

УДК 536.46, 778.39

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ОБРАЩЕННОГО ПЛАМЕНИ

Алексеев М.М., к.ф.-м.н., доцент,  
Семенов О.Ю., к.ф.-м.н., доцент,  
БУ ВО «Сургутский государственный университет»,  
г. Сургут

**Аннотация.** В статье описано изучение газовоздушного пламени для визуализации его структуры. Исследуется влияние гидродинамики на процесс теплопередачи. Обнаружено, что изменение скорости способствует образованию турбулентности возле фронта пламени и влияет на процесс тепло- и мас-сопреноса.

**Ключевые слова:** стабилизация пламени, вихревые структуры, газовая смесь, визуализация, гидродинамика, пропан, перенос тепла.

В настоящее время основным источником энергии является сжигание различных видов топлива, включая природный газ. Одной из актуальных задач является повышение эффективности работы горелочных устройств. Вихревые потоки газа могут влиять на интенсивность теплообмена. Интерес к обращенному пламени в попутном потоке вызван желанием увеличить эффективность тепломассообмена, которое может быть достигнуто за счет самопроизвольного формирования вихревых структур. Однако, ряд вопросов, связанных с устойчивостью пламени, возникновением тепловых колебаний, воздействием свободной конвекции и гидродинамического расширения фронта горения до сих пор остается открытым [1-4].

Для исследования пламени была разработана схема установки и методика проведения эксперимента, на рисунке 1 представлена её схема. Основным компонентом установки была вертикальная стеклянная трубка с открытыми краями. Прозрачные стенки трубы позволяли визуализировать пламя и поток газа вокруг него с помощью скоростной фото- и видеосъемки. Изучение фотографий способствовало выявлению роли конвекции, стабилизатора, ускорения свободного падения и теплового излучения на образование и устойчивость вихревых потоков в пламени и рядом с ним.

Диффузионное обращенное пламя получали при горении газовой смеси различной концентрации от 3% до 9 % пропана в воздухе. Для начала горения к электродам в трубе подключали клеммы разрядника. В качестве разрядника применялась автомобильная катушка зажигания, которая позволяла создавать высоковольтный разряд напряжением 100 В и мощностью до 10 кВт. Стабилизатор был выполнен из металлической проволоки. Свечение пламени фотографировали цифровой камерой Canon EOS 20D.

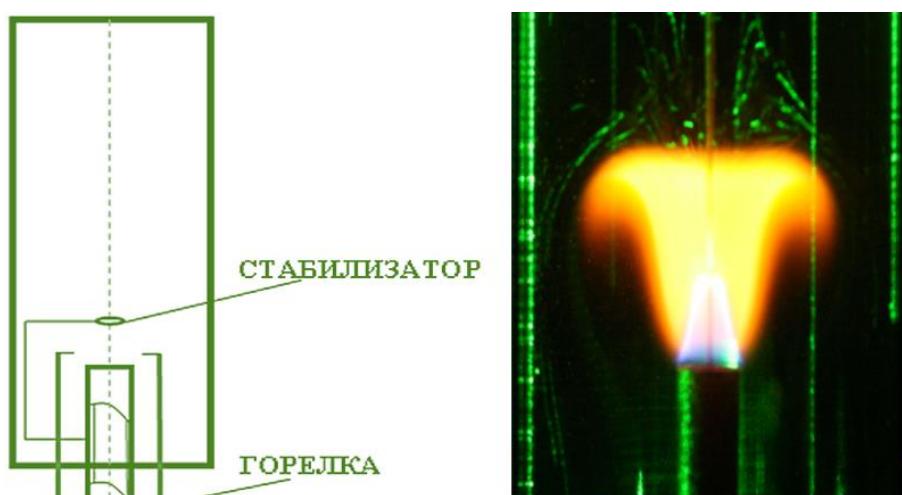


Рис. 1. Схема установки и фотография обращенного пламени в стеклянной трубе

Во всех опытах создавали условия ламинарного течения. Условия ламинарности характеризуется числом Рейнольдса, которое рассчитывали по со-

$Re = \frac{vd}{\nu}$ , где  $v$  – средняя скорость газа на срезе горелки (металлической трубке),  $d$  – диаметр горелки,  $\nu$  - коэффициент кинематической вязкости смеси, взятой при температуре окружающего воздуха, равной 300 К.

Все основные данные определялись по фотографиям свечения пламени. Схема измерения параметров представлена на рисунке 2. Где ОА - высота обращённого пламени, ОВСД - длина обращённого пламени,  $\alpha$  - угол вершины конуса, АД - радиус пламени.

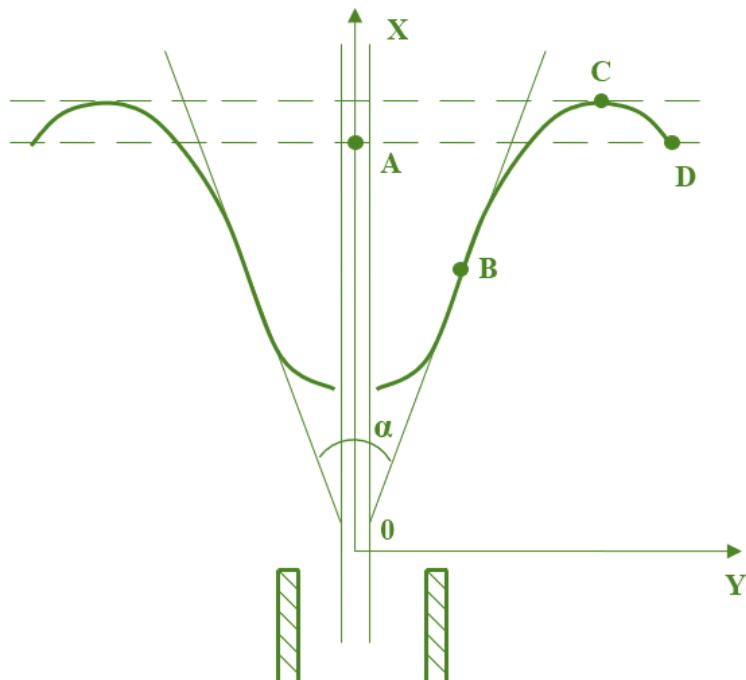


Рис. 2. Схема измерения параметров обращённого пламени

Вихревые структуры, также известные как турбулентность или закрученные потоки, являются особенностью движения газов и жидкостей. В случае с пламенем они могут возникать из-за различных факторов, таких как горение топлива, конвекция горячих газов и взаимодействие с окружающими объектами. В результате этих процессов пламя может становиться более турбулентным и создавать сложные трехмерные формы (рис. 3).

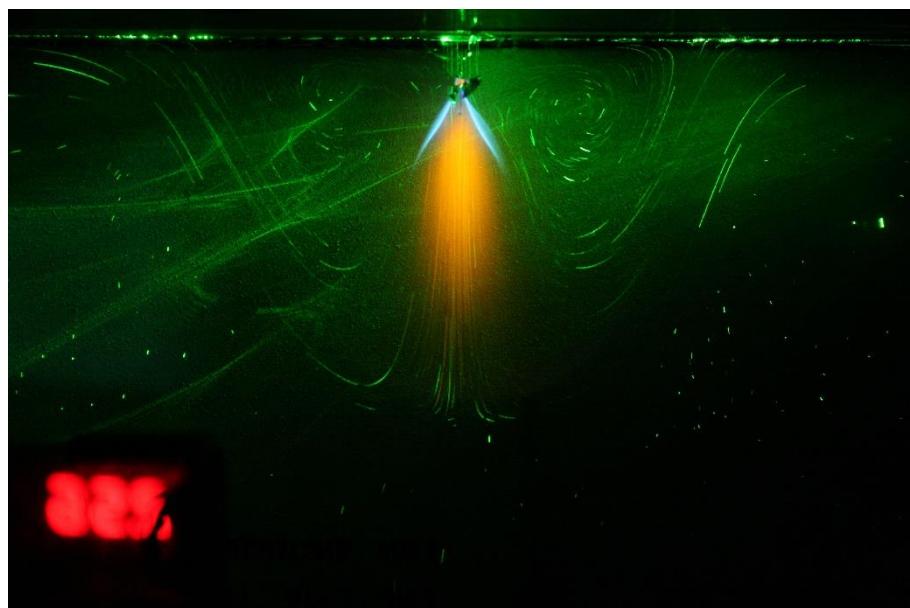


Рис.3. Вихреобразование тепловых потоков пламени при горении на стабилизаторе

Экспериментальные результаты визуализации вихревых структур пламени представлены на фотокадрах экспериментов (рис. 4 и рис. 5).

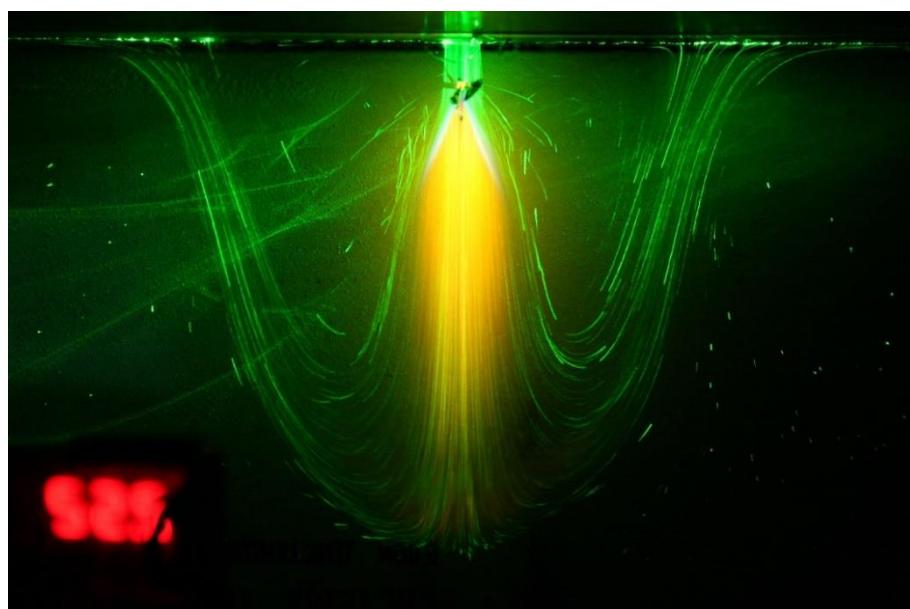


Рис.4. Обратное пламя на стабилизаторе подсвечено зелёным светом лазера

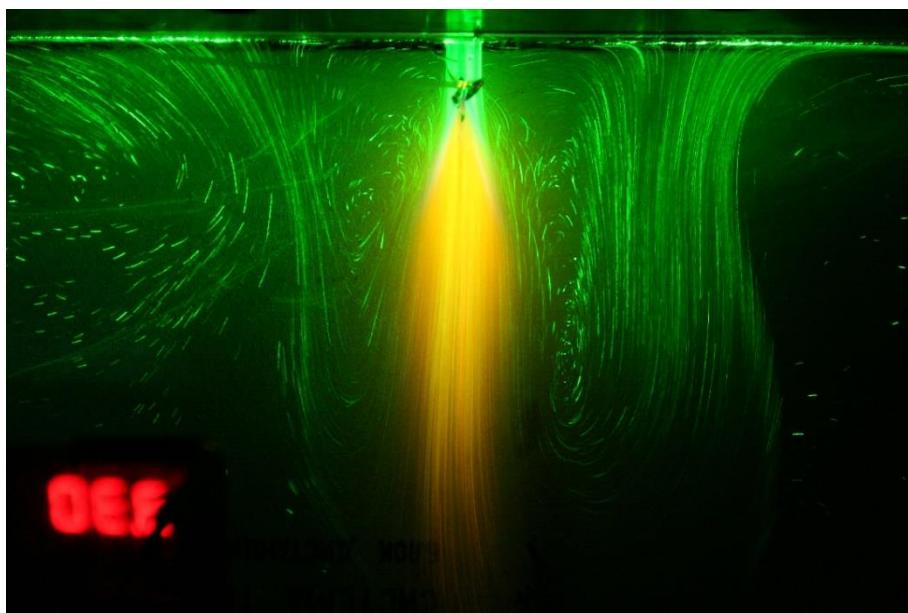


Рис. 5. Формирование симметричных вихревых структур в пламени

Проведённые исследования позволили выявить зависимости высоты пламени от тепловой мощности как в открытой атмосфере, так и в трубе при стационарном горении. Изменение скорости течения газа в обратном пламени влияет на формирование вихревых структур, а применение стабилизатора на увеличение интенсивности теплопередачи, что приводит к увеличению скорости сгорания газовоздушной смеси.

Изучение вихревых структур в пламени важно для разработки эффективных систем горения, таких как горелки, печи и двигатели внутреннего сгорания. Понимание механизмов возникновения турбулентности и её влияния на процесс горения позволяет улучшить характеристики и безопасность этих устройств.

#### Список литературы:

1. Алексеев М.М., Семенов О.Ю. Физическое моделирование тюльпанообразного пламени при горении газов в цилиндрической вертикальной трубе // Вестник кибернетики. 2021. № 1 (41). С. 63–70.
2. Кочергин Д.О., Абдрахманов Р.Х., Лукашов В.В., Терехов В.В. О структуре прямого и обращенного диффузионного водородо-воздушного пламени // Научный вестник НГТУ. 2016. Т. 62, № 1. С. 195–204.
3. Алексеев М.М., Семенов О.Ю. Изучение обращённого пламени на продольном стабилизаторе. Современные вопросы естествознания и экономики: Сборник трудов V Международной научно-практической конференции. – Прокопьевск, 2023. – стр. 471–474.
4. Zhao D., Li J. Feedback Control of Combustion Instabilities using a Helmholtz Resonator with an Oscillating Volume //Combustion Science and Technology. 2012. V. 184, № 5. P. 694–716.