

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН)

*Венедиктов Владимир Сергеевич*

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах подготовленной научно—квалификационной работы  
(диссертации)

*«Исследование воздействия нестационарного электрического поля на  
диффузионное горение газообразных углеводородов»*

Направление подготовки:

01.06.01 — Математика и механика

Направленность подготовки: 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Научный руководитель  
*доктор технических наук,  
главный научный сотрудник  
Третьяков Павел Константинович*

Новосибирск 2019

**Актуальность исследования.** Удовлетворение потребностей человечества в энергии является причиной возникновения довольно сложной ситуации в мировой энергетике. Необходимость поиска эффективных мер по улучшению процессов сжигания углеводородов в современном мире является неоспоримой ввиду неизбежной проблемы дефицита исчерпаемых и невозобновляемых топливно-энергетических ресурсов в совокупности с широким применением различных видов сжигания газообразных углеводородов (в транспорте, металлургии и др. отраслях промышленности). Наряду с этим, остро ставится вопрос угрозы окружающей среде из-за техногенного воздействия объектов энергетики, так как значительная доля техногенных выбросов парниковых газов в атмосферу приходится на различные энергетические объекты (например, факельное сжигание попутного нефтяного газа).

Одним из главных способов решения этой проблемы является энергосбережение и повышение энергоэффективности в различных областях мировой энергетики [1].

Особое место в традиционной энергетике занимает органическое топливо. Доля его в общемировом объеме первичной энергии на 2015 г. составила 81% (рис. 1, по данным статистического обзора Международного энергетического агентства International Energy Agency (IEA)) и согласно имеющимся прогнозам будет оставаться основным источником первичной энергии еще долгое время.

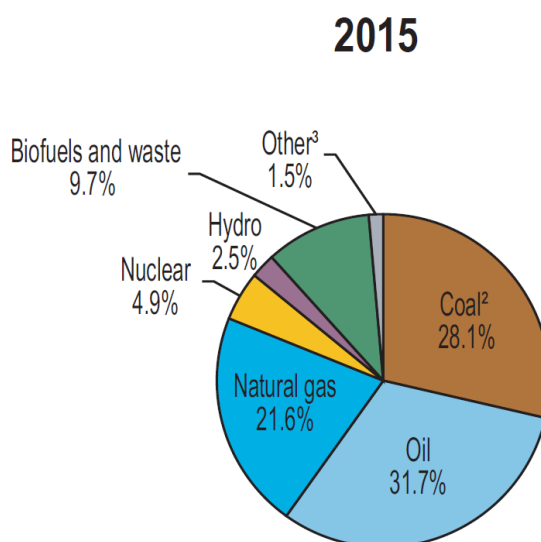


Рис. 1 Мировой объем первичной энергии на 2015 г.

Во многих отраслях промышленности, а также в транспорте распространено диффузионное сжигание различных газообразных углеводородов. Таким образом, имеет место актуальность задач, связанных с оптимизацией процессов горения топлива и повышением КПД энергетических агрегатов, совершенствованием уже известных и созданием новых методов, позволяющих улучшить процессы сжигания, снизить уровень вредных выбросов в окружающую среду.

Давно известен факт, что пламя обладает электрическими свойствами (экспериментальные наблюдения Уильяма Гильберта в XVI в.). Таким образом, наряду с такими методами, как воздействие акустических колебаний, применение катализаторов, газодинамическое воздействие (закручивание пламени потоком), применение внешнего электрического поля является перспективным способом воздействия на пламя с целью улучшения процесса сжигания. Электрическое поле может оказаться вполне эффективным средством решения проблем, касающихся широко применяемого сжигания углеводородных топлив со всеми вытекающими последствиями.

Исследованиями по теме воздействия электрических полей на пламя занимались и занимаются как отечественные (С.А. Абриков, С.И. Ксенофонов, Н.А. Исаев, А. Ватажин, А.Э. Малиновский, Н.Н. Семенов, Е.М. Степанов, Б.Г. Дьячков и др.), так и зарубежные авторы (H.F. Calcote, R.N. Pease, J. Lawton, F. Weinberg, I. Barmina, R. Valdmanis, M. Zake, C.H. Berman, H.C. Jagers, M.K. Kim и др.). Среди опубликованных работ есть те, в которых рассматривается как влияние электрического поля на пламя в зависимости от геометрии электродов, так и воздействие конкретной конфигурации электрического поля на определенные характеристики процесса сжигания. Следует отметить, что интерес к вопросам управления горением с применением электрических полей не ослабевает.

**Научная новизна.** Среди многочисленных исследований по данной тематике можно выделить некоторые основные аспекты влияния электрического поля на горение: применение электрического поля для стабилизации пламени, для изменения скорости распространения пламени, снижения количества

образующихся вредных выбросов. Многими авторами рассмотрено влияние постоянных, переменных и импульсно-периодических электрических полей различной напряжённости и частоты на горение углеводородов, однако, отсутствуют публикации, в которых было бы рассмотрено и описано воздействие переменной пространственной конфигурации электрического поля (с изменением пространственного распределения напряженности поля) на горение.

Ожидаемые результаты будут качественно новыми, т.к. влияние электрических полей на горение в такой постановке не рассматривалось ранее. При этом решение подобных задач представляет как научный, так и практический интерес.

**Целью** данной работы является экспериментальное исследование влияния вращения вектора напряженности электрического поля на диффузионное горение газообразных углеводородов.

**Задачи:**

- Разработать электрическую схему для нестационарного воздействия на диффузионный факел газообразных углеводородов;
- Исследовать воздействие слабого электрического поля переменной пространственной конфигурации как на присоединённый, так и на поднятый факел газообразных углеводородов;
- Отработать методику исследования диффузионного пламени и в целом процесса сгорания путем спектрозональной регистрации пламени;
- Разработать прототип горелочного устройства, оснащенного разработанной электрической схемой воздействия на пламя.

**Степень разработанности темы исследования.** Все поставленные задачи выполнены. Полученные экспериментальные результаты в совокупности с проведенным литературным обзором позволяют получить целостную картину исследуемого явления, дополняя и подтверждая друг друга.

**Объект исследования** – диффузионный факел газообразных углеводородов (бытового пропана, метана).

## **Содержание работы**

### **Введение**

Необходимость в улучшении процессов сжигания углеводородных топлив в настоящее время в мире обусловлена дефицитом топливно-энергетических ресурсов, являющихся исчерпаемыми и невозобновляемыми.

Многие отрасли промышленности применяют сжигание углеводородного топлива в режиме диффузионного факельного горения, которое может иметь вид, как присоединённого пламени, так и поднятого, в зависимости от локализации зоны устойчивого горения.

Обусловленная хемоионизацией повышенная концентрация заряженных частиц ( $10^9$ - $10^{12}$  см<sup>-3</sup>) в пламенах углеводородов [2] предоставляет возможность воздействовать на них внешним электрическим полем с целью повышения эффективности процесса сжигания.

### **Схема эксперимента**

В данной работе проведено исследование воздействия слабого нестационарного электрического поля на присоединённый (при числах Рейнольдса  $Re \approx 400 \div 1300$ ) и поднятый ( $Re \approx 1100 \div 6500$ ) диффузионный факел (рис. 1) газообразных углеводородных топлив (бытовой пропан и метан). Также для исследования возможности практического приложения полученных результатов спроектирована и изготовлена модель горелочного устройства, прототипом которой стала дутьевая горелка ДВМ типа «труба в трубе» («Стальпроект» [2]). В разработанной модели горелочного устройства задействована электрическая схема нестационарного воздействия на пламя. Используется наложение электрического поля поперёк факела, нестационарность воздействия обеспечивается вращением вектора напряжённости относительно оси топливной струи.

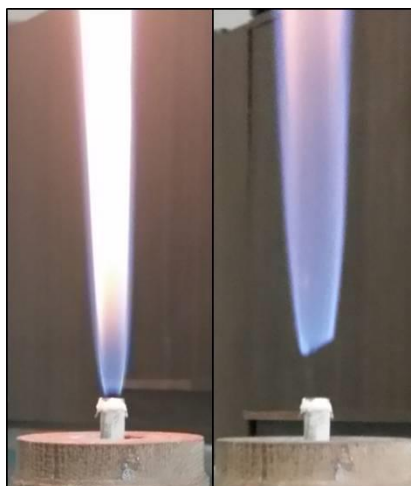


Рис. 1 присоединённое (слева) и поднятое (справа) диффузионное пламя метана

Для режима нестационарного электрического воздействия на пламя разработана и создана схема, состоящая из 8 электродов (тонкие стержни диаметром 1 мм) вокруг сопла, расположенных равноудаленно. Напряжение прикладывается на противоположные электроды попарно и переключается по кругу электронным коммутатором (разработанным для данных исследований), обеспечивающим вращение вектора напряжённости относительно оси топливной струи (рис. 2).

Методы оптической диагностики пламени позволяют проводить исследования, не нарушая тепловой, электрической, гидродинамической и химической структуры факела, поэтому предпочтение отдается использованию именно таких методов.

Помимо обычной фото- и видео регистрации пламени с помощью камер Nikon D5100 и высокоскоростной камеры LaVision High Speed Star 3, в работе применялась спектрозональная съёмка свечения пламени на длинах волн возбуждённых радикалов  $\text{CH}^*$  и  $\text{OH}^*$  камерой LaVision Imager intense CCD с усилителем изображения Intensified Relay Optics (LaVision), чувствительным к излучению в видимом и УФ диапазонах длин волн. Спектрозональные изображения получены с помощью интерференционных фильтров ( $\text{CH}^*$  (430 нм) и  $\text{OH}^*$  (307 нм)), применяемых совместно с камерой Imager intense CCD.

Обработка полученных снимков проводилась специализированным программным обеспечением – программой DaVis (LaVision).

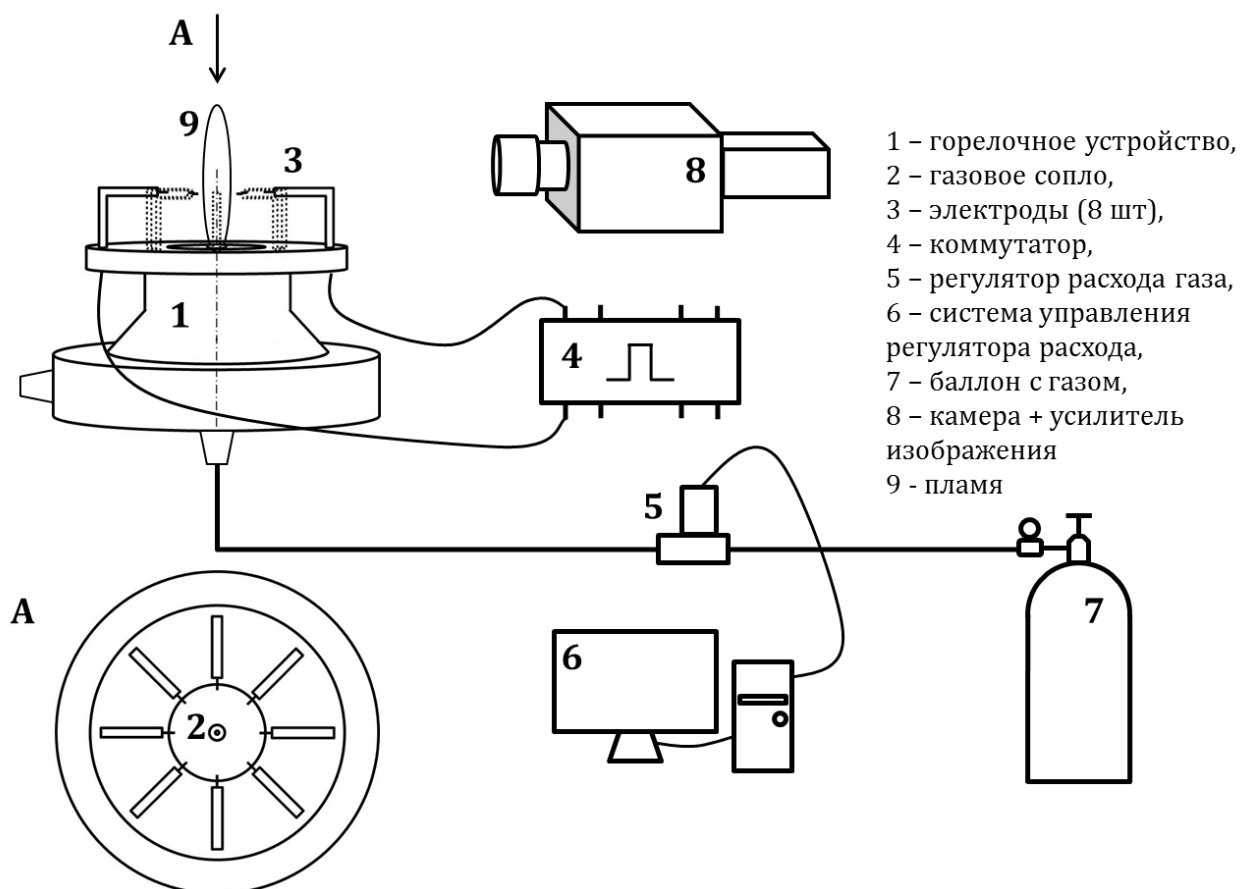


Рис. 2 Схема эксперимента (\*представлена одна пара электродов, остальные подключаются аналогично)

### Результаты

В режиме диффузионного факельного горения бытового пропана ( $d_{\text{сопла}}=1$  мм) и метана ( $d_{\text{сопла}}=1.5$  мм и 2 мм) экспериментально найдены пределы скорости истечения газа для существования поднятого факела (табл. 1). Определен минимальный диаметр сопла для режима поднятого пламени метана, который составляет 1.5 мм (при  $p=1$  атм.,  $T=25^\circ\text{C}$ ).

Таблица 1. Скоростные пределы существования поднятого пламени

	пропан (бытовой) $d_{\text{nozzle}}=1$ м м	метан $d_{\text{nozzle}}=1.5$ мм	метан $d_{\text{nozzle}}=2$ мм
Минимальная скорость истечения, м/с (присоединение к соплу)	$10 \pm 1$ ( $Re \approx 2200$ )	$13 \pm 1$ ( $Re \approx 1100$ )	$12.7 \pm 0.7$ ( $Re \approx 1400$ )

Максимальная скорость истечения, м/с (срыв пламени)	29±1 (Re≈6400)	27±1 (Re≈2200)	34.1±0.8 (Re≈3800)
--	-------------------	-------------------	-----------------------

В случае поднятого диффузионного пламени газообразных углеводородов увеличение скорости истечения горючего ведет к росту высоты поднятия факела – происходит смещение зоны стабилизации пламени (точек поджога) вверх. В результате последующий рост скорости истечения горючего приводит к срыву пламени (и, естественно, его затуханию).

В экспериментах с поднятым диффузионным факелом пропана и метана установлено, что под влиянием нестационарного электрического поля, подключаемого по разработанной схеме ( $E=1000$  В/см, частота вращения  $E$ :  $f=7$  Гц), точки поджога пламени смещаются к горизонтальной плоскости электродов и фиксируются в этой области (или чуть выше неё - при повышенном расходе топлива и скорости истечения газа  $u>20$  м/с) в течение периода воздействия (рис. 3).

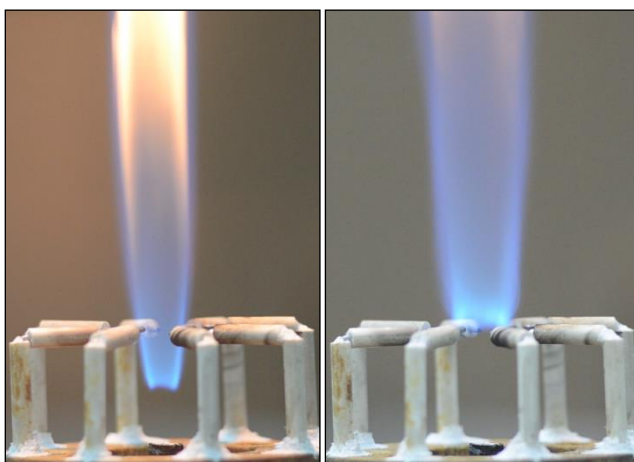


Рис. 3 Стабилизация поднятого диффузионного пламени пропана в электрическом поле

На рис. 3 заметно расширение основания факела, свидетельствующее об интенсификации процессов смешения и увеличении эффективной поверхности горения, приводящих к интенсификации горения, что подтверждено также результатами спектрозональной регистрации – в электрическом поле происходит рост интенсивности излучения возбуждённых радикалов  $CH^*$  и  $OH^*$  [4].



Для диффузионных пламен газов для безразмерной высоты от кромки сопла до координаты стабилизации существует функциональная связь:

$$\frac{H}{d} = f\left(\frac{\rho_T}{\rho_0}, H_0\right),$$

где  $\rho_T$  – плотность топлива,  $\rho_0$  – плотность окислителя, а  $H_0$  – критерий гомохронности равный отношению характерных времен горения и течения  $H_0 = \frac{u_0 \tau_{гор}}{d} = \frac{\tau_{гор}}{\tau_{теч}}$  [5].

На рис. 4 показана зависимость безразмерной высоты поднятия пламени метана от критерия гомохронности под воздействием электрического поля и без него, полученная экспериментально.

На графике наблюдается горизонтальный участок, свидетельствующий о стабилизации факела в плоскости электродов (или вблизи нее) под воздействием нестационарного электрического поля. Для поднятого пламени метана диапазон скорости истечения газа, в котором имеет место значительный эффект стабилизации, составляет  $\approx 24\%$  от полного скоростного диапазона режима поднятого факела. В случае пламени бытового пропана этот показатель составляет  $\approx 63\%$ .

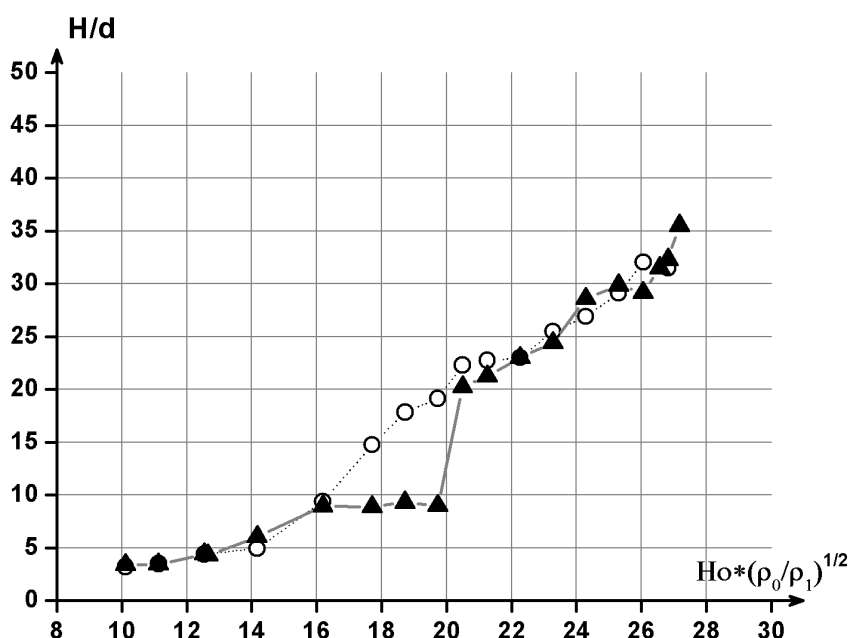


Рис. 4 Зависимость безразмерной высоты подъема пламени от критерия гомохронности  $Ho$  и отношения плотностей топлива ( $\rho_0$ ) и окислителя ( $\rho_1$ ): где  $\circ$  - в отсутствие электрического поля,  $\blacktriangle$  - под воздействием электрического поля ( $d_{nozzle}=2$  mm)

Установлено, что при данном электрическом воздействии на пламя можно увеличить расход топлива выше максимально возможного для существования поднятого факела, при котором в отсутствие внешнего электрического поля происходит срыв пламени.

Для пропана проведено сравнение с экспериментальными данными, полученными В. К. Баевым и В. А. Ясаковым [5] (рис. 5). Отличия, наблюдаемые на графике, возможно, связаны с различным составом горючего и выбором характерного времени горения. В целом же, критериальная зависимость схожа.

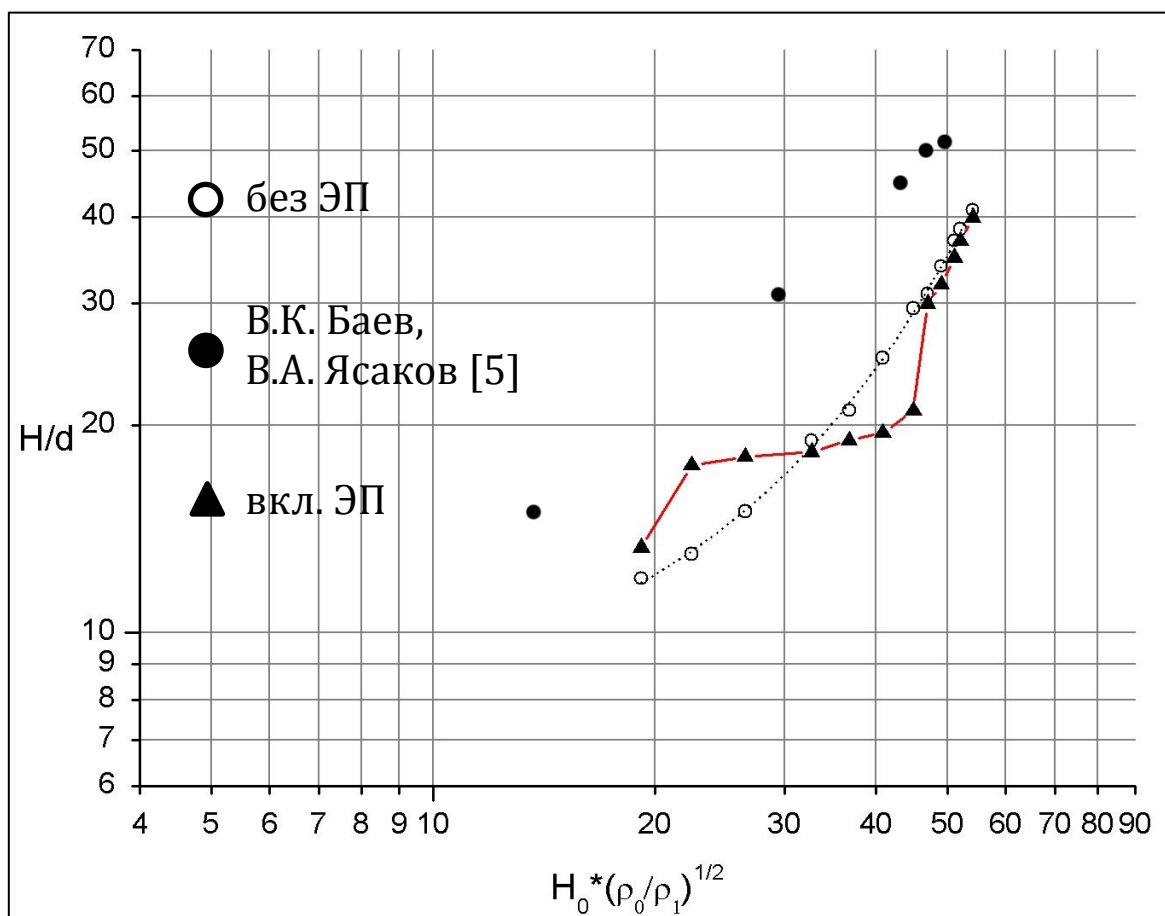


Рис. 5 Зависимость безразмерной высоты подъёма пламени пропана от критерия гомохронности  $H_0$  и отношения плотностей топлива ( $\rho_0$ ) и окислителя ( $\rho_1$ )

В результате обработки мгновенных фотоснимков поднятого диффузионного пламени метана (при  $d_{\text{сопла}}=3$  мм), полученных с помощью высокоскоростной камеры High Speed Star 3, определена средняя амплитуда колебаний точек поджога, составляющая 1.5 мм (1% от средней высоты отрыва) при  $Re=3480$ . Под воздействие нестационарного электрического поля ( $E=860$  В/см) на пламя происходит двукратное уменьшение амплитуды колебаний точек поджога. В

результате Фурье-анализа значений высот отрыва поднятого пламени метана (при  $Re=3480$ ) под влиянием нестационарного электрического поля и без него определена характерная частота колебаний корневой зоны факела равная 3-4 Гц. В электрическом поле из-за его стабилизирующего эффекта периодические колебания точек поджога не наблюдаются (рис. 6).

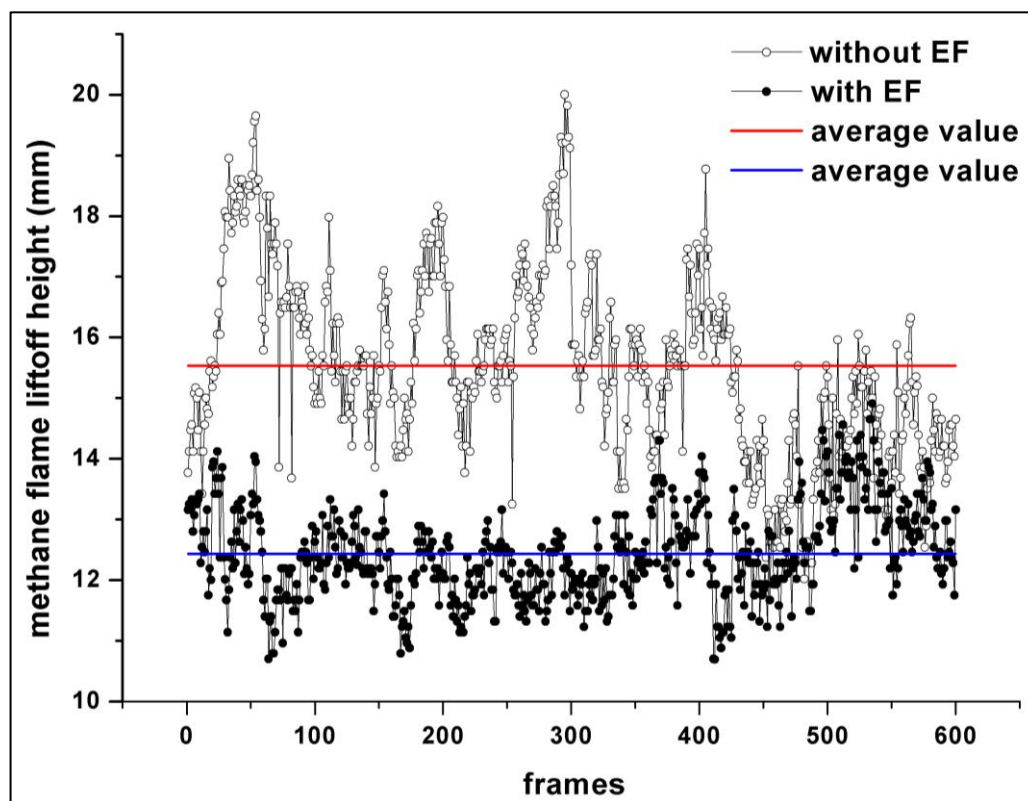


Рис. 6 Зависимость высоты поднятия пламени метан от времени (600 кадров за  $t = 1.2$  с.)

С применением камеры Imager Intense CCD и интерференционных фильтров была проведена спектрозональная съемка собственного излучения пламени на длинах волн возбужденных радикалов  $CH^*$  и  $OH^*$ . Полученные снимки изображены на рис. 7.

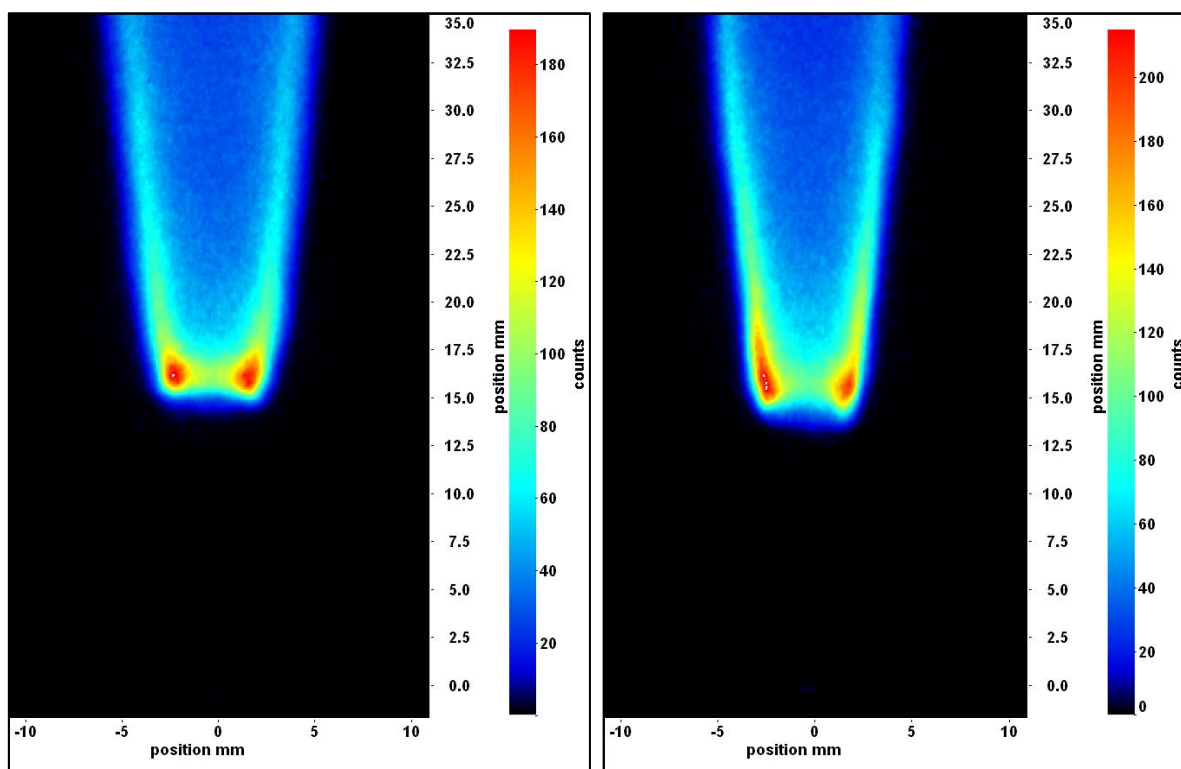


Рис. 7 Интегральное излучение радикалов  $\text{OH}^*$  (слева) и  $\text{CH}^*$  (справа) в поднятом пламени (скорость истечения пропана 13 м/с)

Анализ полученных данных показал, что под воздействием электрического поля с вращением вектора напряженности происходит рост интенсивности излучения возбуждённых радикалов  $\text{CH}^*$  и  $\text{OH}^*$ . Результаты спектрозональной регистрации указывают на интенсификацию процесса горения в электрическом поле, так как для пламени пропана интенсивность излучения радикала  $\text{CH}^*$  (рис. 8) пропорциональна скорости тепловыделения, интеграл которой дает информацию об изменении полноты сгорания по высоте факела.

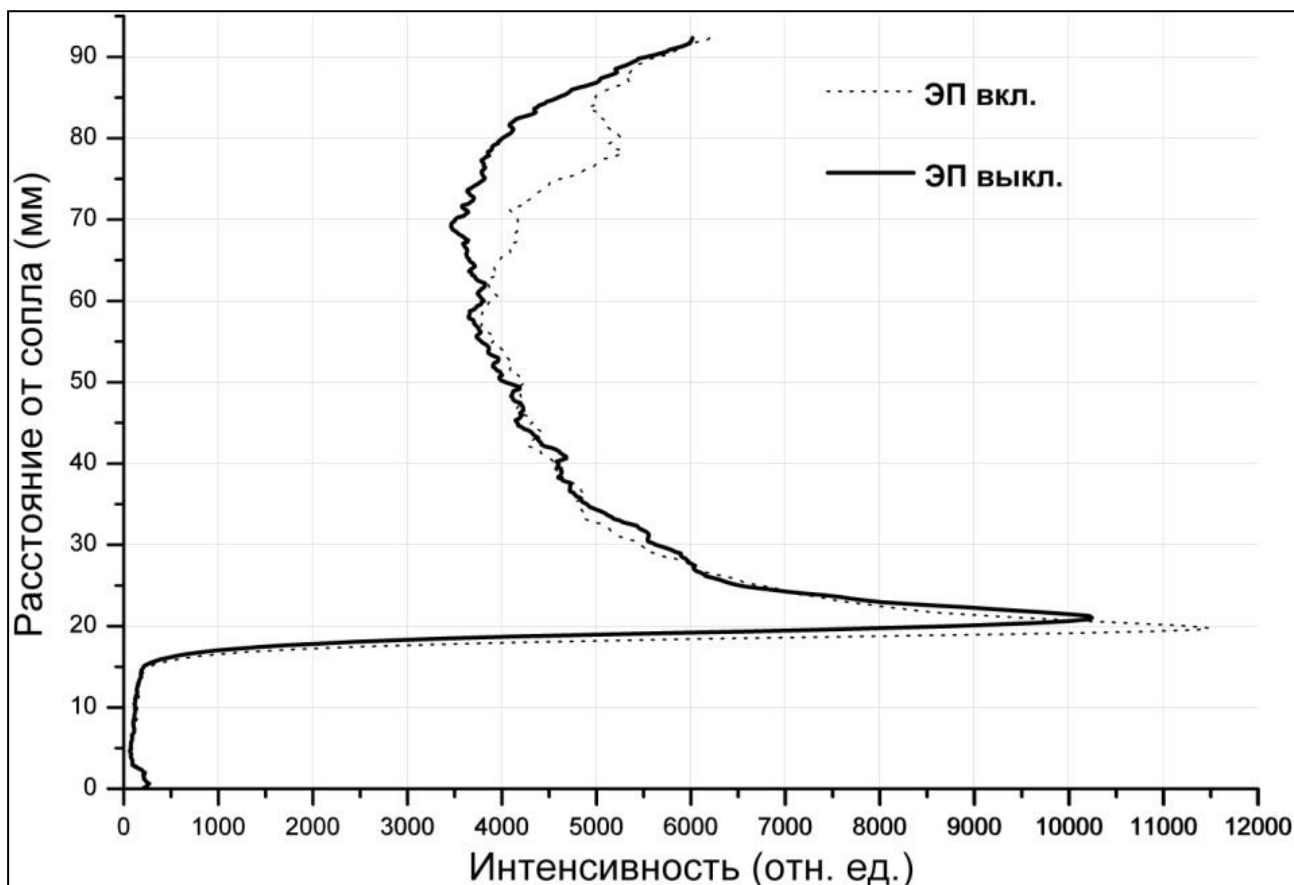


Рис. 8 Распределение интенсивности излучения радикала  $\text{CH}^*$  по высоте поднятого пламени пропана (скорость истечения пропана 18 м/с, ЭП – электрическое поле)

Подобное изменение наблюдается также и в случае присоединённого пламени пропана (рис. 9): при включении электрического поля также возрастает интенсивность излучения радикалов  $\text{OH}^*$  и  $\text{CH}^*$ , однако не наблюдается смещения положения максимумов, в отличие от результата экспериментов, проведённых нами ранее, когда электроды устанавливались на высоте  $h = 10.5$  мм от среза сопла (рис. 10). Это подтверждает тот факт (установленный Калькотом [6]), что максимум ионизации диффузионного пламени углеводородов расположен в основании факела.

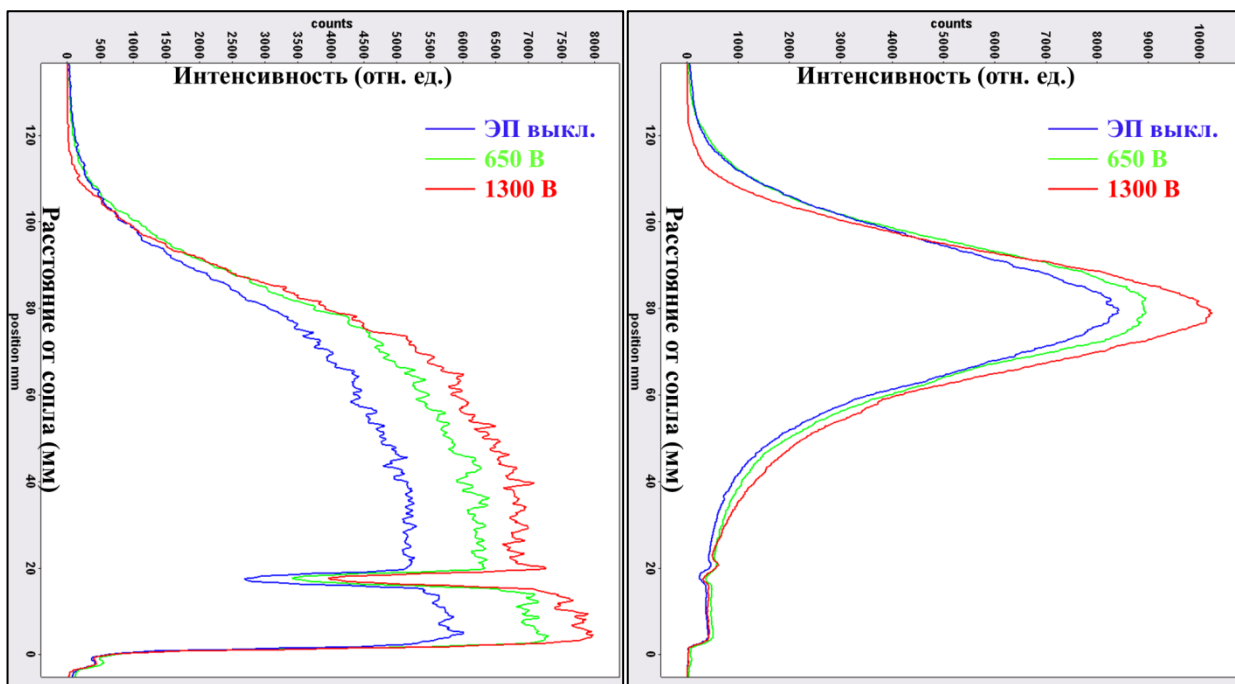


Рис. 9 Распределение интенсивности излучения радикалов (а)  $\text{OH}^*$  и (б)  $\text{CH}^*$  по высоте факела (присоединённое пламя пропана)

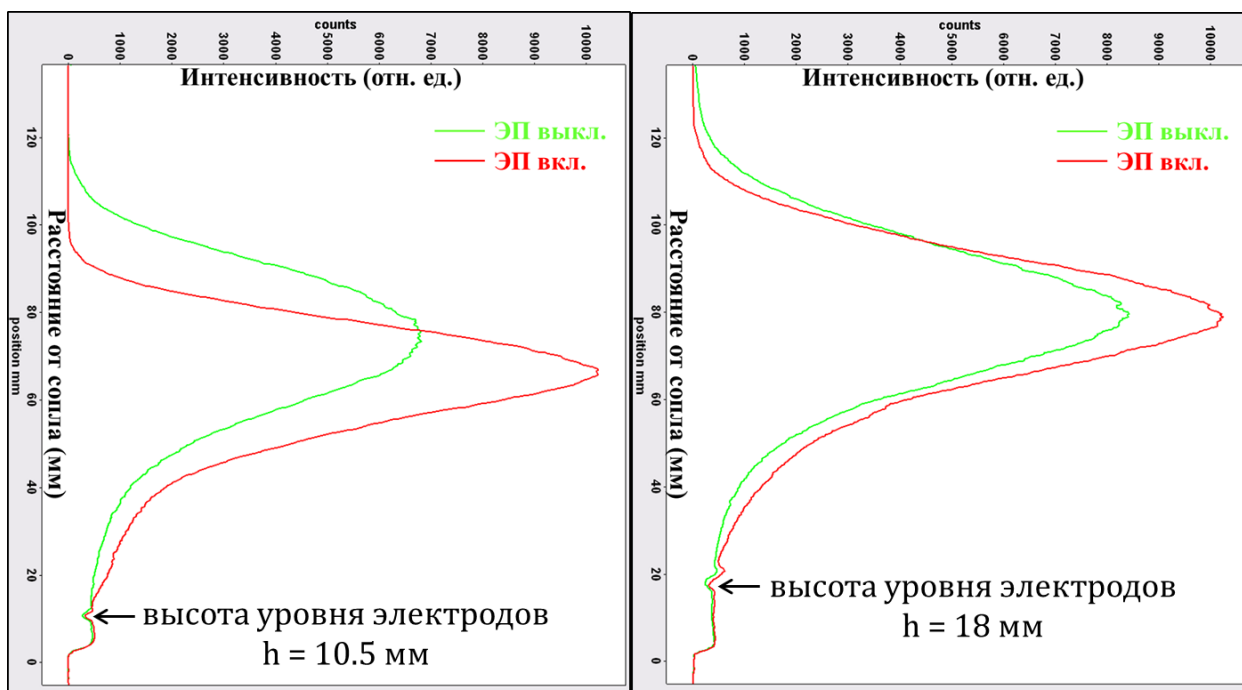


Рис. 10 Распределение интенсивности излучения  $\text{CH}^*$  по высоте факела (присоединённое пламя пропана,  $U = 1300 \text{ В}$ )

В работы проведена апробация метода PIV для исследования воздействия нестационарного электрического поля на присоединённое диффузионное пламя пропана в спутном потоке воздуха. Внутренний диаметр топливного сопла был 1.5 мм, диаметр сопла для подачи воздуха 20 мм. Были проведены эксперименты

с электродами на высоте 12 и 18 мм (расстояние между противоположными - 29 мм) и напряжённостью ЭП 970 и 720 В/см соответственно, частота вращения вектора напряжённости была 7 Гц. Спутный воздушный поток засеивался частицами-трассерами  $TiO_2$ , необходимыми для визуализации потока вблизи поверхности пламени. Картины течения, характерные для скорости истечения топлива 0.7 (м/с) и спутного воздуха 0.07 (м/с) представлены на рис. 11.

Были выявлены недостатки применяемого метода, связанные с инерцией частиц засева потока (значительные возмущения фронта пламени засеянным спутным потоком). Наименьшая скорость спутного воздушного потока для создания необходимой 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, показывающие увеличение радиальной составляющей скорости возле поверхности горения в 2.8 раза, что продемонстрировано на следующих графиках (рис. 12, 13).

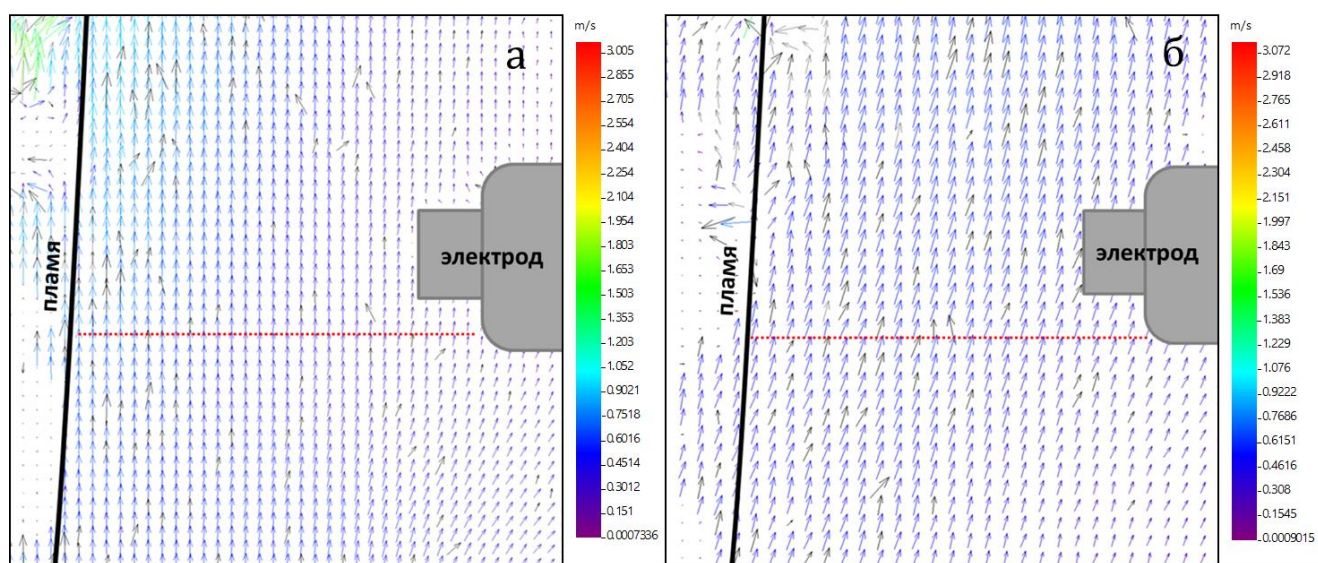


Рис. 11 Мгновенное поле скоростей, полученное методом PIV, (а) без воздействия ЭП и (б) при нестационарном воздействии ЭП на присоединённый диффузионный факел пропана в спутном потоке воздуха (высота электродов 12 мм)

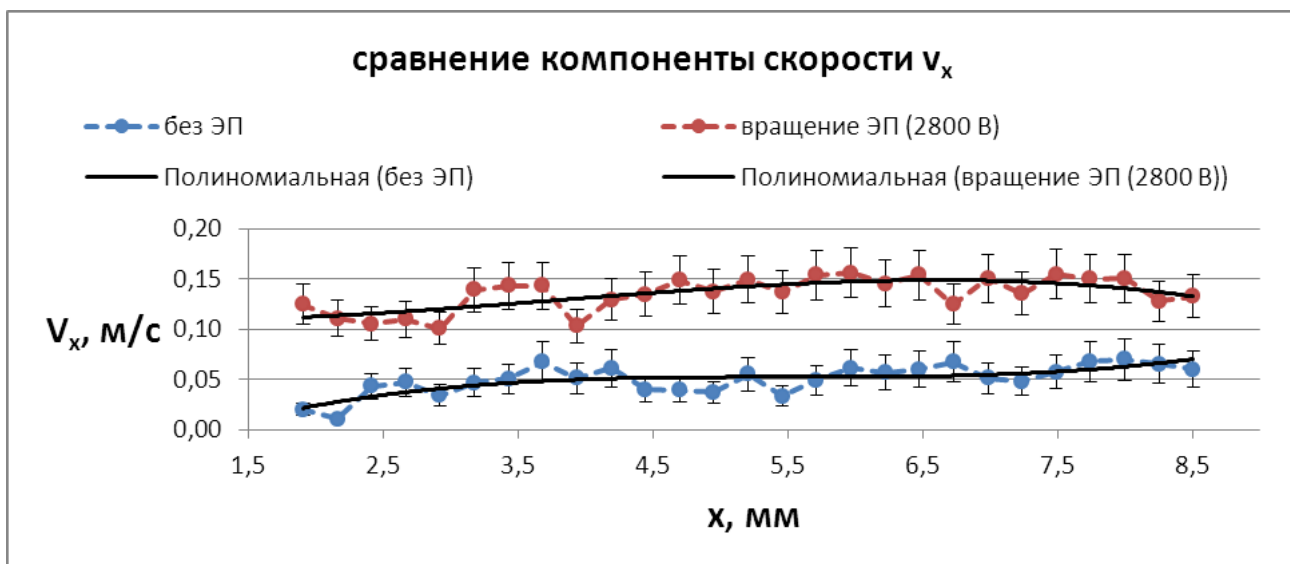


Рис. 12 Зависимость радиальной компоненты скорости потока у поверхности пламени от радиальной координаты на высоте 10 мм – красная пунктирная линия на рис. 11 (высота электродов 12 мм, случайная погрешность без ЭП – 29%, в ЭП – 16%)

На рис. 12 показано распределение радиальной компоненты скорости потока в сечении на высоте  $\approx 10$  мм (красная пунктирная линия на рис. 11) от среза сопла (чуть ниже высоты уровня электродов 12 мм). Среднее значение  $v_x$  под воздействием нестационарного электрического поля увеличилось в 2.8 раза (с 0.05 до 0.14 м/с), что подтверждает возможность улучшения процесса смешения и интенсификации горения.

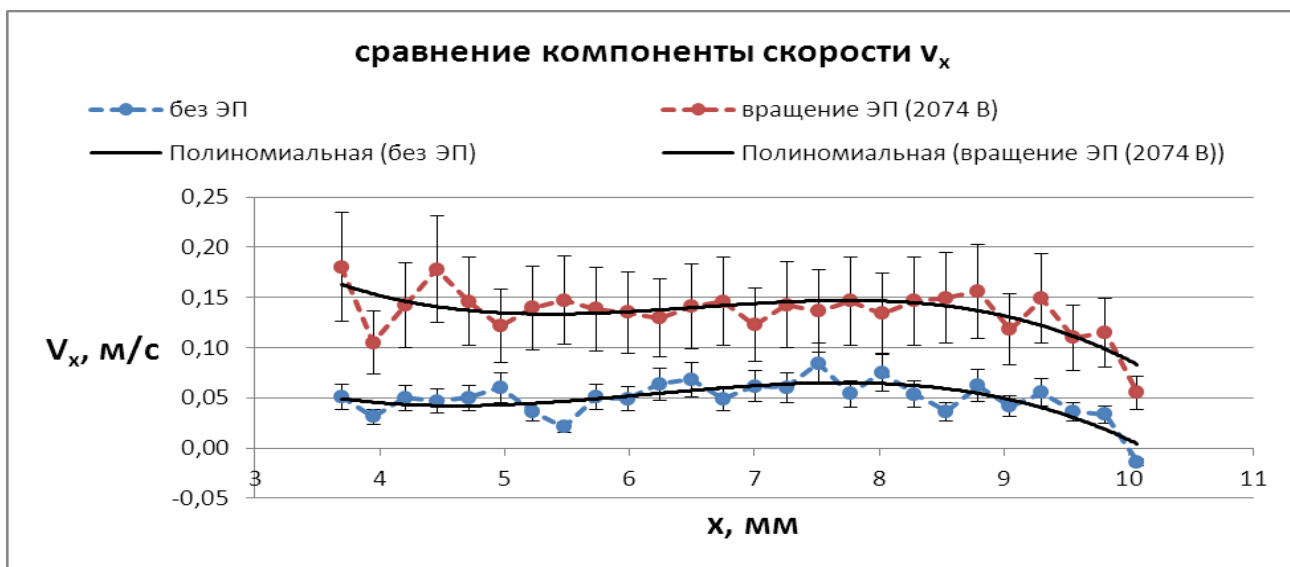


Рис. 13 Зависимость радиальной компоненты скорости потока у поверхности пламени от радиальной координаты на высоте 15 мм (высота электродов 18 мм, случайная погрешность без ЭП – 25%, в ЭП – 32%)



Для практического применения результатов исследований воздействия нестационарного электрического поля на процесс горения проводилась разработка горелочного устройства, оснащённого разработанной электрической схемой (рис. 2). Прототипом была выбрана дутьевая горелка ДВМ [2].

Были определены скоростные пределы устойчивой работы разработанной модели горелки с частичным предварительным смешением с образованием диффузионно-кинетического пламени. Под воздействием электрического поля по разработанной схеме, установлена возможность смены режима стабилизации – поднятое пламя переходит в режим присоединённого к соплу (рис. 14).

Спектрональная съемка свидетельствуют об интенсификации процесса сжигания (как и для диффузионного факела) в нестационарном электрическом поле (с вращением вектора напряжённости, рис. 15). Эффект сильнее при большей напряжённости поля, а изменение частоты вращения вектора напряжённости в рассмотренном диапазоне (от 3.5 до 14 Гц) не оказывает значительного влияния на интенсивность излучения радикалов  $\text{CH}^*$  и  $\text{OH}^*$  и стабилизацию пламени.

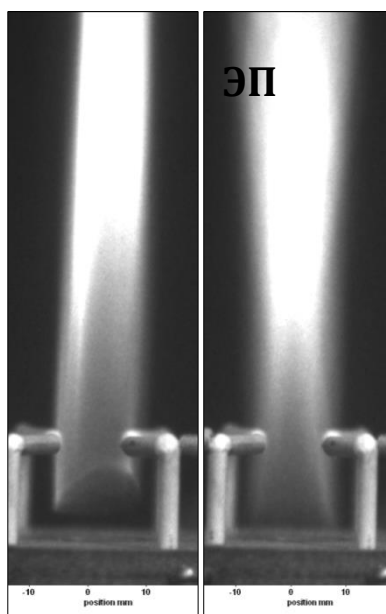


Рис. 14 Стабилизация пламени метана в электрического поля (ЭП, справа).

Расход топлива и воздуха (и скорости истечения):

$$G_{\text{мет.}} = 12 \text{ мл/с (3.8 м/с)} \text{ и } G_{\text{возд.}} = 37.5 \text{ мл/с (0.2 м/с)}$$

(осреднённые снимки по 100 кадрам, при вкл. ЭП:  $E=700 \text{ В/см}$ ,  $f=7 \text{ Гц}$ )

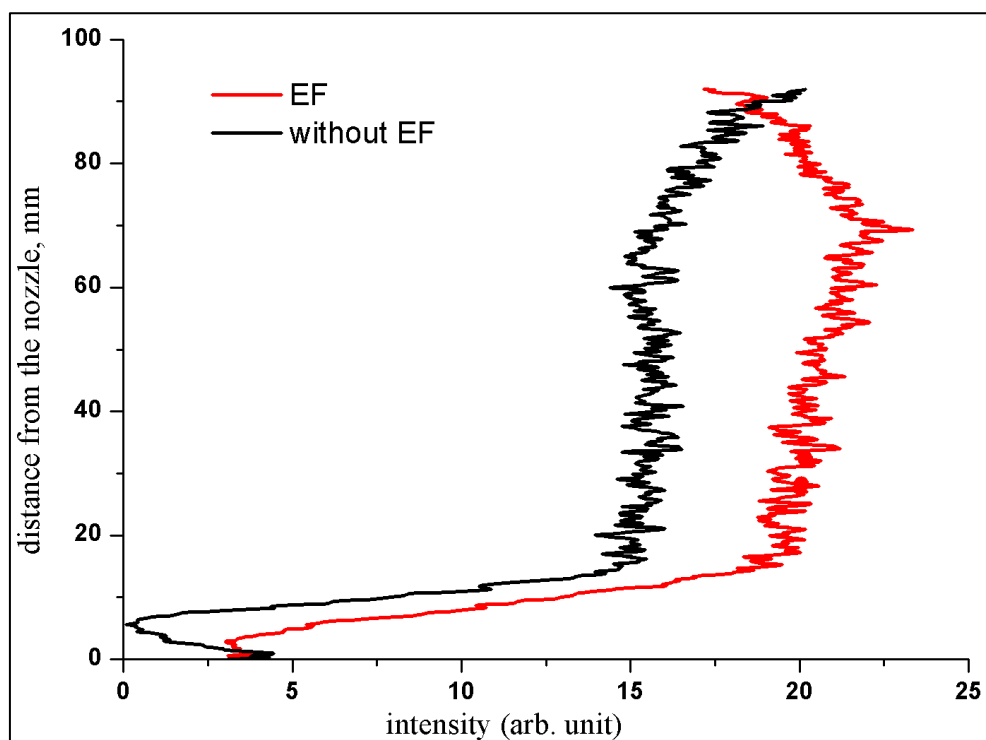


Рис. 15 Интенсивность излучения возбуждённого радикала  $\text{CH}^*$  вдоль высоты факела метана (расходы и соответствующие им скорости истечения:  $G_{\text{мет.}} = 12 \text{ мл/с}$  ( $3.8 \text{ м/с}$ ) и  $G_{\text{возд.}} = 37.5 \text{ мл/с}$  ( $0.2 \text{ м/с}$ ), EF – в электрическом поле)

### Заключение

Разработана схема наложения электрического поля для исследования его нестационарного воздействия на углеводородный факел. Результаты исследования показали, что при включении электрического поля в плоскости электродов происходит интенсификация процесса горения и стабилизация диффузионного факела. Потенциальная возможность практического применения воздействия нестационарного электрического поля при сжигании углеводородов показана на спроектированном и изготовленном модельном горелочном устройстве, прототипом которого послужила дутьевая горелка ДВМ. Для устойчивой работы горелочного устройства определены скоростные пределы, обнаружена возможность смены режима стабилизации и интенсификации процесса горения при включении электрического поля.

## Выводы

- ✓ Определены критические скорости истечения топлива для реализации режима поднятого диффузионного пламени пропана и метана;
- ✓ С помощью высокоскоростной съёмки определена характерная для поднятого диффузионного пламени средняя амплитуда колебаний точек поджога (1% от средней высоты отрыва);
- ✓ В результате Фурье-анализа найдена характерная частота колебаний основания факела (3-4 Гц);
- ✓ Наложение нестационарного электрического поля по разработанной схеме - с вращением вектора напряженности - стабилизирует поднятый диффузионный факел газообразных углеводородов в плоскости электродов в широком скоростном диапазоне, существенно уменьшает амплитуду колебаний корневой зоны факела и интенсифицирует процесс горения в области стабилизации. Вследствие стабилизирующего эффекта электрического поля периодические колебания точек поджога не наблюдаются;
- ✓ При высоких расходах метана влияние электрического поля на стабилизацию поднятого пламени происходит с некоторой временной задержкой (~10-15 с) после подачи напряжения;
- ✓ В случае присоединённого пламени установлено, что влияние электрического поля переменной пространственной конфигурации способствует интенсификации процесса горения и эффект от воздействия тем сильнее, чем выше прикладываемое напряжение, а также зависит от высоты расположения электродов.

## Литература

1. Ушаков, В. Я. Основные проблемы энергетики и возможные способы их решения // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319, № 4. – С. 5-13.
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. Винтовкин А.А. Современные горелочные устройства (конструкции и технические характеристики): Справочное издание / А.А. Винтовкин и др. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 496 с.
4. V.S. Kozulin, A.V. Tupikin, P.K. Tretyakov, *18th International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR2016) (Russia, Perm, 2016)*: AIP Conference Proceedings, Vol.1770, 030100. DOI: 10.1063/1.4964042.
5. Баев, В. К. Исследование устойчивости диффузионного пламени / В. К. Баев, В. А. Ясаков // Изв. Сиб. отд. АН СССР / СО АН СССР, 1969. – С. 38-42. – (Серия "Технические науки", ISSN 0134-24280002-3434; № 3, вып. 1).
6. Calcote, H. F. Electrical Properties of Flames. Burner Flames in Longitudinal Electric Fields / H.F. Calcote, Pease R. N. // *Industrial & Engineering Chemistry*. – 1951. – Vol. 43, № 12. – P. 180.

## Список публикаций

За время работы по данной тематике имеется ряд публикаций. Это как тезисы и материалы российских и зарубежных конференций, так и статьи, в том числе из перечня ВАК (4 шт.)

\*Венедиктов В.С. (прежняя фамилия Козулин)

1. Козулин, В.С. Изучение влияния переменной пространственной конфигурации электрического поля на горение // Материалы 51-й Международной научной студенческой конференции (МНСК-2013) «Студент и научно-технический прогресс»: Физика сплошных сред / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2013. –С. 48.
2. Денисова Н.В., Козулин В.С., Третьяков П.К., Тупикин А.В. Применение спектральной регистрации при изучении горения во внешнем электрическом поле // Материалы XVIII Междунар. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2013) (Алушта, 22-31 мая, 2013 г.), посвящ. памяти акад. Г.Г. Черного: [Сб.статей]. – М.: Изд-во МАИ, 2013. –С. 698-700.
3. Третьяков П.К., Тупикин А.В., Козулин В.С. Пламя во вращающемся электрическом поле // Модели и методы аэродинамики: Материалы Тринадцатой Международной школы-семинара (Евпатория, 4-13 июня 2013 г.). –М.: МЦНМО, 2013. –С. 199-201.
4. Третьяков П.К., Тупикин А.В., Козулин В.С., Зудов В.Н., Казазаев А.В., Крайнев В.Л. Управление горением углеводородных топлив изменением пространственной конфигурации внешнего электрического поля // Механика наноструктурированных материалов и систем: Тезисы докладов 2-й Всероссийской конференции (Москва, 17-19 декабря 2013 г.). –М.: ИПРИМ РАН, 2013. –С. 100.
5. Козулин В.С., Третьяков П.К., Тупикин А.В. Диффузионный факел во вращающемся электрическом поле // Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXXVIII академических чтений по космонавтике

- (Москва, 28-31 янв., 2014 г.)/ Под общей ред. А.К.Медведевой. –М., 2014. –С. 150-151.
6. Козулин В.С., Тупикин А.В. Исследование влияния изменяющейся пространственной конфигурации электрического поля на процессы горения // Физическое образование в ВУЗах. –М.: Издательский Дом Московского Физического общества, 2014. –Т.20, №1С. –С. 44.
  7. Козулин, В.С. Исследование дыр во фронте диффузионного пламени в режиме переходном от ламинарного к турбулентному горению // Материалы 52-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2014: Физика сплошных сред / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2014. –С. 36.
  8. Козулин В.С., Третьяков П.К., Тупикин А.В. Диффузионное горение при воздействии внешним электрическим полем с изменяемой во времени конфигурацией // Материалы X Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ - 2014) (Крым, Алушта, 25-31 мая 2014 г.). –М., 2014. –С. 149-151.
  9. Козулин В.С., Третьяков П.К., Тупикин А.В. Особенности диффузионного факела при переходе от ламинарного к турбулентному режиму горения // Материалы X Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ - 2014) (Крым, Алушта, 25-31 мая 2014 г.). –М., 2014. – С. 152-153.
  10. Третьяков П.К., Тупикин А.В., Козулин В.С. Разрывы во фронте диффузионного пламени в режиме горения, переходном к турбулентному // Модели и методы аэродинамики: Материалы Четырнадцатой Международной школы-семинара (Евпатория, 4-13 июня 2014 г.). –М.: МЦНМО, 2014. –С. 142-143.
  11. Kozulin V.S., Tretyakov P.K., Tupikin A.V. Intensification of burning by non-stationary electrical field // Abstracts of 17th International conference on the methods of aerophysical research (ICMAR 2014). –Novosibirsk: Avtograf, June 30 – July 6, 2014. –P. 128 (Part 1).

12. Козулин В.С., Третьяков П.К., Тупикин А.В. Воздействие нестационарным электрическим полем на пламя // Современные проблемы аэрогидродинамики: Тезисы докладов XVII школы-семинара, посвящ. памяти акад. Г.Г. Черного и 55-летию со дня основания НИИ механики МГУ (Сочи, "Буревестник" МГУ, 20-30 авг. 2014 г.). –М.: Изд-во Моск. ун-та, 2014. –С. 77-78.
13. Kozulin V. S., Tretyakov P.K., Tupikin A.V. Effect of electric rotating field on the diffusion flame // Abstracts of 8th International seminar on flame structure Flame Structure 2014. –Berlin: September, 21st -24th, 2014.
14. Козулин В.С., Крайнев В.Л., Третьяков П.К., Тупикин А.В. Особенности диффузионного факела при переходе от ламинарного режима горения к турбулентному // Физика горения и взрыва. –2014. –Т.50, №6. –С. 134-136.
15. Kozulin V.S., Krainev V.L., Tretyakov P.K., Tupikin A.V. Specific features of the diffusion flame in the transition from the laminar to turbulent regime of combustion // Combustion, Explosion and Shock Waves. - 2014. -Vol.50, No.6. -P. 742-744. DOI: 10.1134/S0010508214060185
16. Козулин, В.С. Стабилизация диффузионного пламени пропана переменной пространственной конфигурацией электрического поля // Материалы 53-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2015: Физика сплошных сред / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2015. –С. 34.
17. Козулин, В. С. Исследование влияния нестационарного электрического поля на диффузионное горение пропана с использованием спектрально-аналитической: тезисы докладов 19-й Международной конференции по Вычислительной Механике и Современным Прикладным Программным Системам (ВМСППС-2015) / В. С. Козулин, П. К. Третьяков, А. В. Тупикин – Алушта: 24-31 мая 2015. – С. 569-571.
18. Козулин В.С., Третьяков П.К., Тупикин А.В. Электрический стабилизатор поднятого диффузионного пламени пропана // Модели и методы аэродинамики: Материалы Пятнадцатой Международной школы-семинара (Евпатория, 4-11 июня 2015 г.). –М.: МЦНМО, 2015. –С. 84-85.

19. Козулин, В. С. Спектрональная 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 – Москва: 29 июня – 3 июля 2015 г. – С. 386-394.
20. Тупикин А.В., Третьяков П.К., Козулин В.С. Стабилизация поднятого диффузионного пламени пропана нестационарным электрическим полем // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 20 – 24 авг. 2015 г.) (Full text, 0.33 Mb) :[сборник трудов]. -Казань, 2015. -С. 3815-3816.- CD-ROM.
21. Тупикин А.В., Третьяков П.К., Козулин В.С. Диффузионное пламя пропана в электрическом поле с изменяемой во времени конфигурацией // IV Минский международный коллоквиум по физике ударных волн, горения и детонации (9-12 нояб. 2015 г.) : сборник докладов. -Минск, 2015. -С. 199-203.
22. Козулин, В.С., Диффузионное горение пропана в нестационарном электрическом поле // Горение топлива: теория, эксперимент, приложения (ГТТЭП-2015) [Электронный ресурс]: Материалы IX Всероссийской конференции с международным участием (Новосибирск, 16-18 ноября 2015 г.).- Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2015.-D2\_P9.-ISBN 978-5-89017-043-9.
23. Козулин В.С., Тупикин А.В., Третьяков П.К. Стабилизация диффузионного пламени пропана нестационарным электрическим полем // Примеры фундаментальных и прикладных исследований: [материалы] XXIII Международной научно-практической конференции (Россия, Новосибирск, 12-13 февр. 2016 г.) : (Ежемесячный научный журнал/ Международный независимый институт Математики и Систем "МиС"). -№.1 (22). - Новосибирск, 2016. -С. 98-104.
24. Тупикин А.В., Третьяков П.К., Денисова Н.В., Замашников В.В., Козулин В.С. Диффузионный факел в электрическом поле с изменяемой



- пространственной конфигурацией // Физика горения и взрыва. - 2016. – Т.52, No.2. -С. 49-53. DOI: 10.15372/FGV20160205.
25. Tupikin A.V., Tretyakov P.K., Denisova N.V., Zamashchikov V.V., Kozulin V.S., Diffusion flame in an electric field with a variable spatial configuration // Combustion, Explosion and Shock Waves. - 2016. -Vol.52, No.2. -P. 167-171. DOI: 10.1134/S0010508216020052.
26. Козулин В.С., Третьяков П.К., Тупикин А.В. Особенности режима горения переходного от ламинарного к турбулентному при наличии внешнего нестационарного электрического поля // Модели и методы аэродинамики : материалы Шестнадцатой Международной школы - семинара (Евпатория, 5-12 июня 2016 г.). -М.: ЦАГИ, 2016. -С. 89-90.
27. Козулин В.С., Третьяков П.К., Тупикин А.В. Стабилизация поднятого диффузионного факела электрическим полем с изменяемой во времени конфигурацией // Материалы XI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях ( NPNJ - 2016 ) (Крым, Алушта, 25 – 31 мая 2016 г.). -М.: Изд-во МАИ, 2016. -С. 141-144.
28. Kozulin V.S., Tupikin A.V., Tretyakov P.K. Stabilization of hydrocarbon fuel combustion by nonstationary electric field // XVIII International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR-16) (Russia, Perm, 27 Jun.-3 Jul., 2016) : abstracts. pt. I. -Perm, 2016. -P. 133.
29. Kozulin V.S., Tupikin A.V., Tretyakov P.K. Stabilization of hydrocarbon fuel combustion by non-stationary electric field // 18th International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR2016) (Russia, Perm, 27 Jun.-3 Jul., 2016) : AIP Conference Proceedings. -Vol.1770. -S.l., 2016. -P. 030100. DOI: 10.1063/1.4964042
30. Козулин В.С., Третьяков П.К., Тупикин А.В. Электрический стабилизатор для углеводородного факела // Современные проблемы аэрогидродинамики (Сочи, 5 – 15 сент. 2016 г.): тезисы докладов XVIII Всероссийской конференции, посвященной 60-летию Российского национального комитета по теоретической и прикладной механике и 125-летию со дня рождения его

первого председателя академика АН СССР Н.И. Мухелишвили. -М.: Изд-во МГУ, 2016. -С. 67-68.

31. Тупикин А.В., Третьяков П.К., Венедиктов В.С. Углеводородное диффузионное пламя в переменном электрическом поле // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред : сборник трудов 6-й Всероссийской научной конференции с международным участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского (Москва, 16-18 нояб. 2016 г.): в 2-х т. -Т.2. -М.: ИПРИМ РАН, 2016. -С. 34-39.
32. Тупикин А.В., Третьяков П.К., Венедиктов В.С. Стабилизация диффузионного поднятого углеводородного пламени внешним периодическим электрическим полем // Физика горения и взрыва. - 2017. -Т.53, No.1. -С. 38-42. DOI: 10.15372/FGV20170105.
33. Венедиктов В.С., Замашиков В.В., Тупикин А.В., Третьяков П.К. Исследование диффузионного горения углеводородов оптическими методами // Материалы XX Юбилейной Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2017), 24–31 мая 2017 г., Алушта. — М.: Изд-во МАИ, 2017. — С. 596-598.
34. Венедиктов В.С., Замашиков В.В., Тупикин А.В., Третьяков П.К. Применение метода PIV для исследования воздействия нестационарного электрического поля на диффузионное горение газообразных углеводородов // Тезисы докладов 14-й Международной научно-технической конференции Оптические методы исследования потоков (ОМИП-2017), Москва, 26 – 30 июня 2017 г.
35. V.S. Venediktov, P.K. Tretyakov, A.V. Tupikin Non-stationary electric field effect on stability of a lifted diffusion gaseous hydrocarbon flame // Proceedings of the Conference 9th International Seminar on Flame Structure (July 10-14, 2017).
36. Венедиктов В.С., Тупикин А.В., Третьяков П.К. Поднятое углеводородное пламя в слабом нестационарном электрическом поле // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тезисы докладов XII Всероссийской

конференции молодых ученых (Новосибирск- Шерегеш, 16 - 22 марта 2018 г.) / под ред. В.В. Козлова. -Новосибирск, 2018. -С. 27-28.

37. Venediktov V.S., Tupikin A.V., Tretyakov P.K. Hydrocarbon Flame in Non-stationary Electric Field // XIX INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE METHODS OF AEROPHYSICAL RESEARCH (ICMAR 2018): AIP Conference Proceedings. -Vol. 2027, 040014 (2018) doi.org/10.1063/1.5065288.
38. Венедиктов В.С., Третьяков П.К., Тупикин А.В. Стабилизация горения нестационарным электрическим полем на типовой горелке // Модели и методы аэродинамики : материалы Восемнадцатой Международной школы - семинара (Евпатория, 4-11 июня 2018 г.). -М.: ЦАГИ, 2018. -С. 48 - 49.
39. Венедиктов В.С. Тупикин А.В., Третьяков П.К., Поднятый факел газообразных углеводородов в электрическом поле с вращением вектора напряженности // Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии: материалы XXI Всероссийской научной конференции с международным участием (17 - 19 сентября 2018 г., г. Томск). – Томск. –2018. – С.40-43.