

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 (C₁₀H₂₂-C₁₅H₃₂) 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. 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 к-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: , (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] (2) при ; (3) при , (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. 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 убыли 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]: , (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]: , (6) где W – работа образования критического зародыша с учетом действия пондермоторных сил: , (7) W_0 – работа образования критического зародыша в естественных условиях: . (8) В формулах (6-8) p_s – равновесное давление в жидкости при заданной температуре,

p_0 – давление пара в растущем пузырьке, p – 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. Из представленных результатов расчета видно резкое изменение частоты зародышеобразования, изменение возникает 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 производилось. 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 пламя отклоняется 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. 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 горючего 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. Заключение

Обнаружено аномальное 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 поперечных сил, стимулирующих рост зародышей парообразования. Показано, что аномальное диспергирование происходит только у полимеров, которые имеют разделённые в пространстве разноименно заряженные области внутри факела пламени.