

*Четырнадцатая Международная научно-техническая конференция  
«Оптические методы исследования потоков»  
Москва, 26 – 30 июня 2017 г.*

УДК 53.097

*Венедиктов В.С.<sup>1</sup>, Замашников В.В.<sup>2</sup>, Тупикин А.В.<sup>1</sup>, Третьяков П.К.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
Россия, 630090, Новосибирск, Институтская ул., 4/1, E-mail: vovaninsert@rambler.ru*

<sup>2</sup> *Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, Россия, 630090,  
Новосибирск, Институтская ул., 3*

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА PIV ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ  
НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ДИФфуЗИОННОЕ  
ГОРЕНИЕ ГАЗООБРАЗНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ**

**АННОТАЦИЯ**

Наложение внешнего электрического поля (ЭП) на пламя рассматривается как один из перспективных методов решения задач по оптимизации процессов сжигания органического топлива, актуальных в современном мире.

В работе приведены результаты исследования нестационарного воздействия слабого ЭП на диффузионное горение углеводородов оптическими методами диагностики, не вносящими возмущений в структуру исследуемого объекта. Помимо прямой фото- и видео регистрации, спектрональной съёмки собственного излучения пламени, в работе был применён метод PIV для изучения воздействия ЭП на диффузионный факел в спутном потоке воздуха.

Получены данные (PIV), свидетельствующие о возможности улучшения процесса смешения, интенсификации горения в случае воздействия на пламя ЭП заданной пространственно-временной конфигурации.

**ДИФфуЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ, ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ, PIV, ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ГОРЕНИЯ**

**ВВЕДЕНИЕ**

Актуальность работ, связанных с изучением процессов сжигания углеводородных топлив не вызывает сомнений, поскольку горелочные устройства различных типов имеют широкое применение в технике (транспорте, металлургии, промышленности), а проблема дефицита топливно-энергетических ресурсов (таких как газообразные углеводороды) становится всё более значимой с каждым годом.

Одним из распространённых типов газовых горелок является диффузионный. Для диффузионного горения характерны одновременно происходящие смешение топлива с окислителем (в частности, воздухом) и процесс горения. При ламинарном течении газа смешение обеспечивается путем молекулярного взаимопроникновения за счет теплового движения, а в случае турбулентного потока – путем турбулентной диффузии за счет обмена или смешения целых молярных объемов. Скорость диффузионного горения газа зависит от физического процесса диффузии горючего и воздуха, характера истечения и взаимной

направленности потоков, т. е. от факторов гидродинамического характера. Это позволяет путем регулирования скорости смесеобразования регулировать время сгорания газа [1].

С практической точки зрения более выгодно, когда горение в открытом факеле горелки является устойчивым. В зависимости от положения области устойчивого горения диффузионное пламя может быть стабилизированным как на кромке сопла горелки – присоединённое, так и на определенной высоте от него – поднятое.

Существуют различные способы воздействия на пламя с целью улучшения характеристик систем сжигания. Одним из перспективных методов является наложение ЭП, так как в углеводородном пламени вследствие хемоионизации присутствует повышенная концентрация ионов ( $10^9$ - $10^{12}$  ионов/см<sup>3</sup> [2]). Воздействие слабого (допробойной величины) внешнего ЭП приводит к электрогазодинамическому эффекту («ионному ветру»), позволяющему изменять скорость смесеобразования горючей смеси и многие интегральные характеристики пламени [3].

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данного исследования было применение спектрозональной регистрации и апробация метода PIV для изучения воздействия нестационарного электрического поля на диффузионный факел пропана.

## Схема эксперимента

Объектом исследования было присоединённое диффузионное пламя пропана. Внутренний диаметр топливного сопла – 1,5 мм, внешний – 6 мм, внутренний диаметр сопла для подачи спутного воздуха – 20 мм. Для нестационарного воздействия ЭП на пламя была разработана и создана схема наложения ЭП (рис. 1), включающая 8 тонких цилиндрических электродов из нержавеющей стали (диаметр 1 мм), с возможностью их регулирования по высоте  $h$  над срезом сопла. Напряжение подаётся на противоположные электроды попарно и переключается по кругу электронным переключателем импульсов (специально разработанным для данного исследования и созданным сторонней организацией), создавая тем самым вращение вектора напряжённости ЭП относительно оси топливной струи.

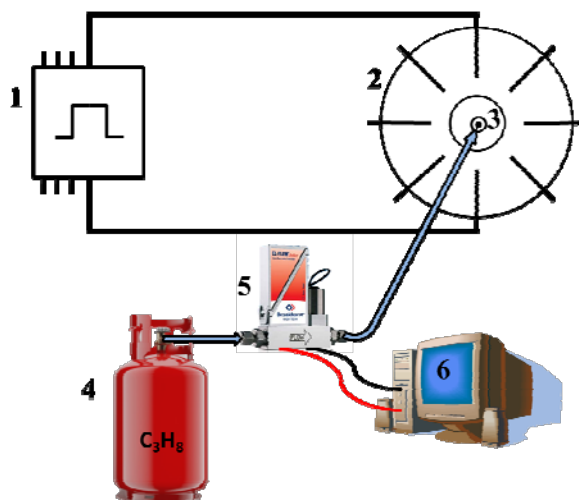


Рис. 1 Схема наложения ЭП: 1 – электронный переключатель импульсов, 2 – электроды (8 шт.), 3 – сопло диффузионной горелки, 4 – пропан, 5 – регулятор расхода, 6 – компьютер;  
\*показано подключение одной пары электродов, остальные – аналогично

PIV эксперименты проведены с электродами установленными на высоте 12 и 18 мм (расстояние между противоположными из них – 29 мм) и напряжённостью электрического поля 970 и 720 В/см соответственно, частота вращения вектора напряжённости составляла

7 Гц. Спутный воздушный поток засеивался частицами-трассерами  $TiO_2$ , необходимыми для визуализации потока вблизи поверхности пламени.

## Результаты

Характерные картины течения вблизи диффузионного факела пропана без воздействия ЭП и с применением разработанной схемы наложения ЭП представлены на рис. 2, 3 при скорости истечения топлива 0,7 (м/с) и спутного воздуха 0,07 (м/с). Высота расположения электродов на представленных картинах  $h=12$  мм.

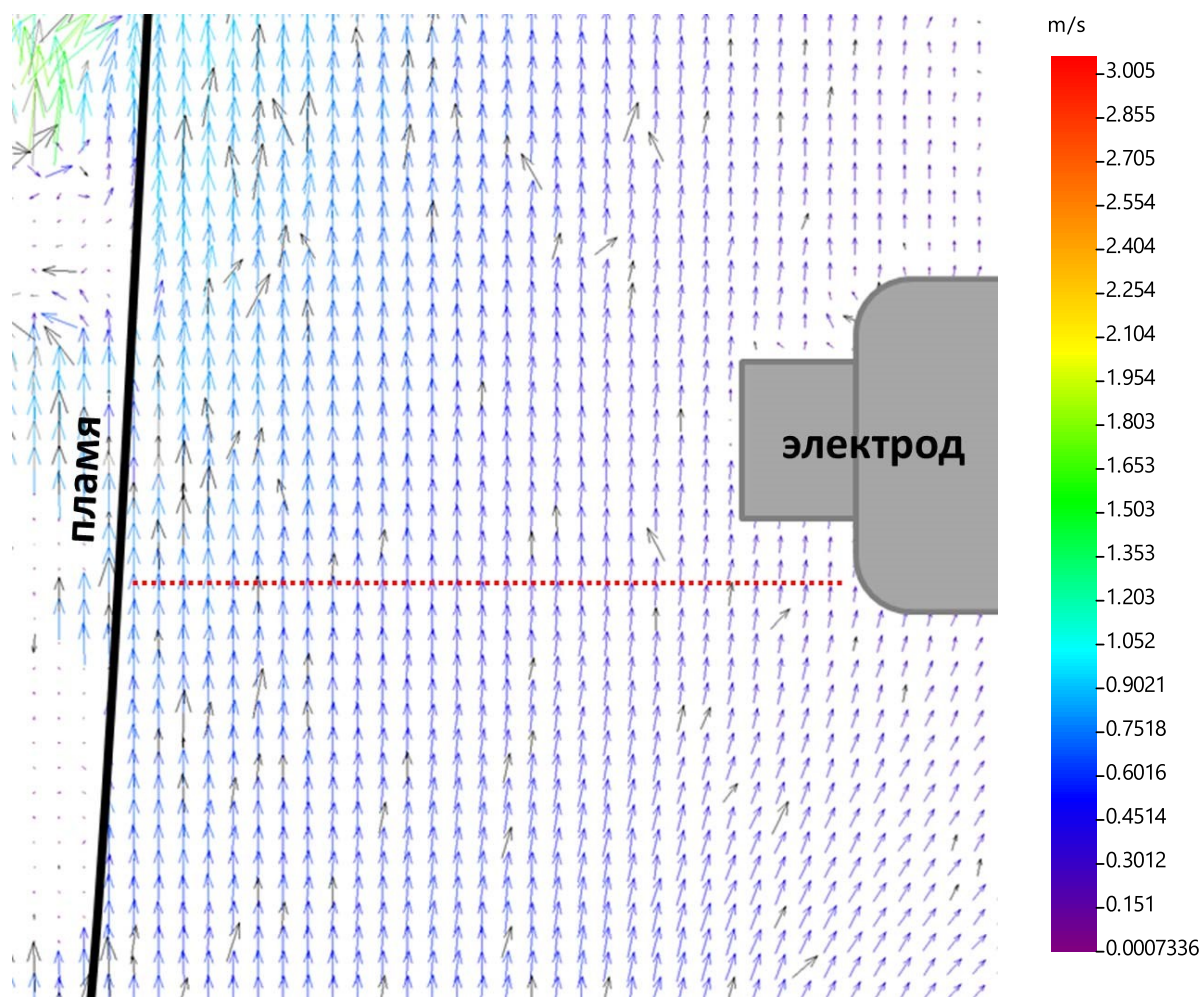


Рис. 2 Мгновенное поле скоростей без воздействия ЭП на диффузионный факел, полученное методом PIV.

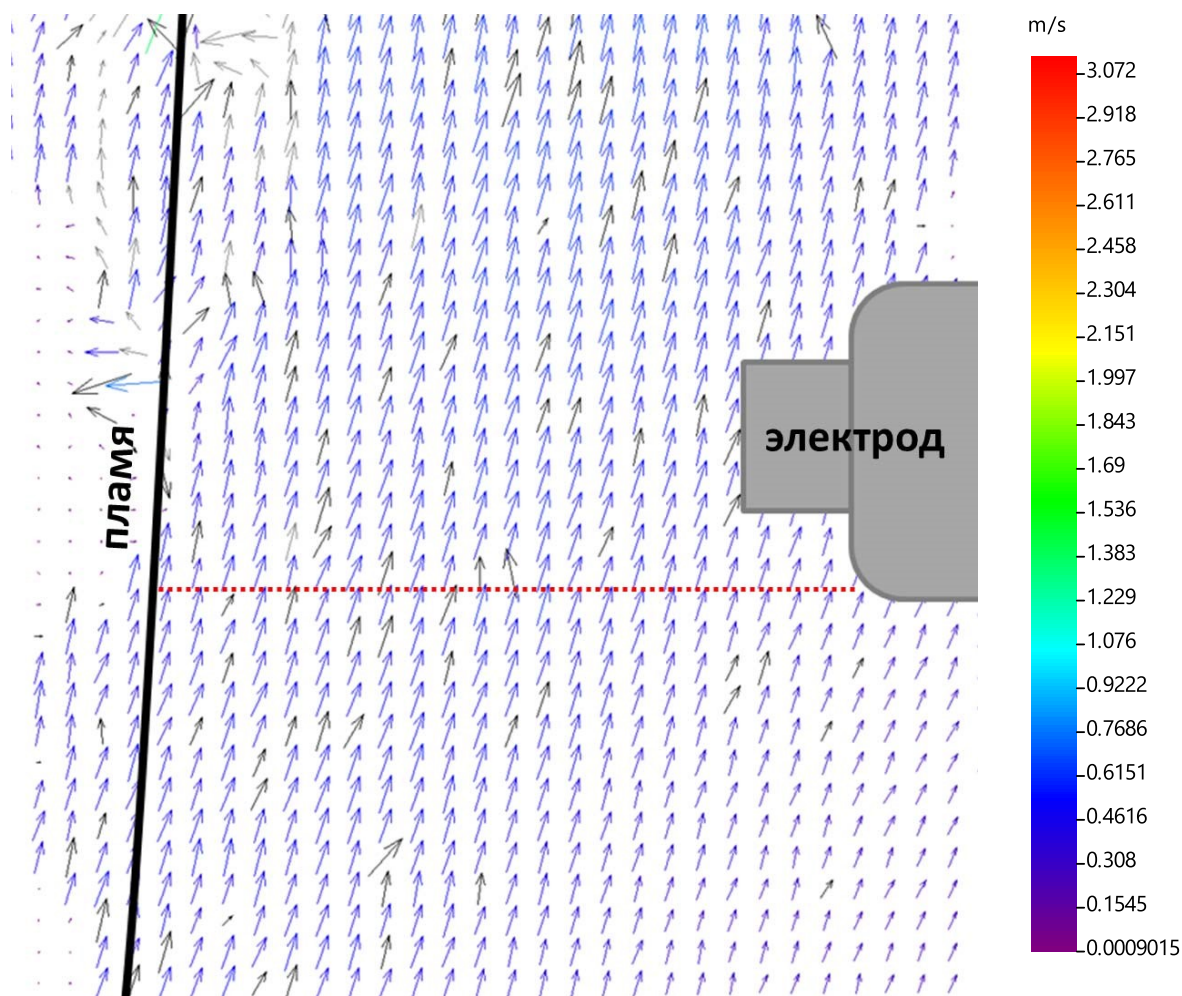


Рис. 3 Мгновенное поле скоростей при воздействии нестационарного ЭП на диффузионный факел, полученное методом PIV.

Выявлены недостатки применяемого метода, связанные с инерцией частиц засева потока (значительные возмущения фронта пламени засеянным спутным потоком). Наименьшая скорость спутного воздушного потока для создания засеянной среды вблизи поверхности пламени составляет  $0,07$  м/с, что приводит к гидродинамическим возмущениям фронта пламени еще до воздействия на него ЭП. Тем не менее, были получены данные, свидетельствующие об увеличении радиальной составляющей скорости вблизи области горения. На рис. 4 представлено изменение радиальной компоненты скорости потока в сечении на высоте  $\approx 10$  мм (красная пунктирная линия на рис. 2, 3) от среза сопла (чуть ниже высоты уровня электродов  $h=12$  мм). Среднее значение  $v_x$  под воздействием нестационарного ЭП увеличилось в 2,8 раза (с  $0,05$  до  $0,14$  м/с).

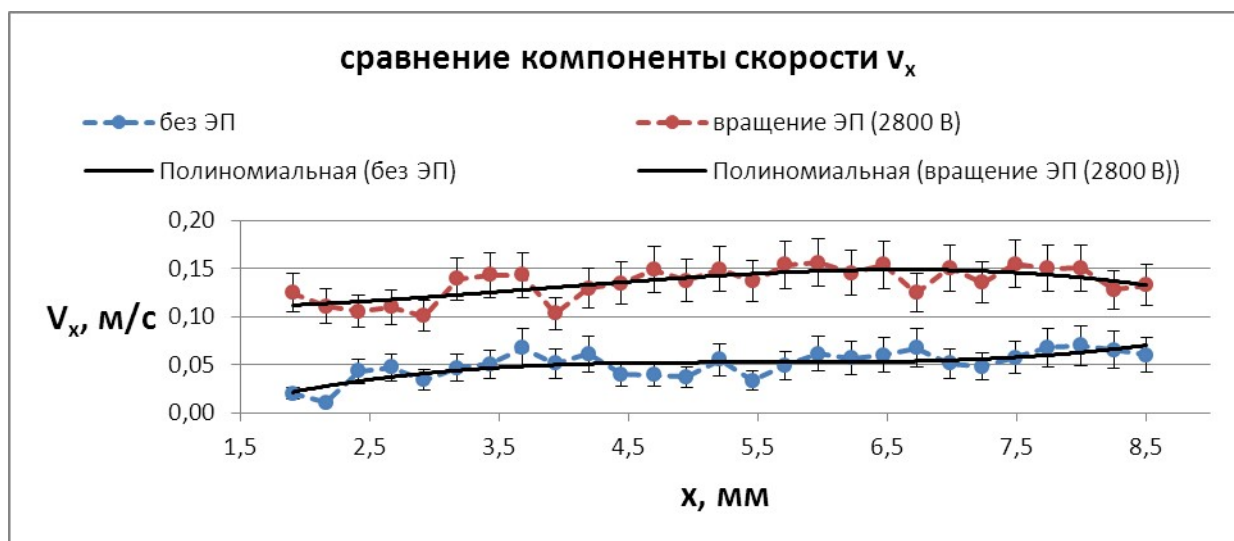


Рис. 4 Зависимость радиальной компоненты скорости потока вблизи поверхности пламени от радиальной координаты, на высоте 10 мм – красная пунктирная линия на рис. 2, 3 (случайная погрешность без ЭП – 29%, в ЭП – 16%)

Для случая, когда электроды расположены на высоте  $h=18$  мм, построена аналогичная зависимость (рис. 5), но в сечении с ординатой  $\approx 15$  мм. Здесь также наблюдается рост компоненты  $v_x$  в 2,8 раза.

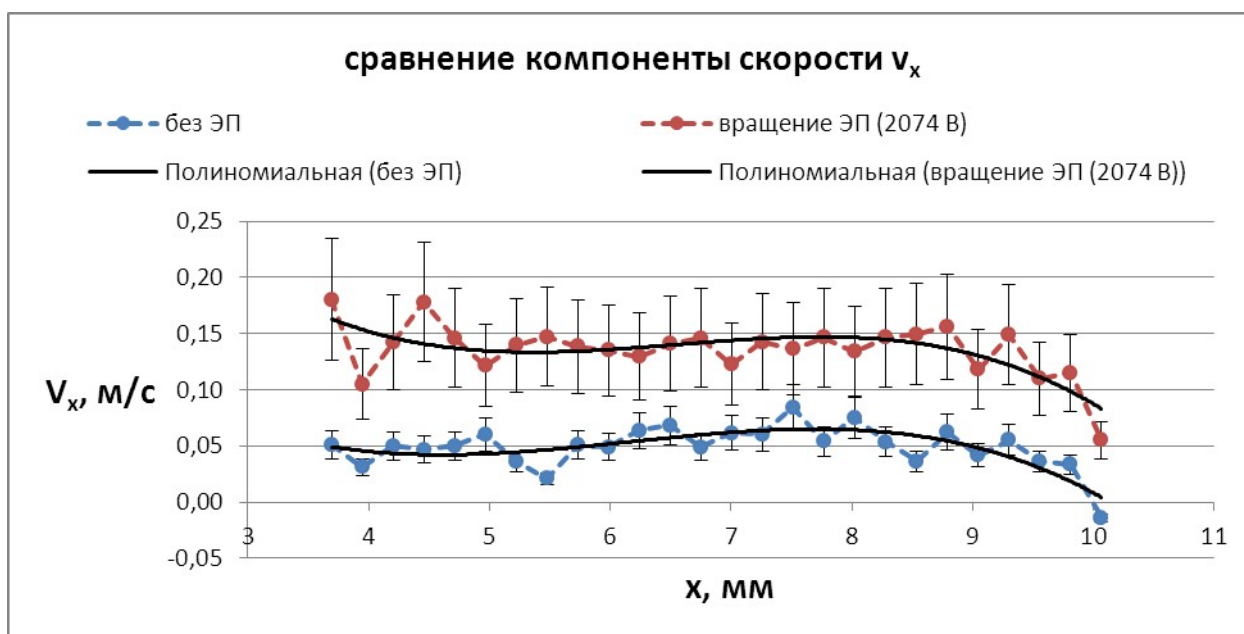


Рис. 5 Зависимость радиальной компоненты скорости потока вблизи поверхности пламени от радиальной координаты, на высоте 15 мм (случайная погрешность без ЭП – 25%, в ЭП – 32%)

Также была проведена спектрозональная регистрация присоединенного диффузионного пламени при различных скоростях истечения пропана в затопленное пространство (от 1,7 м/с до 5,6 м/с). Вращение вектора напряжённости, задаваемое с помощью созданной схемы наложения ЭП (рис. 1), при высоте уровня электродов  $h = 10,5$  мм ведёт к возрастанию максимума в распределении интенсивности излучения радикала  $\text{CH}^*$  на 30% и его смещению к устью горелки на 10-15% от первоначального положения, при этом уменьшается общая протяженность зоны, излучающей на этой длине волны. Аналогичное поведение наблюдается и при рассмотрении излучения  $\text{C}_2^*$  как при  $\lambda = 540$  нм, так и при  $\lambda = 560$  нм.

Сокращение зоны свечения при вращении вектора напряжённости ЭП также замечено на длине волны излучения радикала  $\text{OH}^*$ , максимум интенсивности для которого находится

вблизи от среза сопла и остаётся неизменным. Значение полного интеграла распределения интенсивности излучения радикалов  $\text{CH}^*$ ,  $\text{OH}^*$  и  $\text{C}_2^*$  сохраняется при воздействии ЭП.

Следует отметить тот факт, что при использовании той же самой схемы наложения ЭП, но с большим значением высоты уровня электродов над срезом сопла ( $h = 17$  мм), возрастает максимум интенсивности излучения, однако не наблюдается его смещения к устью сопла (для  $\text{CH}^*$ ) и не уменьшается общая протяжённость излучающей зоны (не сохраняется полный интеграл распределения интенсивности излучения), как при  $h = 10,5$  мм. Кроме того, согласно авторам статьи [4] Orain и Hardalupas, при горении пропана распределение интенсивности излучения радикала  $\text{CH}^*$  пропорционально скорости тепловыделения, интеграл от которой даёт изменение полноты сгорания по длине факела.

## ВЫВОДЫ

Методом спектрозональной регистрации проведено исследование присоединённого диффузионного пламени пропана в затопленном пространстве под воздействием нестационарного ЭП. Смещение положения максимумов для различных длин волн в распределении интегральной интенсивности собственного излучения пламени и изменение полного интеграла интенсивности свидетельствуют о влиянии ЭП на процессы смешения, об их интенсификации в сравнении с режимом без воздействия ЭП.

Выявлены недостатки метода PIV, связанные с инерцией частиц засева потока. Данные, полученные методом PIV, свидетельствуют об увеличении радиальной составляющей скорости потока почти в 3 раза вблизи области горения в случае воздействия на пламя нестационарного ЭП заданной конфигурации, что подтверждает возможность улучшения процесса смешения, интенсификации горения.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$h$  – высота уровня электродов, мм;

$x$  – радиальная координата, мм;

$v_x$  – радиальная компонента скорости потока вблизи пламени, м/с;

$\lambda$  – длина волны излучения, нм;

Сокращения:

ЭП – электрическое поле;

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Столпнер Е.Б., Эстеркин Р.И. Наладка и эксплуатация систем газоснабжения котельных установок. Л.: Гостоптехиздат, 1961. 344 с.
2. Лаутон Д. Электрические аспекты горения / Дж. Лаутон, Ф. Вайнберг; пер. с англ. Н.М. Вентцель, Л.П. Побережского, И.Я. Полонского, под ред. В.А. Попова. М.: Энергия, 1976. 294 с.
3. Козулин В. С. Спектрозональная регистрация диффузионного пламени пропана во внешнем нестационарном электрическом поле: тезисы докладов 13-й Международной научно-технической конференции Оптические методы исследования потоков (ОМИП-2015) / В. С. Козулин, П. К. Третьяков, А. В. Тупикин. М.: 29 июня – 3 июля 2015 г. С. 386-394.
4. Orain M. Effect of fuel type on equivalence ratio measurements using chemiluminescence in premixed flames / M. Orain, Y. Hardalupas // Comptes Rendus Mécanique. 2010. Vol.338, №5. P.241-254. ISSN 1631-0721.

V.S. Venediktov<sup>1</sup>, V.V. Zamashchikov, A.V. Tupikin, P.K. Tretyakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, Institutskaya st., 4/1, E-mail: tupikin@itam.nsc.ru*

## **PIV METHOD APPLICATION FOR STUDY OF THE EFFECT OF A NON-STATIONARY ELECTRIC FIELD ON DIFFUSION COMBUSTION OF GASEOUS HYDROCARBONS**

*The imposition of an external electric field (EF) on the flame is considered as one of the most promising methods for solving problems of optimization of burning of fossil fuels that are relevant in the modern world.*

*The paper presents the results of an investigation of the non-stationary effect of a weak EF on diffusion combustion of hydrocarbons by optical diagnostic methods that do not introduce perturbations into the structure of the object under study. In addition to direct photo and video recording, spectrozonal registration of the own flame radiation, PIV method was used to study the effect of EF on a diffusion flame in a co-flow air.*

*Data are obtained (PIV), indicating the possibility of improving the mixing process, intensification of combustion in the case of the EF pre-set spatial-temporal configuration impact on a flame.*

DIFFUSION COMBUSTION, ELECTRIC FIELD, PIV, INTENSIFICATION OF COMBUSTION