ) равен  $3,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  (0,76 м/с) и подбирается исходя из условий стационарности горения, число  $Re=450$ . Погрешность определения средней скорости распространения пламени не превышает 10%.

Внешнее однородное электростатическое поле создается источником высокого напряжения НСР 35-35000 между сетчатыми электродами, схема расположения которых представлена на рис.2.

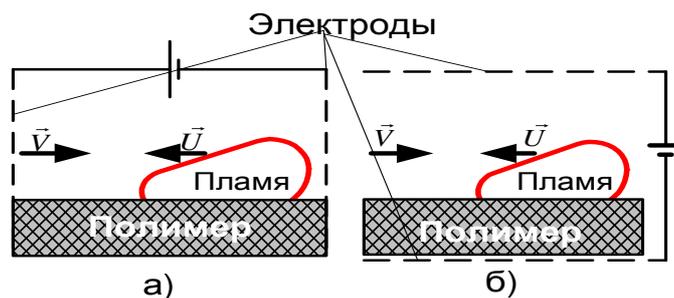


Рис.2 Схема расположения сетчатых электродов при распространении пламени

Где  $\vec{V}$  показывает скорость потока воздуха,  $\vec{U}$  - скорость распространения пламени. Напряженность поля изменяется в диапазоне [0-150] кВ/м рис.2,а, [0-200]кВ/м, рис.2,б. Для рис.2,а вектор напряженности поля имеет два направления по и против потока воздуха. Для рис.2,б поле, направленное от поверхности к-фазы полимера (верхний электрод отрицателен), по потоку горения обозначается как  $\vec{E} \uparrow \uparrow$ . Поле, направленное к поверхности к-фазы (верхний электрод положительный), против потока горения обозначается как  $\vec{E} \uparrow \downarrow$ .

Экспериментальная установка для исследования торцевого горения в электростатическом поле представлена на рис.3. Экспериментальная установка включает в себя: источник высокого напряжения НСР 35-35000, сетчатые электроды размерами (12\*12 см), весы ВСЛ-200/0,1, микротермопару диаметром 60мкм, плату сбора данных PCI 1802Н, компьютер, фотокамеру Canon SX200IS и видеокамеру Panasonic HDC-ТМ10, скоростную фотокамеру CASIO Exilim Pro EX-F1 со скоростью съемки 1200 кадр/с. При измерении массовой скорости горения полимеров образец устанавливается на весах ВСЛ-

200/0,1, подключенных к ПК и поджигается при помощи электрической спирали. В процессе горения весы регистрируют текущую массу образца, передавая данные на ПК.

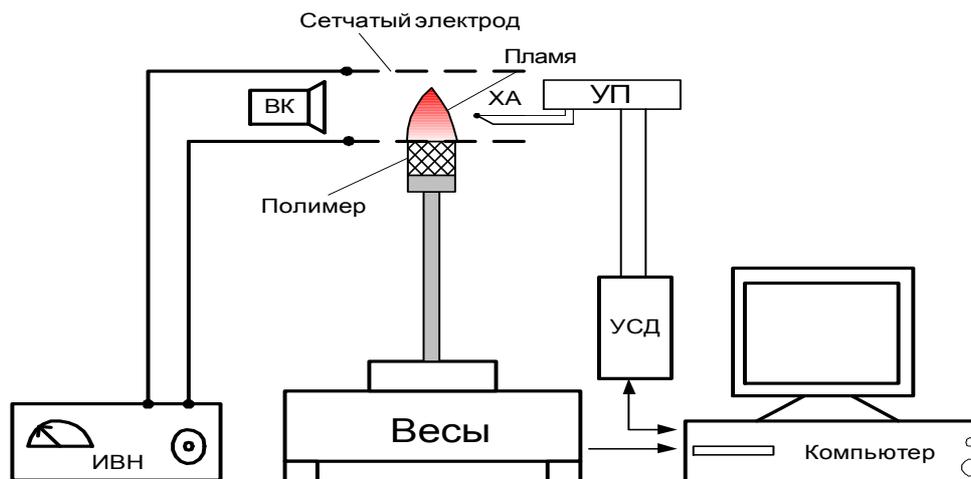


Рис.3 Блок-схема экспериментальной установки

При расчете массовой скорости горения используется величина  $\dot{m} = \frac{\Delta m}{S \Delta t}$ ,

где  $\Delta m$  – масса сгоревшего вещества за промежуток времени  $\Delta t$  с площади поверхности горения  $S$ . Чтобы  $S$  была постоянной, образец помещается в кварцевый стакан, который препятствует растеканию каучуков. В работе используются стаканы диаметров 14 мм, 16 мм, 20 мм.

Зависимость скорости горения от времени в поле и без него представлена на рис.4,а. Как видно из рис.4,а время горения образца до затухания в поле и без него различно.

Для сравнения скоростей горения полимера в поле и без, необходимо брать значение скорости при одинаковых условиях (одинаковая форма и величина поверхности образца). При обработке результатов вводится безразмерный параметр  $\varepsilon = \frac{m_0 - m}{m_0}$ , который характеризует степень сгорания вещества, где  $m_0$  – начальная масса образца,  $m$  – текущая масса образца.

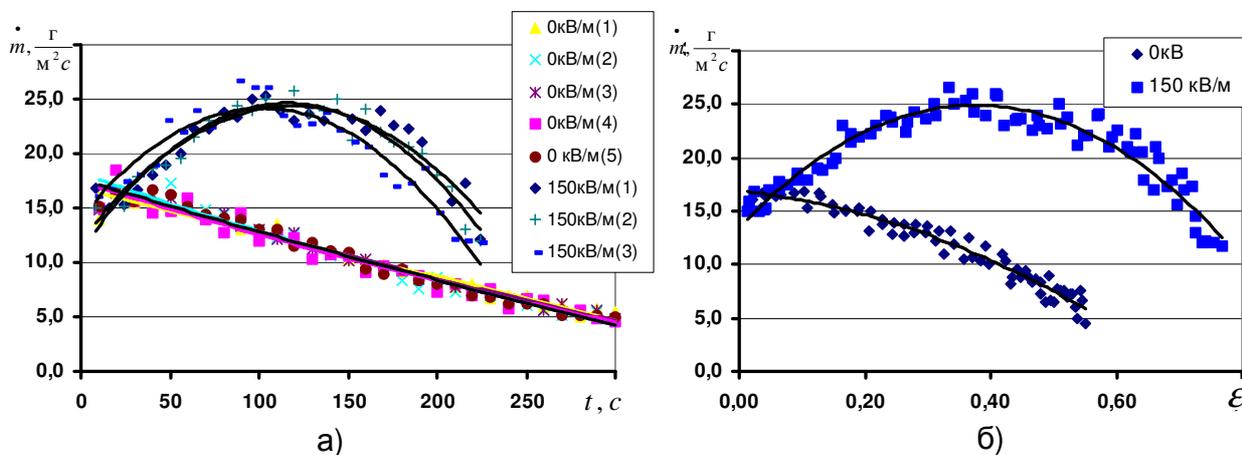


Рис.4 Зависимость массовой скорости горения ПММА от времени и степени сгорания

Полученные зависимости в координатах  $\dot{m}(\varepsilon)$  примут вид рис.4,б. Результаты экспериментов аппроксимируются полиномом второй степени по методу наименьших квадратов. В интервале  $\varepsilon \in [0-0,4]$ , процесс горения в электростатическом поле выходит на стационарный режим. Кривые рис.4,б  $\dot{m}(\varepsilon)$  после  $\varepsilon = 0,4$  эквидистанты. Исходя из уравнений аппроксимации кривых, представленных на графике рис.4,б, найдены такие  $\varepsilon \in [0,45-0,55]$ , при которых разность  $f(\dot{m})_E - f(\dot{m})_0 = f(\varepsilon) = const$ . Все кривые из промежутка  $\varepsilon \in [0,45-0,55]$  имеют одинаковое относительное значение  $\dot{m}/\dot{m}_0$  при разных абсолютных величинах скорости горения. Графики зависимости массовой скорости горения от напряженности поля строятся в относительных координатах. Относительная погрешность метода измерения массовой скорости горения составляет 10%. Воспроизводимость метода иллюстрируется на рис.4,а.

Температура пламени измеряется при помощи хромель-алюмелевой микротермопары диаметром 60 мкм, установленной на устройство позиционирования. Сканирование производится с шагом 1 мм по оси пламени. В результате получается профиль температур, по которому определяется максимальная температура пламени.

Внешнее однородное электростатическое поле для торцевого горения создается между двумя сетчатыми электродами расположенными согласно рис.5. Напряженность поля изменяется в диапазоне 0-200 кВ/м.

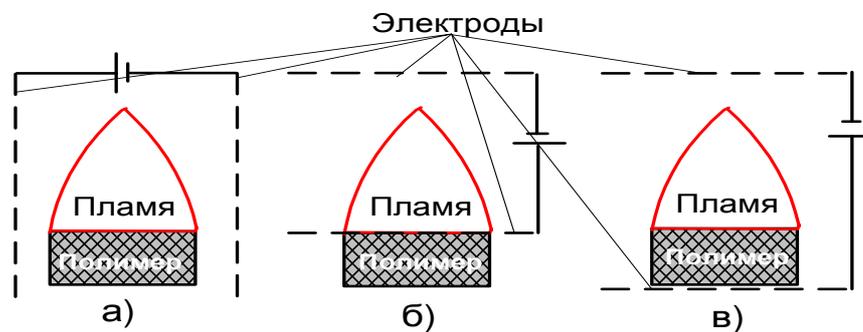


Рис.5 Схема расположения сетчатых электродов при торцевом горении.

Исследование влияния на каналное горение электростатического поля производилось на установке, представленной на рис.6.

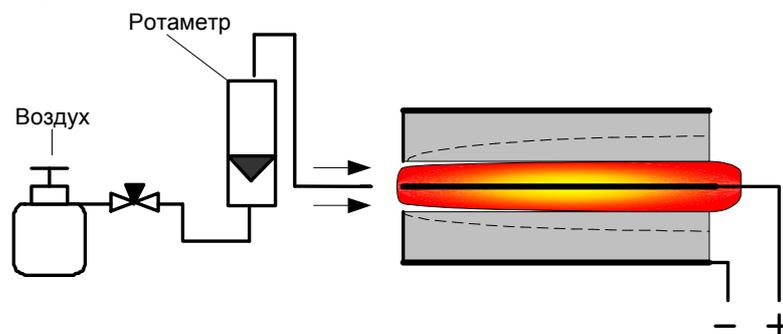


Рис.6 Схема экспериментальной установки

Твердая фаза топлива: ПММА или вакуумная резина, окислитель - воздух. Диаметр канала 12мм, внешний диаметр полимера 50мм. Скорость

потока воздуха 2,3 м/с. Напряжение на электродах 5кВ. Измерение скорости горения производилось методом непрерывного взвешивания.

Для исследования механизма влияния электростатического поля на процесс горения производится визуализация процесса.

## Результаты экспериментов

### *Распределение зарядов в пламени*

Результаты экспериментального исследования ионизационных явлений в пламени полимеров путем воздействия на пламя поперечного электростатического поля представлены на рис.7.

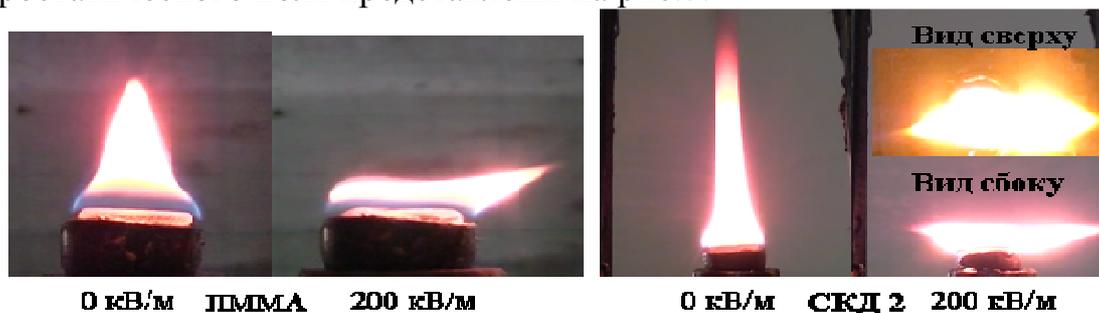


Рис.7 Фотографии пламени ПММА и СКД-2 в поперечном поле (рис.5,а)

Пламя ПММА и СКЭПТ в поперечном электростатическом поле отклоняется к отрицательному электроду. На рис.7 представлена фотография пламени ПММА. Для СКД-2, СКМС-30, СКН-26 обнаруживается разделение пламени на две зоны рис.7. Таким образом, исследуемые полимеры по ионизационным явлениям в пламени разделяются на два типа: с одной заряженной зоной и двумя заряженными зонами.

### *Распространение пламени по поверхности полимера в продольном электростатическом поле*

Представлены результаты экспериментального исследования распространения пламени по поверхности полимеров во встречном потоке воздуха в присутствии электростатического поля. При распространении пламени по поверхности ПММА во встречном потоке воздуха в пламени есть три четкие зоны: зона синего свечения, прозрачная зона, зона желтого свечения рис.8 (0кВ/м).

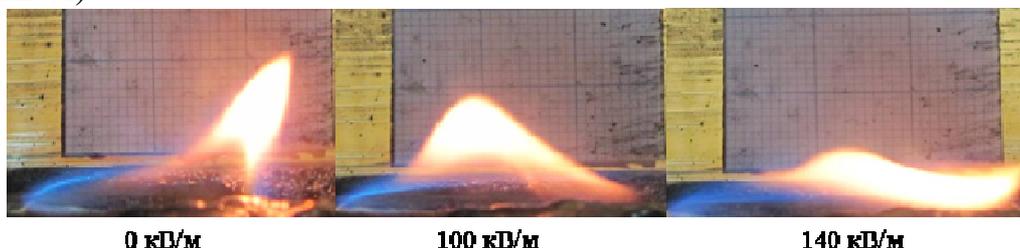


Рис.8 Фотографии пламени ПММА в продольном электростатическом поле, направленном по потоку воздуха (рис.2,а)

В продольном электростатическом поле, направленном по потоку воздуха (рис.2,а), изменяется геометрия зон, прозрачная зона пламени ПММА при напряженности 140 кВ/м практически исчезает рис.8, желтая область пламени вытягивается к отрицательному электроду. В поле, направленном против

потока воздуха (рис.2,а), происходит увеличение площади желтой зоны пламени ПММА. Для СКД-2 изменение формы пламени не наблюдается. Поле обратного направления вытягивает пламя в сторону отрицательного электрода рис.9.

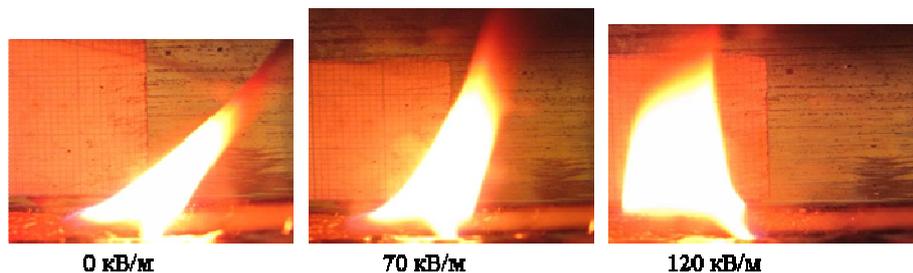


Рис.9 Фотографии пламени СКД-2 в продольном электростатическом поле, направленном против потока воздуха (рис.2,а)

Наложение поля, направленного по потоку воздуха, приводит к увеличению скорости распространения пламени по поверхности ПММА на 30%, СКД-2 - 25% (рис10,а).

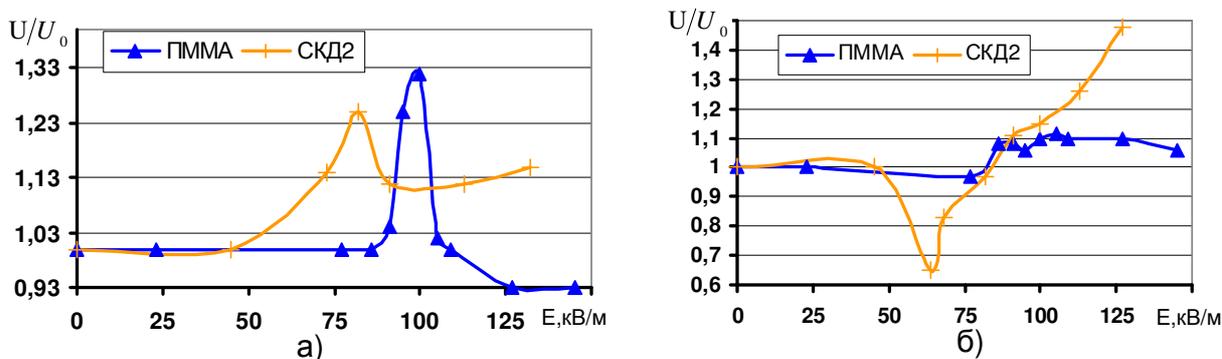


Рис.10 Изменение относительной скорости распространения пламени ПММА и СКД-2 в продольном поле (рис.2,а)

Обратное направление поля увеличивает скорость на 20% у ПММА и на 50% у СКД-2 (рис.10,б). Графики зависимости имеют экстремумы рис.10. В поле, направленном по потоку воздуха, для ПММА точка максимума скорости при  $E=100$  кВ/м, для СКД-2 при  $E=80$  кВ/м, при обратном направлении поля для СКД-2 точка минимума при  $E=70$  кВ/м. В экспериментах для СКД-2 наблюдалось остановка пламени и его гашение, рис.10,б.

### **Распространение пламени по поверхности полимера в поперечном электростатическом поле**

В поперечном электростатическом поле (рис2,б) у пламени ПММА при  $\vec{E} \uparrow \uparrow$  и  $\vec{E} \uparrow \downarrow$  желтая зона вытягивается в сторону отрицательного электрода рис.11. При  $\vec{E} \uparrow \downarrow$  площадь желтой зоны уменьшается, а площадь синей зоны увеличивается рис.11. При горении СКД-2 в поперечном поле, при  $\vec{E} \uparrow \uparrow$  пламя вытягивается к отрицательному электроду рис.12. При  $\vec{E} \uparrow \downarrow$  наблюдается смена режима горения, заключающаяся в появлении пульсаций неоднородности пламени рис.12.



Рис.11 Фотографии пламени ПММА в поперечном электростатическом поле

Поперечное электростатическое поле снижает скорость распространения пламени для ПММА на 35% при обоих направлениях поля, для СКД-2 на 40%, когда вектор напряженности направлен от поверхности полимера  $\vec{E} \uparrow$ . При обратной полярности для СКД-2 результат получить не удалось из-за смены режима горения рис.12.

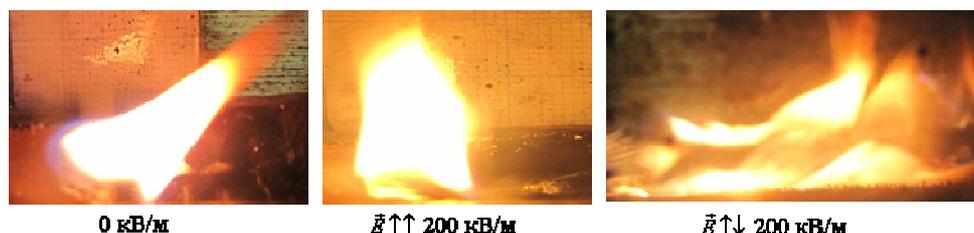


Рис.12 Фотографии пламени СКД-2 в поперечном электростатическом поле

### Торцевое горение полимеров в поперечном электростатическом поле

На рис.13 представлены зависимости относительной массовой скорости горения и максимальной температуры пламени от напряженности поля, созданного согласно схеме рис.5,а. Для всех исследуемых полимеров массовая скорость горения возрастает рис.13,а. Напряженность поля, с которой наблюдается изменение скорости, составляет 75кВ/м. С увеличением скорости горения наблюдается увеличение максимальной температуры пламени рис.13,б. Изменение температуры пламени регистрируется с напряженности 50 кВ/м.

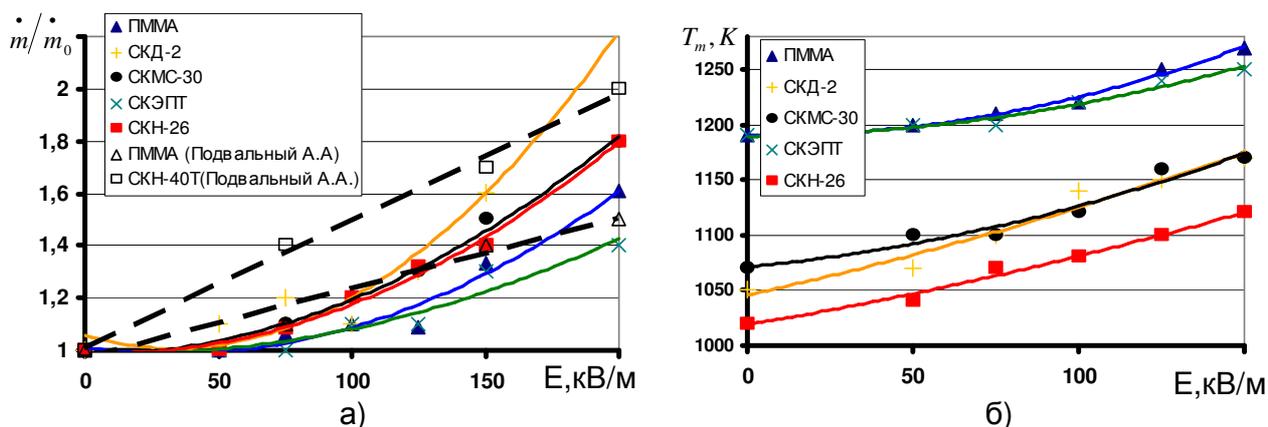
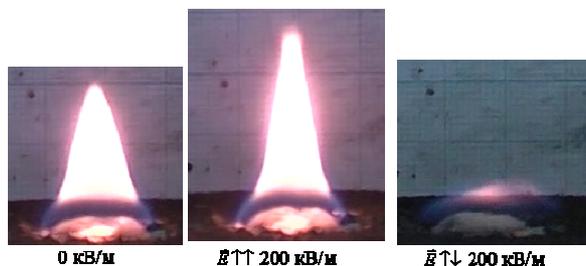


Рис.13 Зависимость относительной массовой скорости горения и максимальной температуры пламени от напряженности поперечного поля (рис.5,а)

## **Торцевое горение полимеров в продольном электростатическом поле, локализованном в области факела**

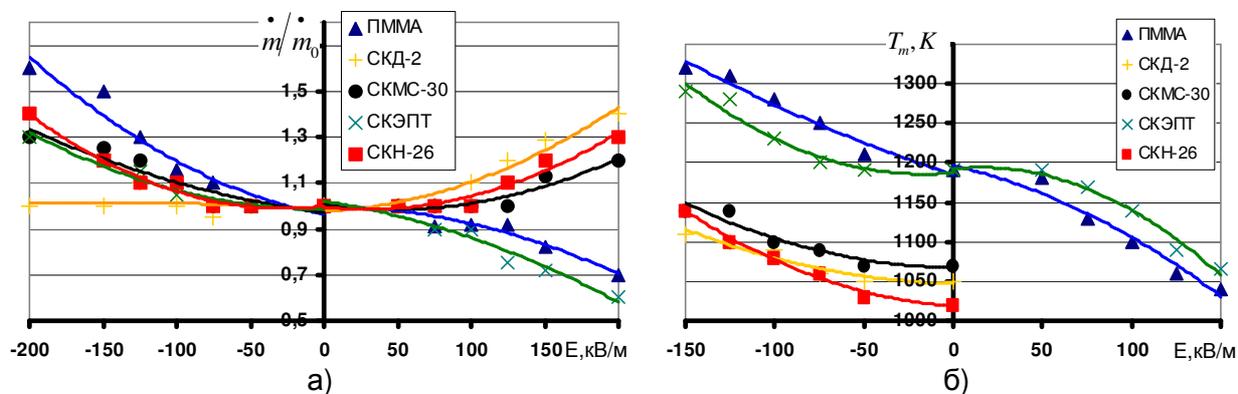
В продольном электростатическом поле, созданном в области факела (рис.5,б), при  $\vec{E} \uparrow\uparrow$  форма пламени ПММА практически не изменяется (рис.14). При  $\vec{E} \uparrow\downarrow$  пламя ПММА приобретает форму полусферы (рис.14). Аналогичное влияние оказывает поле на пламя СКЭПТ. Влияние на форму пламени происходит с напряженности 75 кВ/м.



*Рис.14 Фотографии ПММА в продольном поле, созданном по схеме (рис.5,б)*

При горении СКН-26, СКД-2, СКМС-30 при  $\vec{E} \uparrow\uparrow$  изменение формы пламени не обнаруживается. При  $\vec{E} \uparrow\downarrow$  наблюдается уменьшение высоты пламени, однако факел пламени по-прежнему сохраняет форму конуса. Изменение формы пламени для СКД-2 и СКН-26 происходит с напряженности 125 кВ/м, а СКМС-30 с 200 кВ/м.

Зависимость относительной массовой скорости горения от напряженности поля на рис.15,а.



*Рис.15 Зависимость относительной массовой скорости горения и максимальной температуры пламени от напряженности продольного поля (рис.5,б)*

Отрицательной выбрана напряженность направленная  $-\vec{E} \uparrow\uparrow$ , положительной соответствует направление  $-\vec{E} \uparrow\downarrow$ . При  $\vec{E} \uparrow\uparrow$  скорость горения увеличивается для всех исследуемых полимеров кроме СКД-2. При  $\vec{E} \uparrow\downarrow$  скорость горения снижается на 30% для ПММА и на 40% для СКЭПТ на интервале [0-200] кВ/м. Для СКД-2, СКМС-30, СКН-26 скорость горения увеличивается. Изменение скорости горения при  $\vec{E} \uparrow\uparrow$  наблюдается с напряженности 100 кВ/м. Для случая  $\vec{E} \uparrow\downarrow$  с 75 кВ/м для ПММА и СКЭПТ, с

100 кВ/м для СКД-2, 125 кВ/м СКН-26, 150 кВ/м – СКМС-30. При  $\vec{E} \uparrow \uparrow$  максимальная температура пламени увеличивается (рис.15,б).

При  $\vec{E} \uparrow \downarrow$  наблюдается уменьшение температуры пламени для ПММА на 150К и СКЭПТ на 120К (рис15,б). на интервале [0-150] кВ/м. Для СКД-2, СКН-26, СКМС-30 из-за колебаний пламени, измерение температуры не было произведено.

### **Торцевое горение полимеров в продольном электростатическом поле, наложенном интегрально**

В продольном электростатическом поле, наложенном интегрально на всю зону горения (рис.5,в), при  $\vec{E} \uparrow \uparrow$  пламя ПММА приобретает форму конуса рис.16, форма пламени не изменяется, как и в случае поля наложенного на факел.

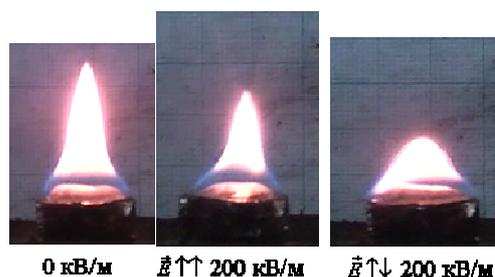


Рис.16 Фотографии ПММА в продольном поле, созданном по схеме (рис.5,в)

При  $\vec{E} \uparrow \downarrow$  пламя приобретает форму полусферы рис.16. Аналогично ведет себя пламя СКЭПТ. Влияние на форму пламени наблюдается с напряженности 50 кВ/м. При горении СКН-26, СКД-2, СКМС-30 при  $\vec{E} \uparrow \uparrow$  изменение формы пламени не обнаруживается.

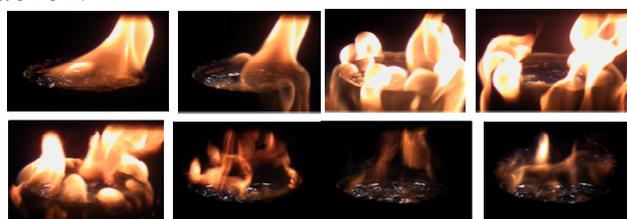


Рис.17 Горение СКД-2 при напряженности 150 кВ/м, время между кадрами 0,02 с.

При  $\vec{E} \uparrow \downarrow$  наблюдается смена режима горения. Результаты скоростной фотосъемки процесса горения 50 кадров/с представлены на рис.17.

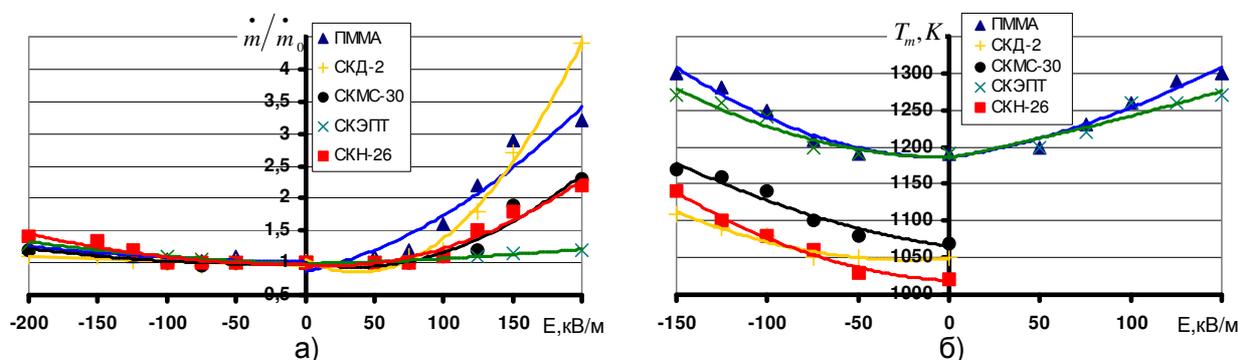


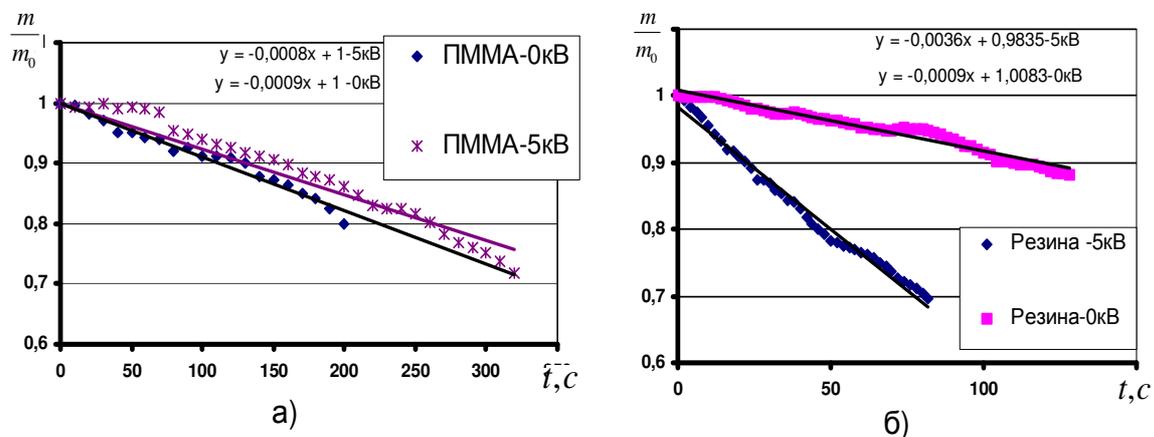
Рис.18 Зависимость относительной массовой скорости горения и максимальной температуры пламени от напряженности продольного поля (рис.5,в)

Как видно из фотографий (рис.17) факел представляет собой струи, интенсивность которых колеблется во времени с частотой 10-15 Гц. Струи направлены к отрицательному электроду, а другая часть пламени к положительному рис.17.

Скорость горения полимеров увеличивается при  $\vec{E} \uparrow \uparrow$  рис.18а как и в поле рис.5,б. Увеличение скорости горения для всех исследуемых веществ наблюдается при  $\vec{E} \uparrow \downarrow$  рис.18,а. При  $\vec{E} \uparrow \downarrow$  скорость горения в поле, наложенном интегрально значительно больше скорости горения в поле, наложенном на факел, такого же направления. Изменение скорости горения при  $\vec{E} \uparrow \uparrow$  и  $\vec{E} \uparrow \downarrow$  наблюдается с напряженности 100 кВ/м. При  $\vec{E} \uparrow \uparrow$  максимальная температура пламени ПММА, СКД-2, СКМС-30, СКЭПТ, СКН-26 увеличивается на 110К, 60К, 70К, 80К, 150К соответственно рис.18,б в интервале [0-150] кВ/м. Изменение температуры наблюдается с напряженности 75 кВ/м. При  $\vec{E} \uparrow \downarrow$  температура пламени увеличивается для ПММА на 120К и СКЭПТ на 80К, для остальных полимеров из-за колебаний пламени измерение температуры не производилось.

### ***Горение полимера в канале при наличии электростатического поля***

На рис.19,а представлен график зависимости относительной массы горения ПММА + воздух в радиальном электростатическом поле от времени, скорость горения определяется углом наклона кривой. Результаты экспериментов аппроксимированы многочленом первого порядка средняя относительная скорость горения, при разности потенциалов между осью и поверхностью 5кВ, увеличивается на 12%.



*Рис.19 Зависимость относительной массы горения в канале от времени*

Результаты экспериментов с вакуумной резиной при тех же параметрах, приведённые на рис 19,б, показывают, что скорость горения в этом случае возрастает на 400%.

### ***Обсуждение результатов***

**Распространение пламени – продольное поле.** Имеются отдельные данные по распространению пламени по полимеру при переменном напряжении, которые качественно совпадают с нашими [А.Ф. Пантелеев, Г.А. Попков, С.Г. Царищенко, Ю.Н. Шебеко // Физика горения и взрыва, 1992. -№3. С.39-41],

Зависимость скорости распространения пламени от напряженности здесь также имеет экстремум. Ответственными за воздействие поля, по мнению авторов, являются массовые силы и изменение кинетики химических реакций.

Исходя из результатов наших исследований за изменение скорости распространения пламени при наложении продольного поля, ответственны форма, энергетика и расположение пламен реализующихся при горении. Эти пламена зафиксированы нами при визуализации процесса горения (рис.8,9). Суммарное изменение формы пламени происходит под действием массовых сил со стороны внешнего электростатического поля на пламена (желтое - сладкое, синие - кислое и прозрачное - стехиометрия), которые имеют различную величину и знак заряда, и поэтому по разному реагируют на внешнее поле. Перестройка пламени при различных величинах внешнего поля приводит к изменению положения источников тепловыделения, в результате чего изменяется направление и величина тепловых потоков, в к-фазу. что приводит к зависимости скорости распространения пламени по поверхности (рис.10) от напряжённости.

**В поперечном электростатическом поле** оба направления поля устанавливают пламя так (рис.11 и рис.12), что изменение формы пламени приводит к уменьшению горизонтальной составляющей теплового потока, поэтому скорость распространения пламени снижается. Для СКД-2 при  $\vec{E} \uparrow \downarrow$  наблюдается смена режима горения, при котором наблюдается резкое увеличение скорости распространения.

**Торцевое горение.** В литературе имеются единичные данные для ПММА по экспериментальному исследованию изменения скорости горения и температуры пламени при наложении поля [Подвальный, А.А. Влияние электрического поля на процесс горения конденсированных систем [Текст] / А.А. Подвальный, М.М. Арш, Ю.В. Гойхма, А.Н. Максимов // Физика горения и методы её исследования, 1975. – Вып.5. - С. 81-86], эти результаты качественно согласуются с полученными нами результатами. Увеличение температуры пламени подтверждает воздействие поля на химические реакции в пламени. Действие массовых сил со стороны поля приводит к приближению горячих зон к поверхности к-фазы, увеличивая величину теплового потока, что приводит к росту и массовой скорости горения.

Изменение формы пламени в продольном электростатическом поле, созданном в области факела, аналогично процессам, протекающим в газах и жидкостях. Влияние поля на факел идет за счет возникновения массовых сил, которое приводит к деформации фронта пламени рис.14.

Увеличение температуры происходит за счет воздействия поля на химические реакции. Повышение температуры приводит к повышению теплового потока в к-фазу, за счет чего увеличивается скорость горения. При  $\vec{E} \uparrow \downarrow$  под действием массовых сил пламя прижимается к поверхности топлива рис.14, что увеличивает тепловой поток в к-фазу, в результате смещения источников выделения тепла. Это приводит к возрастанию скорости горения СКД-2, СКН-26, СКМС-30 и к отходу пламени от поверхности горения.

Для ПММА и СКЭПТ наблюдается снижение скорости горения и температуры наряду со смещением источников тепловыделения, что говорит о

превалирующем действии торможения кинетики химических процессов электростатическим полем по сравнению с газодинамическим эффектом приближения источников энергии к к-фазе под действием поля. Надо учесть, что эти процессы конкурируют, и мы наблюдаем результат конкуренции.

В поле, наложенном интегрально на всю зону горения рис.5,в, изменение геометрии пламени для ПММА и СКЭПТ происходит аналогично случаю рис.5,б. Однако при  $\vec{E} \uparrow \downarrow$  в отличие от поля рис.5,б скорость горения и температура пламени возрастают. В данном случае оба описанных ранее явления приводят к интенсификации горения полимеров.

**При канальном горении** эффект увеличения скорости горения при наложении радиального электростатического поля максимален. Причины этого явления предстоит изучать, однако, это видимо результат совместного действия газодинамических факторов, турболизирующих поток и влияние поля на кинетику химических процессов протекающих в канале.

**Смена режима горения.** Для СКД-2, СКН-26, СКМС-30 при  $\vec{E} \uparrow \downarrow$  при определённой напряженности электростатического поля обнаруживается смена режима горения. Процесс становится пульсирующим, наблюдается сильное диспергирование к-фазы, и как результат этого резкое увеличение скорости горения, факел пламени может распадаться на отдельные струи рис.17.

Известно, что при горении каучуков на поверхности к-фазы образуется жидкий расплав полимера. В данном жидком расплаве происходит термическое разложение (деструкция), испарение, при котором полимер газифицирует.

Для расчета температурного профиля к-фазы и объяснения перехода во взрывное кипение (смена режима горения), решается уравнение теплопроводности в системе координат жестко связанной с поверхностью. Уравнение теплопроводности:

$$a \frac{d^2 T}{dx^2} + u \frac{dT}{dx} + \frac{I_0 \alpha e^{-\alpha x}}{c \rho} = 0$$

Граничные условия:

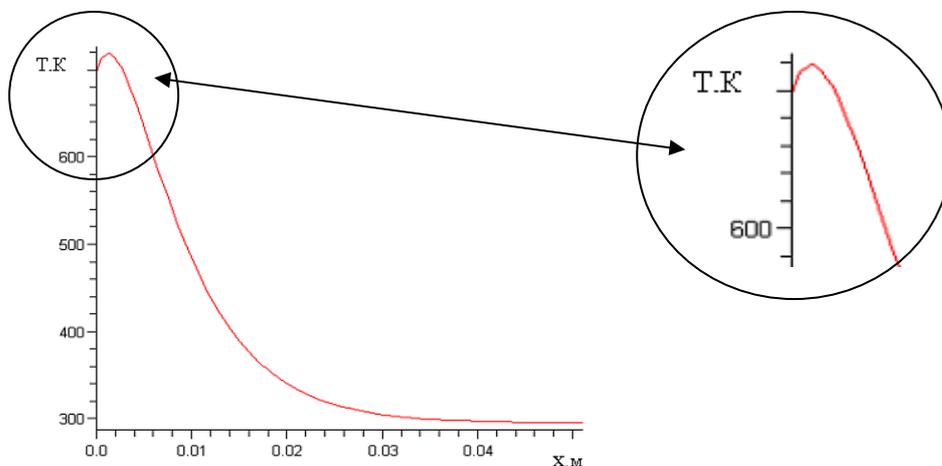
1. :  $x = 0, T(x) = T_s$ .
2. :  $x = \infty, T(x) = T_0$ ,

где  $T$  – температура,  $c, \rho, \alpha$  - теплоемкость, плотность и коэффициент температуропроводности полимера,  $u$  – линейная скорость горения.  $x$  - координата связанная с поверхностью и направленная вглубь полимера.

Поглощение полимером тепловой энергии происходит по закону Бугера:

$$I = I_0 e^{-\alpha x},$$

где  $I_0$  – интенсивность излучения падающего на поверхность полимера,  $\alpha$  – коэффициент поглощения полимера.



*Рис.20 Температурный профиль в к- фазе СКД-2 при горении*

На рис.20 температурный профиль к-фазы СКД-2 . Расчеты показывают, что температура в под поверхностном слое СКД-2 на глубине 2 мм, превышает температуру поверхности  $T_s$  на 20К. В данном слое идет зарождение пузырьков газовой фазы. Наложение электростатического поля приводит к появлению пондермоторных сил, уменьшающих давление в зародышах, что способствует их росту. В результате происходит переход газификации подповерхностного слоя расплава с максимальной температурой во взрывное кипение. Это сопровождается выбросом поверхностного слоя, т.е. приводит к возникновению аномально высокого диспергирования.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Создан экспериментальный стенд и разработана методика эксперимента, позволяющего определять скорость распространения пламени по поверхности полимера в электростатическом поле (ЭП), массовую скорость и максимальную температуру пламени при торцевом горении, скорость горения полимеров в канале.

2. Продольное электростатическое поле, направленное по потоку воздуха, увеличивает скорость распространения пламени по поверхности полимера, обратное направление приводит к уменьшению скорости, что также наблюдается для поперечного электростатического поля.

3. Исследовано влияние ЭП на торцевое горение полимеров в интервале напряженности [0-200] кВ/м, обнаружено, что в поперечном электростатическом поле пламя СКД-2, СКН-26, СКМС-30 разделяются на две заряженные зоны, увеличивается температура и скорость горения.

4. В продольном ЭП, созданном в области факела, направленном от поверхности полимера увеличивается скорость горения и максимальная температура. Обратное направление приводит к уменьшению этих параметров, для пламени с одной заряженной зоной и увеличению с двумя зонами.

5. В продольном поле, наложенном интегрально, обнаруживается смена режима горения для СКД-2, СКН-26, СКМС-30 заключающаяся в появлении пульсации неоднородности пламени что является результатом перехода газификации расплава полимера во взрывное кипение.

6. Исследовано влияние ЭП на горение полимеров в канале. Показано, что скорость горения ПММА увеличивается на 12%, а вакуумной резины на 400% при разности потенциалов 5кВ.

**Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:**

**Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Позолотин А.П. Горение конденсированных веществ в электростатическом поле / Зырянов И.А., Позолотин А.П. // Вестник СГАУ, Самара, 2011. - №5(29). – С.104-107

2. Позолотин А.П. Аномальное поведение алканов и каучуков при горении в электростатическом поле / Решетников С.М., Зырянов И.А., Позолотин А.П.// Вестник КГТУ, Казань, 2013. - №15(16). С.44-48

3. Позолотин А.П. Особенности горения полимеров в электростатическом поле / Решетников С.М., Зырянов И.А., Позолотин А.П. // Известия ЮФУ. Технические науки, Таганрог, 2013. - №8. С.30-36

**Тезисы в сборниках и материалах научных конференций:**

4. Позолотин А.П. Тепловая структура пламени декана и ундекана / Решетников С.М., Зырянов И.А., Дехтерев С.Н., Позолотин А.П.// «Наука-производство-технологии-экология»: Сборник материалов: В 3 т.- Киров: Изд-во ГОУ ВПО «Вят ГУ», 2009. Том 1. – С.239

5. Pozolotin A.P. Pilot plant for reserch into electrical phenomena in combustion of solid fuels / Reshetnikov S.M., Pozolotin A.P., Zyrianov I.A., Dekhterev S.N.// «Ex Professo»: Transactions:in 1 vol. –Kirov: O-Kratkoe, 2009. – p 61

6. Позолотин А.П. Влияние продольного электростатического поля на распространение пламени по поверхности ПММА и СКД-2 / Решетников С.М., Позолотин А.П., Дехтерев С.Н. // «Общество – наука - инновации»: Сборник материалов: В 4 т.- Киров: Изд-во ГОУ ВПО «Вят ГУ», 2010. Том 2. – С.285-287

7. Позолотин А.П. Влияние поперечного электростатического поля на скорость горения полимеров / Решетников С.М., Позолотин А.П., Дехтерев С.Н. // ВНКСФ-16, -Т.1 –Екатеринбург; Волгоград: Изд-во АСФ России, 2010. С. 479-480

8. Позолотин А.П. Влияние продольного электростатического поля на скорость распространения пламени по поверхности полимеров / Решетников С.М., Позолотин А.П. // XVIII Туполевские чтения: Том 2. Казань: из-во Казан. гос. техн. ун-та. 2010. С. 77-79

9. Позолотин А.П. Влияние электростатического поля, локализованного в области факела пламени полимеров, на массовую скорость горения / Решетников С.М., Позолотин А.П. Соловьев С.А. // «Проведение научных исследований в области синтеза и свойств ВМС, а также воздействие физических полей на протекание химических реакций: сб. матералов Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи – Казань:КГТУ, 2010. С.13.

10. Позолотин А.П. Распространение пламени по поверхности полимеров в электростатическом поле // Полимерные материалы пониженной горючести: труды VI Международной конференции. – Вологда: ВоГТУ, 2011. С.15-17

11. Позолотин А.П. Изменение массовой скорости горения полимеров в электростатическом поле // Сборник тезисов, материалы Семнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-17): материалы конференции, тезисы докладов: В 1 т. Т.1. – Екатеринбург: Издательство АСФ России, 2011. – 690 с., С. 681-682

12. Позолотин А.П. Влияние электростатического поля, локализованного в разных участках зоны горения полимеров, на массовую скорость горения [Электронный ресурс] /Позолотин А.П., Соловьев С.А. // Общество, наука, инновации (НТК-2011): ежегод. открыт. всерос. науч.-технич. конф., 18-29 апр. 2011.: сб. материалов / Вят. гос. ун-т; отв. ред. С.Г. Литвинец. - Киров, 2011. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) / (Электротехнический факультет. Секция "Физика и теплотехника". Статья № 2)
13. Позолотин А.П. Торцевое горение каучуков в электростатическом поле / Решетников С.М., Позолотин А.П. // XIX Туполевские чтения: Том 1. Казань: из-во Казан. гос. техн. ун-та. 2011. С. 340-341
14. Позолотин А.П. Макрокинетика горения полимеров в поперечном электростатическом поле / А.П. Позолотин, Д.В. Егошин, С.М. Решетников //Сборник тезисов, материалы Восемнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-18, г.Красноярск): материалы конференции, тезисы докладов: В 1 т. Т.1. – Красноярск: Издательство АСФ России, 2012. – 728 с., С. 712-713
15. Позолотин А.П. 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.-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 № 4
16. Позолотин А.П. Влияние электростатического поля на температуру пламени конденсированных веществ / А.П. Позолотин, Д.В. Егошин, С.М. Решетников // Материалы докладов VII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения». В.4-х т.; Т.2.- Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2012. – С.198
17. Позолотин А.П. Влияние электростатического поля на скорость горения полиметилметакрилата (ПММА) / А.П. Позолотин, А.С. Лаптев, С.М. Решетников // Материалы докладов VII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения». В.4-х т.; Т.2.- Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2012. – С.199
18. Позолотин А.П. Влияние знака заряда пламени полимеров на горение в электростатическом поле // Материалы докладов VII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения». В.4-х т.; Т.2.- Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2013. – С.167-168
19. Позолотин А.П. Влияние процессов деструкции полимеров на скорость горения в электростатическом поле //Сборник тезисов, материалы Девятнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-19, г.Архангельск): материалы конференции, тезисы докладов: В 1 т. Т.1. – Екатеринбург -Архангельск: Издательство АСФ России, 2013. – 728 с., С. 533-534

Формат 60x84/20. Бумага для офисной техники. Печать цифровая  
Физ. печ. л. 1.0. Усл. печ. л. 0.94. Тираж 120 экз. Заказ №2018

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Вятский государственный университет».  
610000, г. Киров, ул. Московская, 36, тел.: (8332) 64-23-56