

## ФІЗИКА ГОРИННЯ

УДК 536.46

**Стариков М. А., Хлебникова М. Е., Буланин Ф. К., Сидоров А. Е.,  
Поletaев Н. И. Шевчук В. Г.**

*Институт горения и нетрадиционных технологий, Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова, Одесса, ул. Дворянская 2, 65082, Украина,  
E-mail: incomb@ukr.net*

### **Горение диспергированного жидкого и твердого топлива в присутствии электрических разрядов**

*В работе приведены предварительные результаты экспериментальных исследований двухфазного пламени диспергированного в воздухе жидкого и твердого органического горючего, а также пылевого пламени частиц металлов в присутствии высоковольтных, высокочастотных электрических разрядов. Исследовано влияние стримерных разрядов в газе на интенсификацию горения и условия стабилизации газодисперсных систем. Обсуждаются основные физико-химические механизмы влияния ионизации двухфазной среды на кинетику гомогенных и гетерогенных реакций, процессы массо-теплопереноса в условиях неравновесной пылевой плазмы при сжигании одиночных частиц и их газозвесей.*

**Введение.** Актуальным направлением исследований в теплоэнергетике является изучение энергетических и технологических аспектов горения диспергированных в окисляющем или инертном газе частиц твердого или жидкого горючего. Этот способ сжигания топлива привлекает большой скоростью горения газозвесей частиц, обусловленной высокой интенсивностью процессов тепло-массобмена за счет большой удельной поверхности газозвеси. Однако, в случае низкокалорийных горючих – высокозольные угли, сланцы, измельченные органические отходы (древесина, гуано) горение их газозвесей затруднено, а иногда практически не может быть реализовано из-за очень низких скоростей горения и требует применения новых подходов. Результатом многолетних исследований, выполненных во всем мире, стало понимание необходимости привлечения для решения задач горения газозвесей, как в энергетике и в экологии, так и для технологических приложений горения, знаний из физики газовой и пылевой плазмы.

Применение плазмы для улучшения горения топлива имеет длинную историю и в последние два десятилетия активно развивается, выделившись в актуальное научно-техническое направление (Plasma Assisted Combustion - PAC). На сегодняшний день большинство результатов по влиянию плазмы на процессы преобразования топлива получены для газового пламени [1].

Для газовых пламен основные механизмы интенсификации горения топлив с использованием различных видов плазмы известны достаточно хорошо. Это,

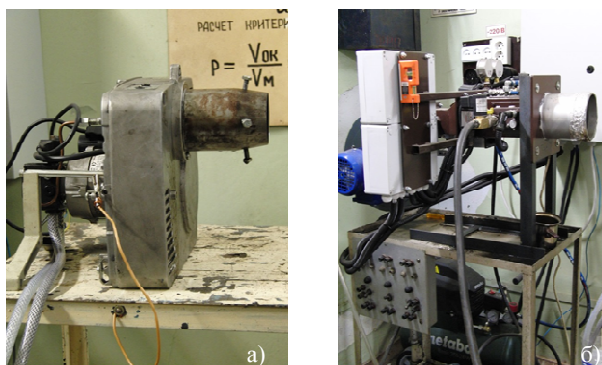
прежде всего, *тепловые, кинетические и транспортные* механизмы. Значительно меньше изучено влияние плазмы на процессы воспламенения и горения диспергированного в окисляющем газе горючего. Наличие дисперсной фазы в пламени приводит к появлению новых по сравнению с газами эффектов, обусловленных наличием заряда у частиц твердого и жидкого горючего. Большой интерес представляют необычные механизмы переноса массы и тепла за счет электрического взаимодействия электрически заряженных частиц топлива и ионов газа или поляризационного взаимодействия заряженных частиц с электро-нейтральными полярными молекулами газа [9].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияние плазмы на горение диспергированного топлива и анализ ключевых, по мнению авторов, эффектов, возникающих в условиях термической или газоразрядной ионизации двухфазного пламени. Эти эффекты влияют на все основные процессы преобразования дисперсного топлива в пылевом пламени и поэтому могут быть использованы для разработки новых энергетических и технологических схем сжигания твердого и жидкого топлива.

**Экспериментальные исследования двухфазных пламен твердого и жидкого топлива.** Для исследования влияния неравновесной ионизации двухфазного пламени жидкого топлива на их горение в настоящей работе использовались серийные жидкотопливные горелки для отопительных котлов - горелка Ламборджини и горелка МГС-Д-25-4, которые могут работать на дизельном топливе, нефти или мазуте (рис.1).

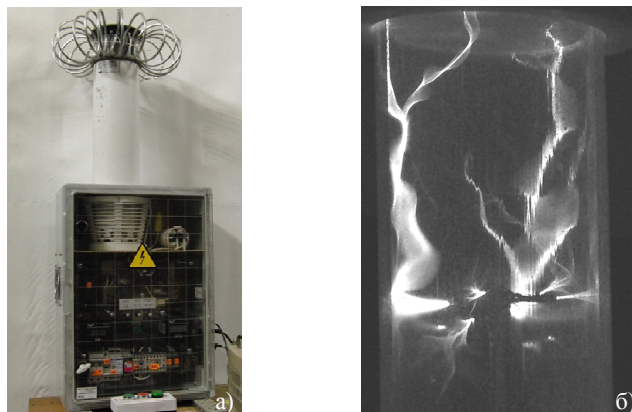
Для ионизации пламени в наших исследованиях применялся генератор Тесла со следующими характеристиками: частота генерации стримеров  $f \sim (0.1 \div 0.3)$  МГц, амплитуда импульсов  $U \leq 300$  кВ. Внешний вид генератора и стримеров в реакторе приведены на рис.2. Жидкотопливные горелки и генератор Тесла были предоставлены фирмой ООО «САНКАПИТАЛИНТЕЛЕКТ-ЭНЕРЖИ».

Пылевые пламена дисперсного горючего изучались на «пылевой» горелке, разработанной в ИГНТ ОНУ. Лабораторный стенд включал в себя коаксиаль-

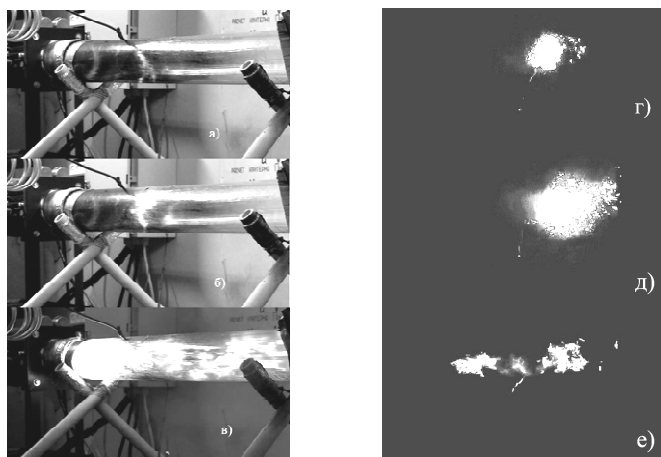


**Рис. 1.** Внешний вид жидкотопливных горелок:

а) - горелка Lamborghini ECO-5RN; б) горелка МГС-Д-25-4



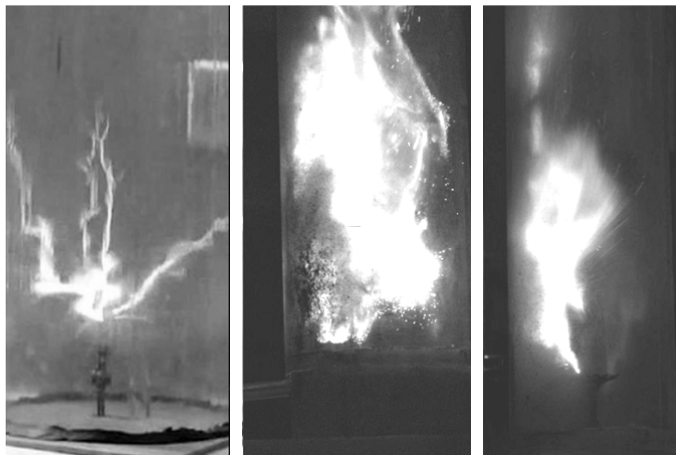
**Рис. 2.** Генератор высоковольтных стримерных разрядов (а) и разряд в трубе (б)



**Рис. 3.** Факел дизельного топлива на пределе воспламенения электрическим разрядом в кварцевой защитной трубе (а-в) и без трубы (г-е). Концентрация горючего на рисунках увеличивается сверху вниз

ную «пылевую» горелку, блок подачи и распыла порошка, систему улавливания продуктов сгорания, контрольно-измерительную аппаратуру [2]. Исследования проводились для ламинарных диффузионных двухфазных факелов (ЛДДФ) Al, Fe, Zn, Zr. Подробно способ создания ЛДДФ, а также некоторые его свойства рассмотрены в работах [2].

**Жидкое горючее.** На рис. 3(а-в) приведены фотографии распыленного воздухом в защитной кварцевой трубе дизельного топлива для условий, при ко-



**Рис. 4.** Фотографии пылевого пламя частиц твердого топлива в среде стримерного разряда. а) Высокочастотный разряд в воздухе; б) пламя частиц торфа ( $d_{10} < 100$  мкм); в) угольная пыль ( $d_{10} < 100$  мкм)

торых жидкотопливная горелка не поддерживает горение смеси горючего с воздухом. Фотографии на рис. 3 (г-е) получены с помощью скоростной киносъемки для тех же условий, но для улучшения видимости кварцевая труба не использовалась. Электроды генератора высокочастотных импульсов располагались на расстоянии 20-30 см от форсунки горелки. При включении электрического разряда наблюдались небольшие очаги пламени, которые сносились потоком газа (рис. 3а и 3г). При повышении концентрации горючего в смеси картина качественно не изменялась, но область, в которой наблюдалось воспламенение отдельных объемов смеси, увеличивалась (рис. 3б и 3д). При дальнейшем повышении концентрации горючего скоростная фотосъемка позволила зафиксировать распространения пламени влево и вправо от электрода с разрядом. Наблюдалась надежная стабилизация пламени горелки (см. рис. 3в и 3е), которая исчезала при отключении электрического разряда.

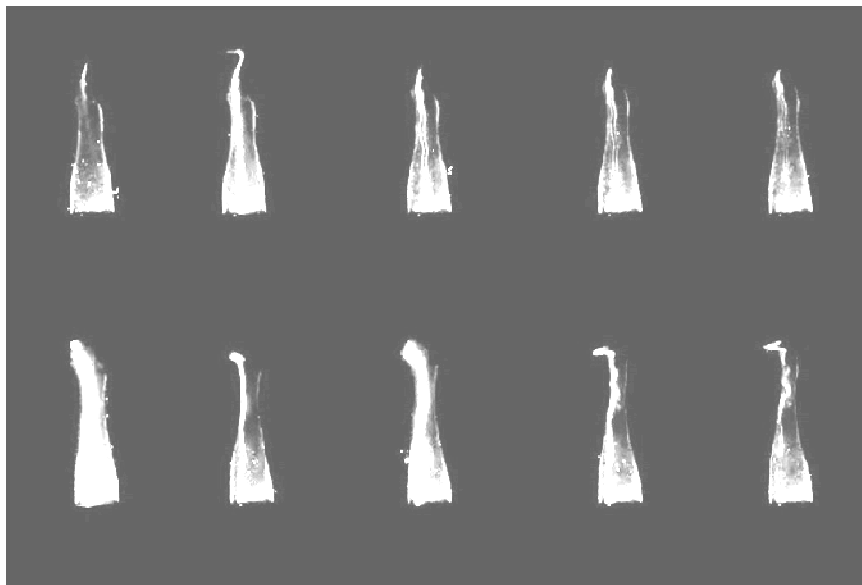
**Твердые частицы органического горючего.** Были проведены пилотные эксперименты, направленные на улучшение стабилизации пламени и увеличение интенсивности горения органической пыли (уголь, торф) под действием стримерного разряда, полученного с помощью генератора Тесла. Эксперименты проводились для твердых горючих в условиях, детально описанных в работе [3]. На рис. 4 приведены фотографии электрического разряда в трубе горелки (рис. 4а) и внешний вид факелов частиц торфа (рис. 4б) и частиц угля (рис. 4в). Наблюдалось существенное улучшение стабилизации пламени частиц торфа и угля, увеличение скорости горения и полноты сгорания, но следует отметить значительную нестабильность двухфазного факела, которая выражалась в коле-

баниях светимости пылевого пламя и его фрагментации на отдельные ячейки размером около 1-2 см.

Пока немногочисленные экспериментальные исследования горения газодисперсных систем в плазме показывают эффективность этого подхода к преобразованию дисперсного топлива в энергетике, например, для интенсификации горения угля и стабилизации пламени в промышленных топках в [4] с помощью плазмотрона.

Весьма перспективным может оказаться сжигание частиц твердого горючего в атмосфере водяного пара. Например, в [5-6] с целью получения водорода исследовано горение газозвеси частиц алюминия в водяном паре. Для ионизации газозвеси частиц алюминия в водяном паре и генерации радикалов (молекулы OH) в [5] использовался высокочастотный генератор с катушкой Тесла ( $U \sim 30$  кВ,  $f \sim 0.5$  МГц). Для плоских частиц алюминия с размерами  $50 \times 200$  мкм отмечается значительное (от нескольких часов в отсутствие плазмы до примерно 1 с при наличии плазмы) уменьшение времени химической реакции алюминия с водой. Экспериментально показана возможность детонации газозвеси частиц алюминия в водяном паре при наличии плазмы. Эти исследования получили развитие в [6] с частицами алюминия диаметром до 100 мкм. Для ионизации газозвеси частиц металла в аргоне и водяном паре при атмосферном давлении применялись различные разряды в газе – дуга постоянного тока, высокочастотный генератор на основе катушки Тесла ( $f \sim 0.5$  МГц), генератор микросекундных импульсов, а также их комбинации. Авторы утверждают, что внутри лабораторного плазмохимического реактора скорость реакции алюминия водяным паром в неравновесной плазме на 2 – 3 порядка превышала скорость реакции без плазмы. Приведены оценки энергии необходимой для генерации одной молекулы водорода (1-3 эВ/молекулу), что практически на два порядка меньше энергии необходимой для получения молекулы водорода с помощью электролиза.

**Ламинарный пылевой факел частиц металла.** Экспериментально проверена возможность использования стримерного разряда для воздействия на процессы горения и фазообразования конденсированных продуктов сгорания в ламинарных пылевых пламенах металлов. Такие исследования представляют интерес для развития технологических приложений горения металлов [2]. Частицы всех металлов имели приблизительно одинаковый размер  $d_{10} \approx 5$  мкм. По мнению авторов, можно ожидать разные эффекты влияния плазмы на горение металлов. Для факела частиц цинка ожидалось существенное улучшение его стабилизации. Ранее нами было показано, что факел цинковых частиц не удается стабилизировать при комнатной температуре даже в чистом кислороде [2]. Для факелов частиц железа, титана, циркония представляет интерес изменить с помощью плазмы режим гетерогенного горения частиц металла на газофазный режим, что позволит усовершенствовать синтез наночастиц оксидов этих металлов методом газодисперсного синтеза. Для пылевого факела частиц алюминия и магния управляемая ионизация зоны горения позволит разработать методы управления размером наночастиц оксида алюминия.



**Рис. 5.** Кинограмма пылевого факела частиц алюминия в стримерном разряде

После стабилизации диффузионного пылевого факела металлических частиц и включения генератора Тесла между металлическим корпусом «пылевой» горелки и металлическим электродом, расположенным вертикально вдоль геометрической оси цилиндрической горелки, возникал электрический разряд. Диаметр внутренней трубки горелки был равен 0.24 м. Конец электрода размещался на расстоянии 0.10 - 0.12 м от среза горелки.

Для иллюстрации на рис. 5 приведена кинограмма факела частиц железа в разряде. В отличие от рассмотренных выше турбулентных пламен органического твердого и жидкого горючих, зона горения ламинарного пламени частиц металла имеет вид конуса, и области высоких температур локализованы внутри узкой конической зоны горения. Ожидалось, что электрический разряд распределится по поверхности горения (поверхности с максимальной температурой), но в экспериментах возникал только один канал электрического разряда толщиной несколько миллиметров (рис.5). Канал размещался вдоль образующей конуса поверхности пламени и скорее всего в результате конвективных колебаний поверхности пламени положения канала случайно изменялось.

Наши ожидания были подтверждены только частично. В экспериментах значительная интенсификация горения металлической пыли наблюдалась только в области канала электрического разряда. Для частиц цинка наблюдалось их горение в электрическом разряде, о чем свидетельствует высокая светимость зоны горения, характерный для пламени цинка бирюзовый цвет, и наличие в продуктах сгорания частиц оксида цинка. В продуктах сгорания железа появи-

лись частицы оксида железа коричневого цвета ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), что свидетельствует об изменении фазового состава (и размера частиц) продуктов сгорания. В обычных условиях в диффузионном факеле частиц железа образуются частицы  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , размер которых близок к размеру частиц исходного горючего [2].

Исходя из изложенного, можно утверждать, что для улучшения горения пылевых пламен органического и неорганического горючего нужно применять те виды газовых разрядов, которые приводят к образованию объемной ионизации зоны горения двухфазного пламени.

**Механизмы ионизации газовой и дисперсной фазы в пылевом пламени твердого горючего.** Для интенсификации горения газов применяются несколько видов разрядов в газе при атмосферном давлении, которые образуют плазму с разными свойствами. *Холодная* плазма образуется в результате ударной ионизации быстрыми электронами в коронных разрядах, стримерах, искровых разрядах, разрядах через диэлектрический барьер и является сильно неравновесной. *Термическая* плазма образуется в электрической дуге постоянного или переменного тока и приводит к сильному разогреву среды в разрядном канале, что существенно снижает энергию электронов, необходимую для ионизации пламени (по сравнению с холодной плазмой). В такой плазме температура электронов близка к температуре газа и плазма по газовой фазе близка к равновесию. Различают также промежуточный вид плазмы, между холодной и термической - «теплую» плазму («warm» plasma). «Теплая» плазма является неравновесной (температура электронов  $T_e = 1-3 \text{ eV} \gg T_g \sim 2000 \text{ K}$ ) и может быть получена практически с помощью любого газового разряда (микроволновой разряд, тлеющий разряд, скользящий дуговой разряд, искровой разряд и др.) при условии, что мощность разряда (или разрядный ток) стабилизирована, чтобы не позволить разряду перейти в область дугового разряда (термической плазмы). По мнению авторов [7], этот тип разряда является оптимальным для большинства применений плазмы для преобразования топлива.

Присутствие частиц конденсированной фазы в газе сильно усложняет описание таких систем. Если речь идет о термической ионизации среды, то зарядка микродисперсных частиц проходит по диффузионному механизму, причем заряд частиц ничем не ограничен и пропорционален диаметру частицы. Если в двухфазной среде приложено электростатическое поле, то зарядка частицы происходит в направленном потоке электронов или ионов и при данной напряженности электрического поля и при данном размере частиц существует максимально возможный заряд частицы  $Q_m = \frac{E_s d^2}{4}$  [8]. Заряд достигает предельного значения, при котором напряженность внешнего поля становится равной поверхностной напряженности  $E_s$ , необходимой для спонтанной эмиссии электронов или ионов с поверхности капли. В реальных условиях наиболее вероятной является зарядка частиц в результате совместного действия диффузионной зарядки и зарядки в электростатическом поле [8].

В газоразрядной плазме в области параметров конденсированной и газовой фаз, при которых выполняется условие  $r_k \ll \lambda_D \ll l_g$  ( $\lambda_D$  – дебаевский радиус экранирования по электронной и ионной компонентам,  $l_g$  – длина свободного пробега молекул газа), заряд частиц радиусом  $r_k$  можно определить в приближения ограниченного орбитального движения (OML) [8]. Если плазму в зоне горения можно считать равновесной (все компоненты плазмы имеют одинаковую температуру) и конденсированную компоненту можно рассматривать как плазменную компоненту (выполняется условие: количество частиц  $N_{\lambda_D} = \frac{4}{3}\pi\lambda_D n_k$  в дебаевской сфере много больше единицы, где  $n_k$  – концентрация частиц), ионизационное равновесие в системе можно рассчитать с помощью системы уравнений Саха.

**Влияние ионизации среды на кинетику химических реакций и процессы переноса.** В ионизированных газодисперсных системах скорость протекания гетерогенных химических реакций может зависеть от наличия электрического заряда у частицы. Этот эффект объясняется увеличением интенсивности взаимодействия молекул газа с поверхностью частицы в результате увеличения кинетической энергии заряженных или электрически нейтральных полярных молекул газа в электрическом поле заряда на длине свободного пробега молекул газа  $l_g$ . Увеличение энергии молекул газа приводит к тому, что увеличивается доля молекул обладающих энергией достаточной для преодоления потенциального барьера химической реакции. В таких условиях возникают мощные электростатические молекулярные насосы, влияющие на процессы переноса активных реагентов к зоне реакции и при постоянной температуре среды увеличение скорости химической реакции на поверхности топлива можно трактовать, как «понижение» энергии активации реакции ( $E_a$ ).

Увеличение кинетической энергии полярной молекулы ( $\varepsilon_T$ ) равно изменению электростатической энергии диполя  $u(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{pQ}{r^2}$  в электрическом поле частицы на длине свободного пробега молекулы  $l_g$  ( $p$  – дипольный момент молекулы,  $Q$  – заряд частицы конденсированной фазы,  $r$  – расстояние от центра частицы до диполя,  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная). Для радиуса частицы  $r_k \ll l_g$  получим:

$$\varepsilon_T = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{pQ}{(l_g + r_k)^2} - \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{pQ}{r_k^2} \approx \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{pQ}{r_k^2}. \quad (1)$$

Очевидно, что если частица взаимодействует не с полярной молекулой, а с ионом противоположного с зарядом  $q$  знака, то изменение кинетической энергии иона будет  $\varepsilon_T \sim qQ/r_k^2$ .

Если  $\varepsilon_a = E_a/N_A$  – энергия активации химической реакции, приходящаяся на одну молекулу ( $N_A$  – число Авогадро), то только молекулы, обладающие кинетической энергией  $\varepsilon \geq \varepsilon_a$ , вступят в химическую реакцию на поверхности



частицы. Количество таких активных молекул ( $\Delta N$ ) из общего их количества  $N$  можно оценить из распределения Максвелла:

$$\Delta N = \frac{2N}{\sqrt{\pi}(k_B T_g)^{3/2}} \int_{\varepsilon_a}^{\infty} \sqrt{\varepsilon} e^{-\varepsilon/k_B T_g} d\varepsilon = \frac{2N}{\sqrt{\pi}} \int_z^{\infty} \sqrt{z} e^{-z} dz, \quad (2)$$

где  $z = \varepsilon_a/k_B T_g$ . Учтеть кинетическую энергию молекулы, приобретенную в электрическом поле частицы конденсированной фазы, можно заменив нижний предел интегрирования в (2) на  $z = \varepsilon_a/(k_B T_g + \varepsilon_T)$ .

Для иллюстрации величины этого эффекта рассмотрим окисление в водяном паре (дипольный момент молекулы воды  $p = 0.6 \cdot 10^{-29}$  К м) частицы алюминия радиусом  $r_k=1$  нм с минимальным зарядом  $Q = 1.6 \cdot 10^{-19}$  К при температуре  $T_m \sim 933$  К (температура плавления алюминия). С помощью (1) и (2) легко убедиться, что электростатическое взаимодействие частицы металла и молекулы воды приводит к 4-х кратному увеличению количества молекул, преодолевающих активационный барьер реакции, чем в случае, когда это взаимодействие не учитывается (в оценках принималось  $E_a = 200$  кДж/моль). Это эквивалентно «понижению» энергии активации реакции в  $(1 + \varepsilon_T/k_B T_g) \approx 1.7$  раз.

В [10] для наночастиц железа и алюминия, окисляющихся во влажном воздухе, показано, что электростатические молекулярные насосы могут приводить к весьма неожиданным эффектам, когда основным окислителем горючего оказывается не кислород воздуха, а пары воды, мольная доля которых на порядок меньше концентрации кислорода.

В [11] было показано, что ионизация среды оказывает сильное влияние на кинетику тройных химических реакций  $A + B + C \rightarrow AB + C$ , которые весьма распространены в процессах горения. Если не учитывать обратную реакцию, то

скорость такой реакции  $\frac{d[AB]}{dt} = K[A][B][C]$ , где  $C$  – молекула балластного газа.

Для электронейтральных молекул порядок константы скорости реакции  $K \sim 10^{45}$  м<sup>6</sup>/с [12]. Наличие в газовой фазе молекулярных ионов может существенно повлиять на константу тройных столкновений. Если молекула является полярной, то константы тройных столкновений увеличивается на два порядка:  $K \sim 10^{43}$  м<sup>6</sup>/с [11]. Максимальное значение будет иметь константа скорости реакции разноименно заряженных частиц. В случае кулоновского взаимодействия однократно заряженных ионов противоположного знака  $K \sim 10^{41}$  м<sup>6</sup>/с.

Другим кинетическим аспектом взаимодействия заряженных частиц конденсированной фазы с нейтральными полярными молекулами или ионами является зависимость эффективного сечения столкновения молекул и частицы  $s_p = \pi b^2$  от величины электростатического потенциала диполя (или иона) в поле частицы. Для полярной молекулы эффективный радиус сечения столкновения  $b$  можно оценить из условия равенства тепловой энергии молекулы потенциалу

диполя  $\frac{3k_B T_g}{2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{pQ}{b^2}$ , откуда  $b = \sqrt{\frac{pQ}{6\pi\varepsilon_0 k_B T_g}}$ . В области размеров частиц

меньше 1-2 нм эффективное сечение столкновения может многократно превышать геометрическое сечение частицы, поэтому частота столкновения молекул газа с поверхностью частицы  $f = \frac{1}{4} n v_T s_p$  ( $n$  – концентрация молекул,  $v_T$  – скорость теплового движения молекул), которая определяет предэкспонент в законе Аррениуса, может быть значительно больше, чем в отсутствие электростатического взаимодействия.

Отметим, что интенсивность теплообмена частиц в свободно молекулярном режиме также определяется через частоту столкновений и коэффициент тепловой аккумуляции энергии, поэтому взаимодействие заряженной частицы (кластера) с полярной молекулой должно приводить к улучшению теплообмена мелких частиц с окружающей средой. Такой механизм важен для сброса теплоты горения или конденсации мелкими частицами конденсированной фазы.

Если для частиц выполняется условие  $r_k \gg l_g$ , то из уравнения (1) следует  $\epsilon_r \rightarrow 0$  и молекулярные электростатические насосы перестают работать. Как и в нейтральных газовзвесах, тепло- массообмен частиц с газом определяется диффузионно-кинетическим фактором  $k\beta / (k + \beta)$ . Причем как на скорость химической реакции ( $k$ ), так и на скорость массообмена ( $\beta$ ), в большей или меньшей мере будет оказывать влияние ионизация пламени (быстрые реакции с радикалами и ионами, кулоновское взаимодействие реагентов, амбиполярная диффузия реагентов и т. п.).

Еще одним важным механизмом влияния ионизации пламени на характеристики горения диспергированного топлива является дробление капель жидкого горючего в результате накопления на ее поверхности электрического заряда, достигающего предел Релея  $Q_r = \sqrt{2\pi\sigma d^3}$ , где  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости [8]. Капля делится на несколько более мелких устойчивых капель. Заряд образовавшихся капель в электрическом поле возрастает в направлении  $Q_m$ , но достигнув релеевского предела  $Q_r$ , капли снова делятся на несколько более мелких капель. Этот лавинообразный процесс деления в электрическом поле прекращается, когда размер горящих (или испаряющихся) капель становится таким, что предельный заряд капли достигается раньше, чем предел устойчивости Релея ( $Q_m < Q_r$ ). Этот минимальный размер капель  $d_m$

можно оценить из соотношения  $Q_r = Q_m$ , откуда  $d_m = \frac{16\pi\sigma}{E_s^2}$ . Следует иметь в виду, что при приближении температуры капли горючего к температуре кипения жидкости, поверхностное натяжение уменьшается ( $\sigma \rightarrow 0$ ) и, соответственно  $d_m$  стремится к нулю. Таким образом, рассмотренный механизм лавинообразного деления капель распыленного жидкого горючего может существенно улучшать характеристики горения жидких углеводородных топлив и водотопливных эмульсий на их основе.

**Заключение.** Из приведенного в работе рассмотрения следует вывод о перспективности технологии плазменно-стимулированного горения для эффек-

тивного сжигания диспергированного горючего. Можно ожидать, что высокая химическая активность среды, которая достигается за счет активных радикалов и атомов, возбужденных молекул кислорода и озона, улучшение в плазме транспортных механизмов переноса массы и тепла, существенно повлияет на режим и скорость горения частиц горючего и тем самым позволит решить актуальные задачи преобразования топлива в энергетических и технологических приложениях горения дисперсного топлива.

Очевидно, что внедрение этой технологии в промышленную энергетику требует накопления новых, прежде всего экспериментальных, данных и знаний о плазменно-стимулированном горении дисперсных систем в электрических разрядах различного вида. Для этого необходимо совершенствование известных и развитие новых методик определения основных характеристик неравновесной пылевой плазмы в зоне горения пламени диспергированных жидкого и твердого горючих и разработки методов получения и диагностики таких пламен при наличии высоковольтных разрядов в газе.

Для эффективного внедрения плазменно-стимулированного горения дисперсных систем в промышленные энергетические схемы требуется тщательный теоретический анализ влияния ионизации пламени на кинетику гетерогенных и газофазных реакций, влияния электрических зарядов газа и конденсированной фазы на процессы тепло- массопереноса. Поэтому, потребуется разработка новых физических моделей, алгоритмов и программ для адекватного описания таких процессов.

#### Литература:

1. *Yiguang Ju, Wenting Sun.* Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry// *Progress in Energy and Combustion Science* – 2015. – Vol. 48. – P. 21-83.
2. *Золотко А.Н., Полетаев Н. И., Вовчук Я. И.* Газодисперсный синтез наночастиц оксидов металлов. // *Физика горения и взрыва.* – 2015.– Т. 51, №2. – С. 125-143.
3. *Кондратьев Е.Н., Шевчук В.Г., Стариков М.А. и др.* Поведение дисперсных систем в атмосфере стримерного разряда // *Материалы XXIV конференции стран СНГ «Дисперсные системы».* – Одеса, 2010. – С. 153-154.
4. *Gorokhovski M.A., Jankoski Z., Lockwood F.C., Karpenko E.I.* Messerle V.E.,Ustimenko A.B. Enhancement of Pulverized Coal Combustion by Plasma Technology // *Combustion Science and Technology* – 2007. – Vol.179, №.10. – P.2065–2090.
5. *Klimov A., Bityurin V., Grigorenko A., Kutlaliev V., Moralev I., Tolkunov B.* Plasma Assisted Combustion of Heterogeneous Fuel in High-Speed Airflow // *AIAA Paper AIAA-2009-1411- 250.* – P.11
6. *Klimov A., Bityurin V., Grigorenko A. and al.* Plasma Assisted Combustion of Aluminum Dusty Particles in Water Stream // *50th AIAA aerospace sciences meeting.* AIAA. – 2012-0664. – P.12.
7. *Gutsol A, Rabinovich A, and Fridman A.* Combustion–assisted plasma in fuel conversion // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2011. – Vol. 44. – P. 274001 (14pp).

8. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию.: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 280с.
9. Фортв В. Е., Храпак А. Г., Храпак С. А. и др. Пылевая плазма // Успехи физических наук. – 2004. – Т. 174, №5. – С. 495 – 544.
10. Meshcheryakov O. Charge-Dipole Acceleration of Polar Gas Molecules towards Charged Nanoparticles: Involvement in Powerful Charge-Induced Catalysis of Heterophase Chemical Reactions and Ball Lightning Phenomenon //Journal of Nanomaterials. – 2010. – Vol. 2010. Article ID 654389. – 38 pages.
11. Полетаев Н. И. Образование конденсированных продуктов сгорания в пылевых пламенах металлов: стадия коагуляции // Физика горения и взрыва. – 2015. – Т. 51, №4. – С. 51-65.
12. Смирнов Б.М. Ионы и возбужденные атомы в плазме – М.:Атомиздат, 1974.– 456 с

**Starikov M. A., Khlebnikova M. E., Bulanin Ph. K., Sidorov A. E.,  
Poletaev N. I., Shevchuk V. G.**

### **Dispersed liquid and solid fuels combustion in an electrical discharge presence.**

#### SUMMARY

*The preliminary results of two-phase flame in the presence of high-voltage, high-frequency electric discharges are presented. The investigations were carried out for liquid and solid organic fuel dispersed in air, as well as a dust flame of metal particles. The streamer discharge influence on gas-dispersed fuel combustion and flame condition stabilization is investigated. The basic physicochemical mechanisms of a two-phase medium ionization effect on the homogeneous and heterogeneous reactions kinetics together with mass-heat transfer processes in nonequilibrium dusty plasma conditions during the single particles and aerosuspensions combustion are discussed.*

**Стариков М. А., Хлебнікова М. Є., Буланін Ф. К., Сидоров А. Е.,  
Полетаєв Н. І. Шевчук В. Г.**

### **Горіння диспергированного рідкого і твердого палива в присутності електричних розрядів.**

#### АНОТАЦІЯ

*В роботі наведено попередні результати експериментальних досліджень двофазного полум'я рідкого і твердого органічного палива яке розпилено в повітрі, а також пилового полум'я частинок металів в присутності високовольтних, височастотних електричних розрядів. Досліджено вплив стримерних розрядів в газі на інтенсифікацію горіння і умови стабілізації газодисперсних систем. Обговорюються основні фізико-хімічні механізми впливу іонізації двофазного середовища на кінетику гомогенних і гетерогенних реакцій, процеси масо-теплопереносу в умовах нерівноважної пилової плазми при спалюванні поодиноких частинок та їх газозависів.*