

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

АНОМАЛЬНОЕ ПОВЕДЕНИЕ АЛКАНОВ И КАУЧУКОВ ПРИ ГОРЕНИИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Ключевые слова: горение, электрическое поле, фазовый переход, термораспад полимеров.

В работе, на основании экспериментальных исследований, выявлено аномальное поведение конденсированной фазы в области фазового перехода при горении в присутствии электростатического поля. Оно заключается в изменении режимов фазового перехода жидкости и термораспада каучука. Фазовый переход жидкостей в этих условиях, при достижении определённой напряжённости поля, происходит по закону взрывного кипения, а распад каучука отличается сильным диспергированием. Изменение законов испарения и деструкции резко увеличивает скорость горения.

Для жидких алканов авторами описан механизм этого явления, на основе рассмотрения теплового состояния κ -фазы и учёта действия в подповерхностном слое пондермоторных сил, стимулирующих рост зародышей парообразования. Показано, что аномальное диспергирование происходит только у полимеров, которые имеют разделённые в пространстве разноименно заряженные области внутри факела пламени.

Keywords: burning, electric field, phase transition, thermal decomposition of polymers.

In this paper, based on experimental studies revealed an anomalous behavior of the condensed phase in the phase transition during combustion in the presence of an electrostatic field. This behavior is to change the mode of the liquid and the thermal decomposition of rubber. Liquid phase transition in these conditions, at a certain field strength, follows the law of explosive boiling, and the decay of rubber has a strong dispersing. Changing the laws of evaporation and degradation dramatically increases the rate of burning.

For liquid alkanes authors describe the mechanism of this phenomenon, based on the consideration of the thermal state of the phase-in and the account of the subsurface pondermоторных forces stimulating the growth of embryos vaporization. It is shown that the anomalous dispersion occurs only in polymers that are separated in space oppositely charged region inside the flame.

Введение

Работы, направленные на разработку способов управления горением углеводородных топлив, в связи с широким использованием этого процесса, актуальны. Методы оптимизации горения можно разделить на два класса: механические (установка в зону горения турбулизаторов потока и т.д.) и химические (введение в состав топлива и окислителя различных добавок). Существуют и менее разработанные способы управления горением с помощью физических полей (электрических, магнитных, электромагнитных, акустических и т.д.) [1-3]. Имеется ряд исследований горения газообразных топлив в электрических полях в диффузионном и кинетическом режимах [1-5]. Особенности горения в электрическом поле объясняются в основном действием ионного ветра. В отличие от горения газовых смесей, горение конденсированных веществ в электростатических полях практически не изучено.

Имеющиеся работы по горению конденсированных веществ в электрических полях рассматривают вопросы изменения массовой скорости и температуры пламени. В [6], изучено влияние поперечного электрического поля на процесс горения ПММА и СКН-40Т. Согласно представленным данным электрическое поле увеличивает массовую скорость горения ПММА и СКН-40Т и максимальную температуру пламени. Полученные результаты объяснены изменением механизма химических реакций. Изменения механизма химических реакций также обнаружены в [7], где отмечено улучшение полноты сгорания и теплоотдачи от пламени в электрическом поле.

Аналогичные процессы наблюдаются и для жидких топлив [1,8,9]. В работах показано, что при наложении электрического поля скорость горения органических топлив (бензина, бензола, гексана) может увеличиваться на 15% при напряженности 200 кВ/м. Наряду с увеличением скорости сгорания жидкости, электрическое поле способно замедлять горение. Снижение скорости горения для органических топлив (бензина, бензола, гексана), при изменении напряженности 0-200 кВ/м, составляет на 0-10%. Полученные результаты авторы объясняют возникновением ионного ветра, который изменяет тепловой поток в жидкую фазу, чем интенсифицируется или ослабляется испарение.

Применение закономерностей и механизмов, разработанных для газовых смесей, не позволяет объяснить аномалии, возникающие при горении конденсированных веществ в электрических полях. Эти аномалии результат особенностей газификации конденсированной фазы при горении вещества. Авторы работы [12] показали возможность изменения скорости горения жидкости путем воздействия на различные области зоны горения. В зависимости от области локализации электрического поля наблюдаются различные эффекты. Наложение электрического поля на топливо, предварительная обработка, – приводит к снижению скорости горения. Создание электрического поля в области фазового перехода приводит к резкому возрастанию скорости горения.

При исследовании горения полимеров обнаруживаются эффекты, которые невозможно связать с изменениями процессов в пламени. В [10] исследовано горение самозатухающих материалов на основе полистирола в продольном электрическом

поле. Показано, что поле способствует улучшению процесса горения. В работе [11] исследовано распространении 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 [11].

Особенности, возникающие при исследовании горения конденсированных веществ в электрическом поле, требуют дальнейшего изучения влияния электростатического поля на рассматриваемый процесс. В связи с этим в работе поставлена задача исследования особенностей фазовых превращений жидкостей и пиролиза полимеров в процессе горения в электростатическом поле.

Экспериментальная установка и методика эксперимента

Исследования горения жидкостей проводились на экспериментальной установке, описанной в [12]. Установка состоит из кварцевой горелки диаметром 12 мм, также используются горелки диаметрами 14 и 20 мм, системы измерения скорости горения, системы визуализации и системы создания электрического поля.

Экспериментальная установка для исследования горения полимеров включает в себя горелку, установленную на весы ВСЛ-200/0,1, систему визуализации и систему создания электрического поля. Система создания электрического поля состоит из сетчатых электродов размерами 120*120 мм. Разность потенциалов между электродами создается источником высокого напряжения НСР 35-35000. Измерения массовой скорости горения производится при помощи непрерывного взвешивания горящего полимера, методика подробно описана в [13].

В качестве объектов исследования выбраны жидкие углеводороды ряда алканов ($C_{10}H_{22}$ - $C_{15}H_{32}$) и каучуки бутадиен-нитрильный каучук (СКН-26), бутадиен-стирольный каучук (СКМС-30), полибутадиеновый каучук (СКД-2).

Результаты и их обсуждение

Проведено исследование горения жидкости в электростатическом поле, направленном нормально на границу раздела фаз. Электрическое поле создается между сетчатым электродом, расположенным около поверхности жидкости, и штыревым электродом, установленным над пламенем. В результате использования такой конфигурации электродов вдоль сетки создается однородное электрическое поле.

Авторами [12] показано, что воздействие электростатического поля на границу раздела фаз при горении жидких алканов приводит к аномальному увеличению скорости горения. Скорость возрастает в 8-10 раз при сравнительно малой напряженности поля (0-60 кВ/м) на поверхности жидкости. При наложении электростатического поля на границу раздела фаз наблюдается существенное, почти на порядок, увеличение факела пламени. Как указывается в [12], при наложении электрического поля на границу раздела фаз

происходит изменение режима испарения и поступления топлива в зону горения. Поставка паров жидкости в пламя становится пульсирующей.

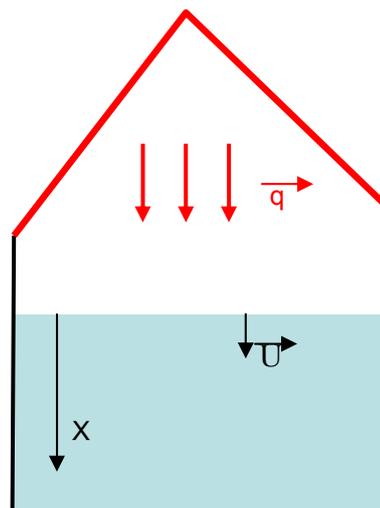


Рис. 1 - Схема элементарной модели горения жидкости

Для описания изменения механизма фазового перехода жидкостей и пиролиза полимеров при горении в электростатическом поле рассмотрим тепловое состояние системы. Приведённая на рис. 1 элементарная модель горения жидкости позволяет качественно описать распределение температуры в ж-фазе. Известно [14,15], что теплообмен между пламенем и жидкостью при горении осуществляется излучением. Учитывая, что поглощение излучения в жидкости описывается законом Бугера, объемная плотность источников тепла, при координате x находится:

$$I = I_0(1 - e^{-\alpha x}) \Rightarrow q(x) = \frac{dI}{dx} = I_0\alpha e^{-\alpha x}, \quad (1)$$

здесь I_0 – интенсивность излучения падающего на поверхность топлива, α – коэффициент поглощения жидкости, $q(x)$ – объемная плотность источников тепла на глубине x .

Запишем задачу теплопроводности в системе отсчёта жестко связанной с поверхностью жидкости [16]

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

$$\text{при } x = 0, \quad T = T_s; \quad (3)$$

$$\text{при } x = \infty, \quad T = T_0, \quad (4)$$

где a – коэффициент температуропроводности, U – линейная скорость горения, c – удельная теплоемкость, ρ – плотность жидкости, T_s – температура стенки.

Полученное аналитическое решение данной задачи позволяет произвести математическое моделирование температурного поля в жидкости, сканируя температуру поверхности T_s . Результаты представлены на рис. 2. Изменение температуры T_s производится в диапазоне 300-425 К с шагом 25К. В расчете использованы теплофизические параметры жидкости из [17]. Из графика видно, что профиль температуры имеет экстремум в подповерхностном

слое, при всех значениях T_s и качественно не изменяется в зависимости от её величины. Наличие экстремума на температурной кривой объясняется стоком тепла с поверхности жидкости при ее испарении, что приводит к охлаждению поверхностного слоя и притоку тепла из нижних слоёв, получающих тепло излучением от пламени.

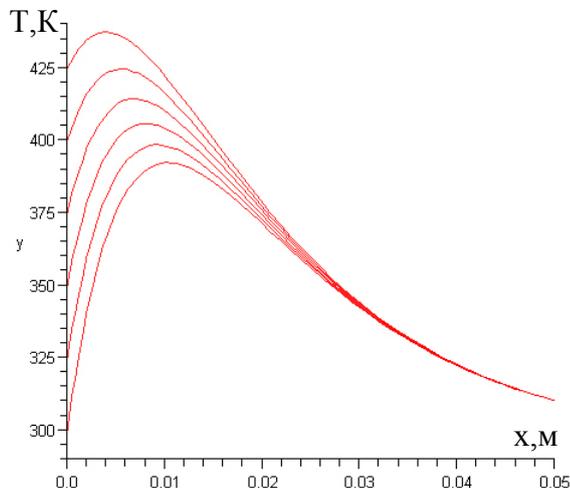


Рис. 2- Температурный профиль при различных значениях T_s

Аномалии фазового перехода при горении конденсированных веществ в электрическом поле, созданном на границе раздела фаз, можно связать с особенностью формы температурной кривой полученной при решении уравнения (2). В экстремуме максимальная температура и наиболее лучшие условия для вскипания. Известно, [18], что в электрическом поле на границе диэлектрика возникают пондермоторные силы направленные в сторону убывающей диэлектрической проницаемости, это приводит к растяжению жидкости. Растяжение приводит к увеличению вероятности образования критических зародышей в области с максимальной температурой. Оценим изменение частоты зародышеобразования в области максимальной температуры с учетом пондермоторных сил. Изменение давления в зародыше новой фазы находится следующим образом [18]:

$$p_n = \frac{1}{s} \left(\frac{\epsilon_1 \epsilon_0 E^2}{2} S - \frac{\epsilon_2 \epsilon_0 E^2}{2} S \right) = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} (\epsilon_1 - \epsilon_2), \quad (5)$$

где S - площадь поверхности жидкости, E - напряженность поля, ϵ_1 ϵ_2 – диэлектрические проницаемости жидкой и газообразной фаз соответственно.

Относительное изменение частоты зародышеобразования найдется [19]:

$$K = \frac{J}{J_0} = \frac{\exp\left(-\frac{W}{kT}\right)}{\exp\left(-\frac{W_0}{kT}\right)} = \exp\left(\frac{W_0 - W}{kT}\right), \quad (6)$$

где W – работа образования критического зародыша с учетом действия пондермоторных сил:

$$W = \frac{16\pi\sigma^3}{3(p_s - (p_0 - p_n))^2 \left(1 - \frac{v'}{v''}\right)^2}, \quad (7)$$

W_0 – работа образования критического зародыша в естественных условиях:

$$W_0 = \frac{16\pi\sigma^3}{3(p_s - p_0)^2 \left(1 - \frac{v'}{v''}\right)^2}. \quad (8)$$

В формулах (6-8) p_s - равновесное давление в жидкости при заданной температуре, p_0 – давление пара в растущем пузырьке, p_n - давление создаваемое пондермоторными силами, σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, v' и v'' - удельные объемы жидкой и газообразной фазы соответственно.

Результаты расчета сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Относительное изменение частоты зародышеобразования K в электрическом поле

E, кВ/м	0	10	20	30	40	50
K	1	1	3	15	128	1962

Из представленных результатов расчета видно резкое изменение частоты зародышеобразования, изменение возникают с напряженности поля порядка 20 кВ/м, что соответствует напряженности, при которой начинается и аномальный рост скорости горения [12,20].

Обобщая полученные результаты аномальное горение жидкости можно объяснить следующим образом. В результате возникновения пондермоторных сил в электрическом поле в слое с максимальной температурой интенсифицируются процессы зародышеобразования, и данный слой взрывом переходит в пар. При этом, поверхностный слой жидкости, имеющий меньшую температуру, остается неизменным. Образовавшийся пар расширяется и толкает вверх слой жидкости, который по мере движения распадается на капли. Соответственно в зону горения попадает не пар, а аэрозоль, который испаряется и сгорает в пламени. На образование аэрозоля требуется существенно меньше энергии, чем на испарение. Таким образом, при наложении электрического поля наблюдается смена механизма фазового перехода, а именно возникновение взрывного вскипания, которое и ответственно за аномальное увеличение скорости горения.

Аномалии при горении в электрическом поле также обнаружены также и у полимеров. Известно, что в пламени газов при избытке окислителя обнаруживается избыточный положительный заряд [1,21], при этом исследование распределения зарядов в пламени при горении полимеров не производились. Нами произведена качественная оценка избыточного заряда пламени. Для этого пламя помещалось в боковое электрическое поле.

Результаты исследования горения ПММА и СКЭПТ в электрическом поле показали, что пламена отклоняются к отрицательному электроду, что согласуется с [12,21]. Соответственно факел пламени данных веществ имеет избыточный положительный заряд. Совершенно иное поведение пламени в электрическом поле обнаруживается при горении каучуков СКН-26, СКМС-30, СКД-2. Фотография пламени представлена на рис.3. Для данных

веществ часть пламени отклоняется к положительному электроду, а часть к отрицательному. Это свидетельствует о том, что в факеле существуют изолированные области с различным по знаку зарядом. Данный факт о наличии заряженных зон перекликается с результатами работы [21], где в пламенах газовых смесей обнаружено разделение заряда внутри факела пламени, и также изменение знака заряда пламени при различных значениях коэффициента избытка окислителя.

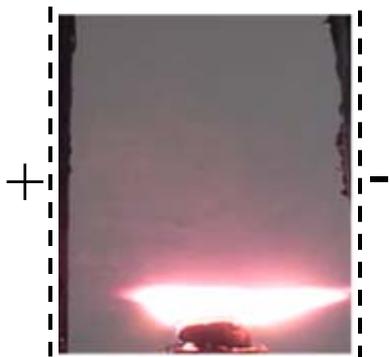


Рис. 3 - Пламя СКД 2 в электрическом поле (пунктиром обозначено положение электродов)

Наложение продольного электростатического поля на зону горения полимеров приводит к изменению режима горения, для всех исследованных горючих. Без поля факел пламени имеет четкие границы и находится над поверхностью полимера. После создания вертикального электростатического поля, факел разделяется на две составляющие: первая направлена вверх, вторая – вниз. На рис.4. представлена фотография пламени полимера. Одновременно с разделением пламени, в полимере начинаются процессы терморазложения, в результате которых интенсифицируется поступление горячего газа в факел пламени. По фотографии видно, что процессы термодеструкции идут в отдельных областях поверхности полимера. В результате этого образуются отдельные потоки горючих газов, которые образуют струи. Местоположение струй меняется со временем. Также по фотографии можно предположить, что в зависимости от места образования горючих газов в них образуется избыточный положительный или отрицательный заряд. Одновременно с процессами пиролиза, происходит диспергирование полимера. В факеле пламени обнаруживаются отдельно летящие капли.

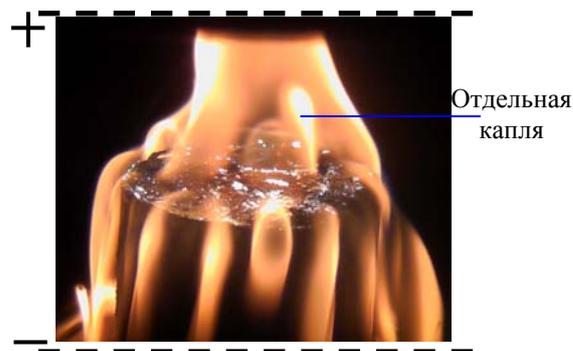


Рис. 4 - Горение СКД-2, пунктиром обозначено положение электродов

Заключение

Обнаружено anomальное поведение конденсированной фазы при горении в присутствии электростатического поля. Аномалии связаны с изменением режимов фазового перехода жидкости и термораспада каучука. Фазовый переход жидкостей в этих условиях, при достижении определённой напряжённости поля, происходит по закону взрывного кипения, а распад каучука отличается сильным диспергированием и образованием струй. Изменение механизмов испарения и деструкции резко увеличивает скорость горения.

Для жидкости предложено описание механизма обнаруженного явления, на основе рассмотрения теплового состояния к-фазы и учёта действия в подповерхностном слое пондермоторных сил, стимулирующих рост зародышей парообразования. Показано, что anomальное диспергирование происходит только у полимеров, которые имеют разделённые в пространстве разноименно заряженные области внутри факела пламени.

Литература

1. Е.М. Степанов, Б.Г. Дьячков, Ионизация в пламени и электрическое поле. Металлургия, Москва, 1968. 311 с.
2. В.В. Афанасьев, Н.И. Кидин, Диагностика и управление устойчивостью горения в камерах сгорания энергетических установок. ФИЗМАТЛИТ, Москва, 2008. 176 с.
3. Н.И. Кидин, Влияние внешних электромагнитных полей на процессы горения [Электронный ресурс] / http://www.ism.ac.ni/sgv/rtf/l_21.rtf
4. E.N. Volkov, A.V. Sepman, V.N. Kornilov, A.A. Konnov, Y.S. Shoshin, L.P.H. de Goey, In Proceedings of the European Combustion Meeting, 1-6 (2009)
5. П.К.Третьяков, А.В.Тупикин, В.Н.Зудов, Физика горения и взрыва, 45, 4, 22-25 (2009)
6. А.А. Подвальный, М.М. Арш, Ю.В. Гойхма, А.Н. Максимов, Физика горения и методы её исследования, 5, 81-86 (1975)
7. М.Я. Пурмал, VI всесоюзный семинар по электрофизике горения (Караганда, 1983), Караганда, 1983 С.36.
8. E.P. Ilchenko, V.G. Shevchuk, Ukr. J. Phys, 50, 2, 144-150 (2005).
9. E.P. Ilchenko, V.G. Shevchuk, 13th International Congress on Plasma Physics. (Kiev, 2006) <http://icpp2006.kiev.ua/CD/D/D036p.pdf>

10. С.Н. Колецов, С.А. Корниевский, Б.П. Степанов, И.М. Дашков, VI всесоюзный семинар по электрофизике горения (Караганда, 1983) Караганда, 1983 С.36
11. А.Ф. Пантелеев, Г.А. Попков, С.Г. Царищенко, Ю.Н. Шебеко, Физика горения и взрыва, 3, 39-41 (1992)
12. С.М. Решетников, И.А. Зырянов, Вестник Казанского технологического университета, 1, 120-128 (2011)
13. С.М. Решетников, А.П. Позолотин, Общество, наука, инновации (НТК-2012) (Киров, 26-29 апр. 2012). Киров, 2012. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) Статья №2
14. Д. Б. Вафин, А. В. Садыков, В. И. Емекеев, Вестник Казанского технологического университета, 5, 16-21(2011).
15. Atsushi Nakakuki, Combustion and flame, 23, 337-346,(1974)
16. И.А. Зырянов. С.М. Решетников, Л.Т. Гребенщиков, XIV Минский международный форум по тепло- и массообмену, Минск, 2012. – том 2, ч.2. с. 471-174
17. Н. Б. Варгафтик, Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей, Физматгиз, Москва, 1963.
18. Д.В. Сивухин, Общий курс физики Т2. Электричество, Москва, 1983
19. В.П. Скрипов, Е. Н. Сеницын, П.А. Павлов, Г.В. Ермаков, Г.Н. Муратов, Н.В. Буланов, В.Г. Байдаков, Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии. М:Атомиздат, 1980. 208 с.
20. С.М. Решетников, И.С. Решетников, И.А. Зырянов, Бутлеровские сообщения, 25, 5-8, 88-95 (2011)
21. А.С Бобров, Автореф. дисс. канд. техн. наук, Казанский техн. ун-т. Им. А.Н. Туполева, Казань, 2009. 16с

© С. М. Решетников - д-р техн. наук, проф. каф. физики Вятского госуд. ун-та, gsm@e-kirov.ru; И. А. Зырянов – канд. техн. наук, доц. той же кафедры, b185@mail.ru; А. П. Позолотин – ст. препод. той же кафедры, firewxcross@mail.ru.