

**Канд. техн. наук Д. А. Долматов**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## **ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МЕХАНИЗМЫ ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ В НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ ОКРЕСТНОСТИ РАЗРЯДА**

*Проведено математическое моделирование горения предельных углеводородов в окрестности стационарного дугового и СВЧ-разрядов. Обнаружены криптонестационарные эффекты, связанные с лучистым переносом энергии из ствола разряда в зону присоединенного течения и вторичной ионизации, возникающем при релаксации возбужденных электронным ударом частиц и ионов. Проанализирована асимметричность периодического ускорения/замедления скорости горения относительно оси разряда и ее связь с газодинамическим сносом реагирующих возбужденных частиц, исследованы сопутствующие механизмы перестройки кинетической схемы процесса горения.*

**Ключевые слова:** *возбужденное состояние, лучистый перенос энергии, пульсации параметров, скорость горения, концентрация реагента.*

### **Введение и постановка задачи**

Исследование процессов электрохимического и плазменного горения в последнее время обладает тенденцией к увеличению детализации применяемых математических моделей, росту потребности точности численных и натурных экспериментов, а также все большему числу учитываемых и обнаруживаемых эффектов, связанных с физико-химической природой индуцируемых электрически не нейтральной средой/разрядом [1, 2]. Важнейшим направлением является изучение взаимодействия стационарных и периодических разрядов и плазменных структур с реагирующей средой, в частности – обуславливаемая таким взаимодействием перестройка кинетической схемы горения, изменение скорости горения и конечных продуктов как результат возникновения и эволюций развитого нестационарного горения при постоянных граничных макроусловиях (газодинамических параметрах среды на входе в реактор ВАХ и частотных характеристиках разряда). К числу наиболее фундаментальных проблем теории и практических приложений горения и взрыва в настоящее время следует отнести вопрос о влиянии электрохимических процессов на генерацию и диссипацию турбулентных вихрей в реагирующем потоке [3]. Однако в силу недостаточной теоретической изученности и невозможности применения эмпирических и полуэмпирических моделей турбулентности численные исследования в данной области требуют использования DNS-модели, что обуславливает потребность в чрезвычайно высоких вычислительных мощностях и едва ли могут быть выполнены в пределах Украины.

Не менее важной задачей является изучение

кинетических и газодинамических механизмов в непосредственной окрестности электрического разряда – зоне вторичной ионизации и прилегающим к ней участкам течения. Как известно, электрические разряды различного типа обладают недетерминированным воздействием на температуру, структуру и эмиссионные характеристики пламени [2, 4]. В частности, их влияние может приводить как к ускорению, так и к замедлению горения. Высокая энергия свободных электронов разряда и большая реакционная способность образующихся в ходе электрохимических реакций веществ в сочетании с коротким периодом их стабильного существования приводит к развитию криптонестационарных эффектов, т. е. возникновению сравнительно высокочастотных локальных пульсаций параметров при неизменных граничных условиях. Согласно косвенным данным значительного числа исследователей, подобные процессы, в том числе – обусловленные переносом энергии электромагнитным излучением, могут служить причиной перестройки кинетической схемы реакций и фронта пламени в целом, вплоть до развития вибрационного горения и локальных детонаций [1, 2, 5]. Таким образом, математическое моделирование горения углеводородов в окрестности стационарного и в особенности СВЧ-разряда с учетом лучистого переноса и инициируемых таковым дополнительных активных частиц в зоне термического горения является актуальной задачей современной теории горения и взрыва.

### **Моделирование горения в окрестности электрического разряда**

Объектом исследования в настоящей работе является реагирующая воздушно-метановая смесь,

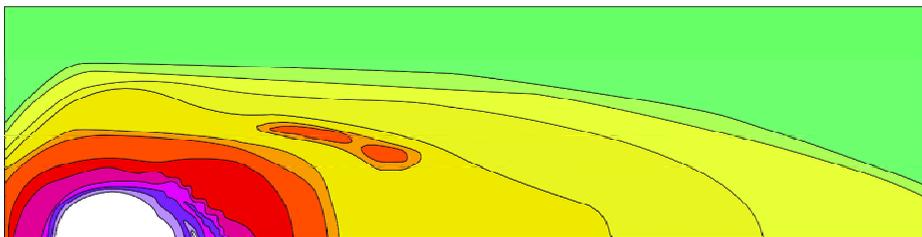
подвергаемая воздействию электрического разряда и сопутствующего первичного и вторичного (т. е., возникающего вследствие релаксации возбужденных частиц в высоких состояниях) электромагнитного излучения. В качестве математической модели при расчетах использовалась система уравнений Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу и дополненная системой уравнений Максвелла и уравнением Больцмана для распределения заряженных и электронейтральных реагентов, а также фильтрованным по смешанным коэффициентам генеральным балансом воздушного горения метана в присутствии электрического разряда и уравнениями SST-модели турбулентности [1, 2, 3, 5, 6]. Для СВЧ-разряда приня-

то распределение Маргенау для симметричной части функции распределения [6]. Результаты моделирования, выполненного на высокопроизводительной станции, приведены на рис. 1, 2.

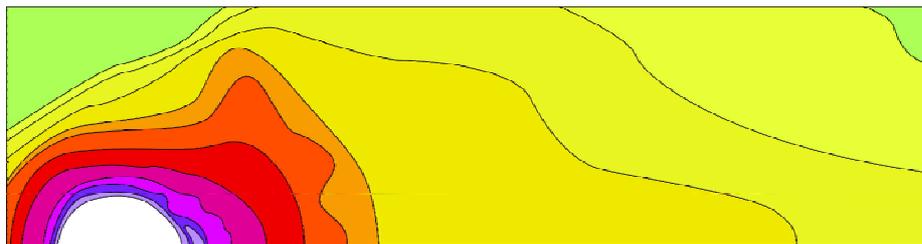
В данном случае под величиной  $T_0$  понимается средняя температура в точках пространства с координатами, соответствующими оси разряда при отсутствии разряда, т. е. при обыкновенном термическом горении метана. Параметр  $\omega_{CH_X}$  описывает молярную долю остаточных углеводородных радикалов на оси разряда при термическом горении (включая СН и промежуточные реагенты с более высокими углеродными числами, входящие в расширенный генеральный баланс воздушного горения метана [1, 4]).



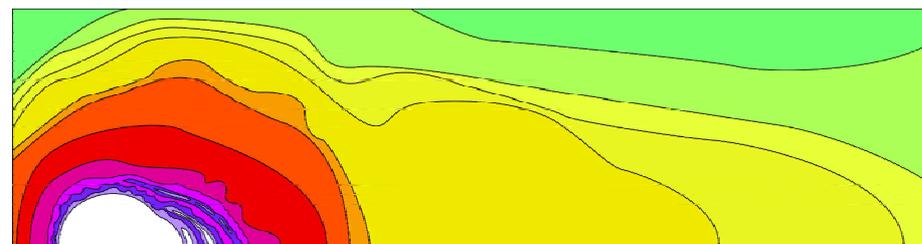
а – дуга, 1,5 А;  $\omega_{CH_X} = 0,05$ ;  $T_0 = 1800K$



б – дуга, 1,5 А;  $\omega_{CH_X} = 0,2$ ;  $T_0 = 1800K$



в – дуга, 1,5 А;  $\omega_{CH_X} = 0,2$ ;  $T_0 = 2100K$



г – СВЧ-разряд, 2 А;  $f = 1,35ГГц$ ;  $T_0 = 1800K$

Рис. 1. Температурные поля при дуговом и СВЧ-разряде

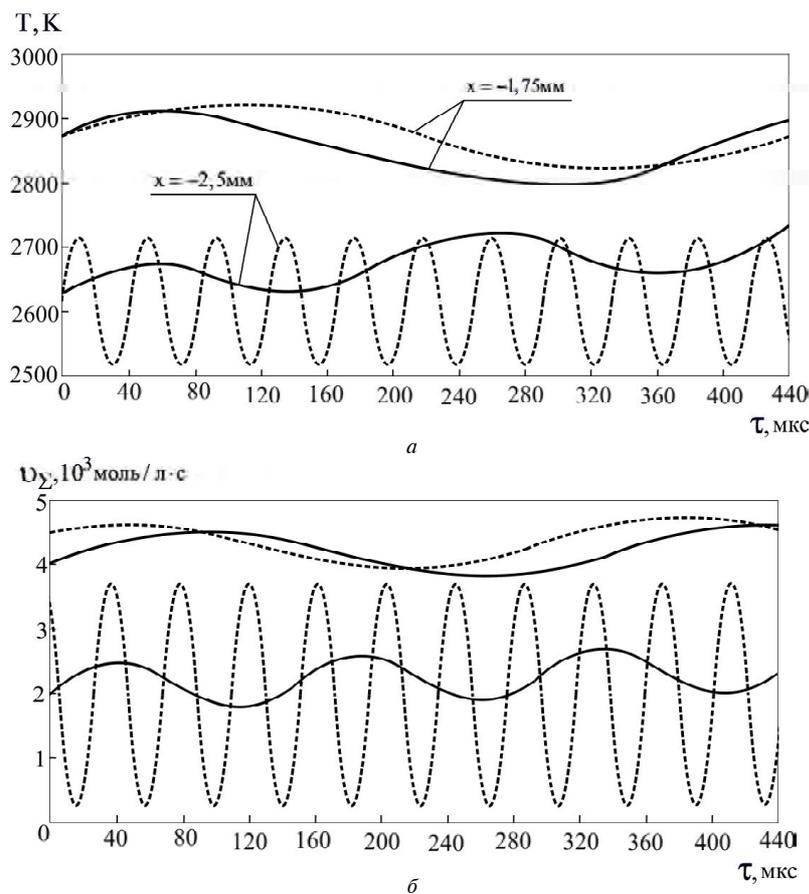


Рис. 2. Пульсации параметров в высокотемпературной зоне вторичной ионизации при дуговом разряде:

$a$  – температура среды;  $b$  – суммарная скорость реакций

Как можно видеть из рис. 1, для всех режимов электрохимического горения в сравнительно богатой остаточными углеводородами зоне характерны периодические возмущения температурного (и концентрационного) поля параметров вниз по потоку, заключающиеся в генерации колебаний температуры (на рис. 1 вследствие осреднения по времени за характерный, установленный в ходе расчетов интервал, представлены в виде зон с повышенной температурой). Однако вследствие наличия газодинамического сноса реагирующей среды из зоны свободных электронов разряда, нельзя однозначно утверждать о природе подобных волн ниже по потоку от разряда.

Для более детального изучения процессов было проведено детализированное моделирование горения в двух характерных сечениях на расстоянии 1,75 мм и 2,5 мм вверх по потоку от внешней границы ствола разряда в двух вариантах математической модели переноса энергии электромагнитным полем – с постоянным коэффициентом рассеивания лучистой энергии и без учета инициируемых излучением реакций за пределами зоны вторичной ионизации (рис. 2, сплошные линии); с нелинейным рассеиванием

излучения и инициацией реакций во всем моделируемом объеме (рис. 2, пунктирные линии).

Нетрудно видеть, что поведение параметров вблизи разряда обратно тому распределению, которое соответствует нестационарным процессам, возникающим вследствие газодинамического либо диффузионного переноса химически активных компонент из высокотемпературной зоны, поскольку в этих случаях амплитуда и частота пульсаций монотонно падает при увеличении дистанции между контрольной точкой и границей разряда [6]. Напротив, в рассматриваемом случае вне зависимости от степени детализации используемой модели переноса наблюдается интенсификация колебаний температуры (рис. 2,  $a$ ) и суммарной скорости реакций (рис. 2,  $b$ ) при удалении от границы разряда.

Очевидно, возбуждаемые разрядом колебания параметров пламени связаны с периодическим насыщением реакционной зоны вблизи разряда частицами с повышенной реакционной способностью (ионы и возбужденные частицы), возникающих вследствие возбуждения компонент электромагнитным полем, и последующим истощением реагентов. Таким образом, полученные в

ходе расчетов и представленные на рис. 1, 2 результаты свидетельствуют об основополагающей роли лучистого энергообмена для инициации нестационарных процессов в непосредственной окрестности разряда при электрохимическом горении и газодинамического сноса – для распространения нестационарных эффектов вниз по потоку, а также восполнения химического профиля среды в зоне вторичной ионизации после периодического истощения реагентов. Ярко выраженные различия между воздействием на поток стационарного и СВЧ-разряда (рис. 1, 2) представляют собой материал для дальнейших исследований – в частности, изучения вопроса возможности существования резонанса между частотой разряда и криптонестационарными пульсациями потока в высокотемпературной зоне.

#### Список литературы

1. Битюрин В.А. Исследование горения углеводородного топлива, стимулированное неравновесными плазменными образованиями в воздушном высокоскоростном потоке / В. А. Битюрин, А. И. Климов. Законы горения / под общ. ред. Ю. В. Полежаева. – М. : Энергомаш, 2006. – 352 с.
2. Долматов Д. А. Химическая кинетика реакций возбужденных частиц при слабой ионизации среды / Д. А. Долматов, А. В. Кукурудза, М. Хадживанд // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 8/95. – С. 73–78.
3. Takahashi T. Measurement of NO rotational and vibrational temperatures in arc heated flow by LIF spectroscopy / T. Takahashi, T. Yamada, and Y. Inatani // 20th International Symposium on Space Technology and Science, Gifu, Japan, May 19–25, 1996.
4. Законы горения / под общ. ред. Ю. В. Полежаева. – М. : Энергомаш, 2006. – 352 с.
5. Оран Э. Численное моделирование реагирующих потоков / Э. Оран, Дж. Борис. – М. : Мир, 1990. – 660 с.
6. Райзер Ю. П. Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. – Долгопрудный : Изд. Дом. Интеллект, 2009. – 736 с.

Поступила в редакцию 01.04.2014

#### **Долматов Д.А. Вплив електромагнітного випромінювання на механізми горіння вуглеводнів у безпосередньому довікеллі розряду**

*Проведено математичне моделювання горіння алканових вуглеводнів у довікеллі стаціонарного дугового та високочастотного розрядів. Винайдені крипто-нестационарні ефекти, що пов'язані з променевим переносом енергії зі стволу розряду до зони приєднаної течії та вторинної іонізації, котрий виникає внаслідок релаксації збуджених електронним ударом часток та іонів. Проаналізовано асиметричність періодичного прискорення/уповільнення швидкості горіння відносно осі розряду та її зв'язок з газодинамічним зносом реагуючих збуджених часток, досліджено механізми перебудови кінетичної схеми процесу горіння.*

**Ключові слова:** збуджений стан, променевий перенос енергії, пульсації параметрів, швидкість горіння, концентрація реагенту.

#### **Dolmatov D. The influence of EM radiation on the hydrocarbon combustion mechanism near discharge**

*The article consists the results of mathematical modeling of the alkyl hydrocarbon near constant arc and SHF discharges. There were founded the crypto-transient effects which are linked with energy transmission from the main discharge to the connected area and secondary ionization zone by the EM radiation, generated during excited ions and particles relaxation processes. The axial asymmetric of flame total reaction speed acceleration/deceleration and gas dynamic influence on this effect have been analyzed, kinetic mechanism's rebuilding were researched.*

**Key words:** excited state, radiation energy transmission, parameter's pulsation, flame speed, reagent concentration.