

УДК 536.46

## ДВУХФАЗНЫЕ ПОТОКИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПЛАМЕНИ СВЕЧИ

## TWO-PHASE FLOWS OF COMBUSTION PRODUCTS OF CANDLE FLAME

А. В. Егоров, С. И. Ксенофонов

A. V. Egorov, S. I. Ksenofontov

ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный педагогический университет им. И. Я. Яковлева», г. Чебоксары

**Аннотация.** Экспериментально установлено, что двухфазный поток продуктов сгорания пламени создает вокруг себя конвективные потоки окружающего воздуха. Расход этого потока превышает в несколько раз массовый расход продуктов сгорания. Между невозмущенным воздухом и конвективным потоком существует пограничный слой. Расход этого слоя не превышает 10 % от общего расхода конвективного потока.

**Abstract.** It is experimentally established that two-phase flow of combustion products of flame creates convection ambient air flows around. This flow rate exceeds the mass flow of combustion products several times. There is boundary layer between undisturbed air and convective flow. The flow rate of this layer does not exceed 10 percent of convective flow.

**Ключевые слова:** пламя, конвекция, микроманометр, трубка Пито–Прандтля, расход.

**Keywords:** flame, convection, micro manometer, Prandtl–Pitot tube, flow rate.

**Актуальность исследуемой проблемы.** При диффузионном горении углеводородных топлив можно увидеть яркое свечение факела. Для осесимметричного пламени светящуюся поверхность можно представить в виде боковой поверхности конуса. Однако даже для таких пламен наблюдаются яркостные неоднородности. У основания конуса пламя по цвету синее, а с увеличением высоты цвет пламени меняется на красно-оранжевый. Вершина конуса имеет красный оттенок, и с нее начинается сажистый шлейф.

Свечение пламени объясняется излучением нагретых сажистых частиц [4], [7]. В диффузионном пламени из-за неполноты горения образуется углерод в виде ионов  $C_2$ . Ионы углерода склонны к объединению между собой. Так образуется поверхность, которая может увеличиваться в размерах. При увеличении концентрации окислителя частицы сажи могут частично выгорать. В сажевом шлейфе процессы изменения частиц прекращаются. Далее поток продуктов сгорания должен существовать почти без изменений.

Конвективные потоки продуктов сгорания увлекают за собой окружающий воздух [3]. По этой причине диффузионный режим горения пламени по высоте меняется. Скорости потока продуктов сгорания и окружающего воздуха малы. Определенные скорости в восходящем потоке продуктов сгорания является сложной эксперимен-

тальной задачей [2], [5], [6], и в каждом эксперименте приходится решать новые задачи. Оценка расходов движущегося окружающего воздуха является целью настоящей работы.

**Материал и методика исследований.** Экспериментальная установка по измерению скорости потока состояла из сканирующей трубки Пито–Прандтля внешним диаметром 1,5 мм. Эта трубка пересекала поперечное сечение потока продуктов сгорания с определенной скоростью и через гибкие трубопроводы соединялась U-образным водяным манометром. Манометр (1), выполненный из оптического стекла с каналами прямоугольного сечения, установлен на стойке с микровинтом (2), позволяющим перемещать его в вертикальном направлении (рис. 1). Оптическая система (3) давала возможность получать четкое изображение мениска жидкости на экране (4) с определенным увеличением. Источник света (5) с конденсором (6) создавал равномерную освещенность всего экрана. В плоскости экрана фотосопротивление (7) располагалось таким образом, что темное изображение мениска жидкости (8) полностью перекрывало площадку (9) чувствительного элемента фотосопротивления. При изменении давления в манометре изображение мениска перемещалось таким образом, что площадь освещаемого фотосопротивления увеличилась. В целях увеличения помехоустойчивости оптический канал защищался темной трубкой.

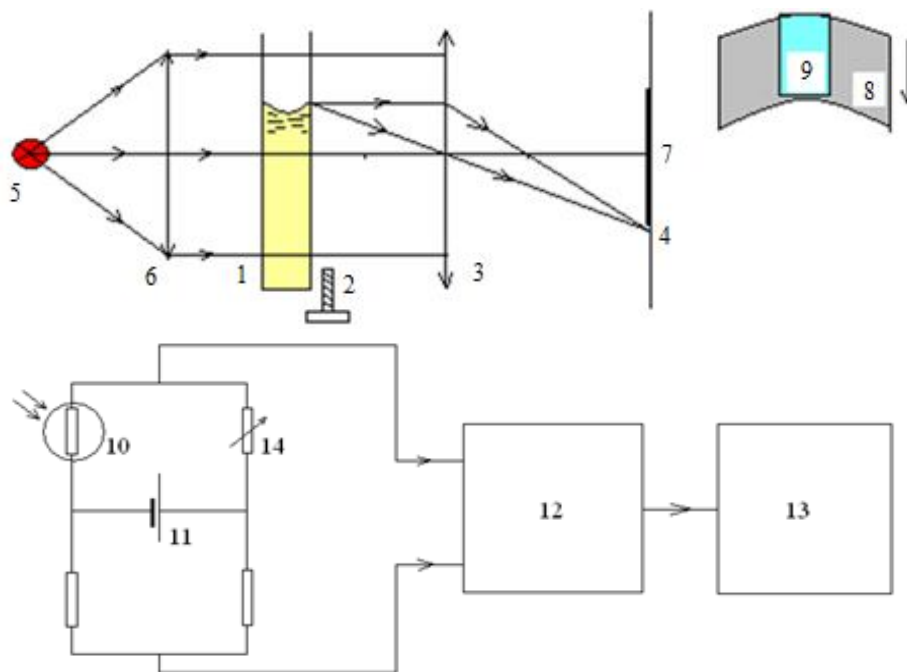


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

Само фотосопротивление (10) включалось в одно из плеч моста Уитсона. Питание моста Уитсона осуществлялось через стабилизированный источник питания (11). Ток, текущий при разбалансировке моста, подавался с помощью цепочки резисторов на один из каналов аналого-цифрового преобразователя (АЦП) (12). Сигнал с АЦП через USB-

порт подавался на ПЭВМ (13). Микроконтроллер АЦП «опрашивал» состояние входного канала с интервалом 330 мкс. Изменяющийся во времени сигнал записывался и сохранялся как отдельный файл. Полученный массив обрабатывался с помощью программных средств, и экспериментальные данные представлялись в виде графиков. По оси ординат откладывалось значение тока разбалансировки моста, по оси абсцисс – координата трубки Пито–Прандтля.

Градуировка манометра производилась следующим образом. Путем перемещения манометра с помощью микровинта изображение мениска устанавливалось на край площадки чувствительного элемента фотосопротивления. При этом положении мост уравновешивался с помощью магазина сопротивлений (14). Далее с помощью микровинта перемещался манометр в вертикальном направлении так, что изображение мениска открывало доступ света на поверхность фотосопротивления. Цена деления микровинта составляла  $2 \cdot 10^{-3}$  мм. Оптическое увеличение системы было 10 крат. Таким образом, манометр представлял собой чувствительный прибор с ценой деления АЦП  $c = 4,2 \cdot 10^{-3}$  Па/дел. Если же, используя уравнение Бернулли, измерять скорость потока, то одно деление АЦП соответствовало скорости воздушного потока 7,97 см/с.

**Результаты исследований и их обсуждение.** В работе изучалось течение продуктов сгорания стеариновой свечки, горящей в свободно-конвективном режиме. Трубка Пито проносилась над поверхностью горения на определенной высоте. Для контроля возмущений потока датчиком производилось фотографирование процесса.

Экспериментальные результаты распределения скорости потока одного из сечений вдоль диаметра представлены на рис. 2. На первый взгляд, кажется, что распределение  $v(x)$  подчиняется распределению скорости по Пуазейлю в цилиндрической трубе. Однако сравнение экспериментальных данных с расчетными показало сложный характер течений (рис. 3).

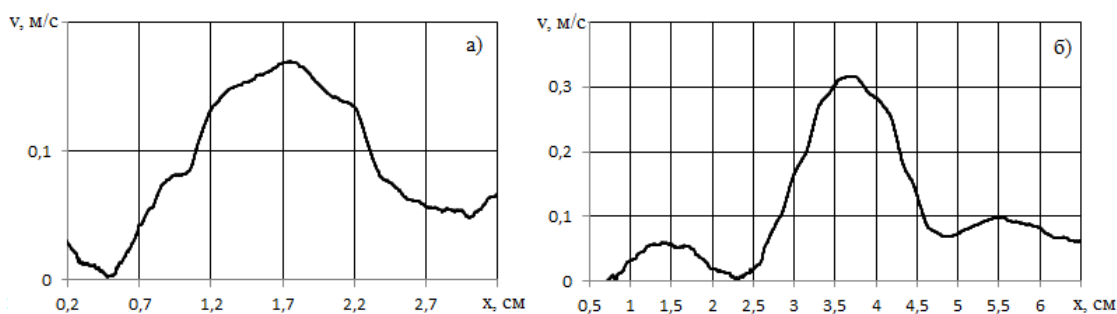


Рис. 2. Распределение скорости течений продуктов сгорания над поверхностью свечи в мм:  
а – 1; б – 55

Во-первых, центральная часть потока характеризуется двухфазностью. В продуктах сгорания находятся частицы сажи. Оптическими методами установлено, что внешний диаметр светящего пламени равен 7,5 мм. Измерения потока показывают, что внешний конвективный поток воздуха состоит из двух коаксиальных потоков. Центральный воздушный поток имеет поперечные размеры 22 мм, а пограничный – 24 мм, но с меньшими значениями скорости.

Исходя из того, что течения потоков воздуха и продуктов сгорания вязкие, мы рассчитали расходы воздуха и продуктов сгорания. В расчетах плотность продуктов сгорания в зоне свечения бралась как плотность среды с температурой 1000 К. На высоте  $h = 1$  мм над фитилем максимальная скорость потока равна 0,17 м/с. Объемный расход продуктов сгорания в этом сечении составляет  $9,53 \text{ см}^3/\text{с}$ , а массовый расход равен  $4,1 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с}$ . Объемный расход конвективного потока воздуха равняется  $22,76 \text{ см}^3/\text{с}$ , а массовый –  $29,36 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с}$ . Скорость потока в пограничном слое увеличивается от нуля до максимального значения 0,02 м/с почти по линейному закону. Объемный расход воздуха в пограничном слое равен  $0,72 \text{ см}^3/\text{с}$ , что составляет около 2,5 % расхода воздушной массы. Отношение массовых расходов воздуха и продуктов сгорания будет  $\alpha = 7,16$ . Уравнение зависимости нормированной скорости от относительного радиуса потока можно представить в виде

$$v/v_m = 1 - 1,33r^2/R^2.$$

Увлекаемый воздух вполне может участвовать в химических реакциях горения.

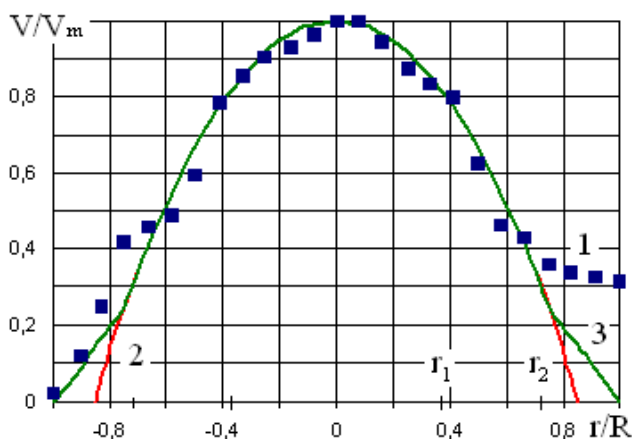


Рис. 3. Нормированные зависимости распределения скорости продуктов сгорания свечи по радиусу на высоте 1 мм:  
 1 – экспериментальные значения; 2 – основной поток; 3 – пограничный поток.  
 Размеры светящей зоны пламени отмечены буквой  $r_1$ , теплового потока –  $r_2$

Дополнительные исследования с применением теневого метода визуализации тепловых потоков в общем потоке показали, что регистрируемые прибором границы потока шире, чем границы теплового потока [1]. Границы теплового потока  $r_2$  определяются явлениями теплопроводности в конвективном потоке.

На вершине пламени, где скорости химических реакций на несколько порядков ниже, конвективный воздушный поток и продукты сгорания представляют собой нейтральные потоки, обладающие разными температурными параметрами. На высоте  $h = 55$  мм поперечные размеры потока почти такие же, как у основания пламени. Из графика видно, что максимальное значение скорости потока увеличилось до 0,317 м/с. На этом сечении увеличиваются также расходы как продуктов сгорания, так и конвективного потока воздуха. Объемный расход продуктов сгорания равен  $19 \text{ см}^3/\text{с}$ , а объемный расход воздуха –  $33,82 \text{ см}^3/\text{с}$ . Расход воздуха в пограничном слое составляет около 10 % от пото-

ка воздуха. Отношение массовых расходов воздуха и продуктов сгорания будет  $\alpha = 5,34$ . Таким образом, на вершине факела, где достигается максимальная температура пламени, скорость потока значительно увеличивается, а также увеличивается и расход конвективного воздушного потока.

Использованный прием исследования структуры потоков может быть применен для изучения пламен более сложных систем, например, для пиротехнического пламени. Для пиротехнических составов со значительным отрицательным кислородным балансом вопрос об участии воздуха в горении встает более остро.

**Резюме.** Изучена структура потока продуктов сгорания стеариновой свечи с помощью чувствительного микроманометра с применением современных компьютерных технологий.

Выявлена сложная структура течения продуктов сгорания, где выделены границы двухфазного течения и конвективного потока воздуха. Расход пограничного слоя, существующего между невозмущенным воздухом и конвективным потоком, не превышает 10 % от общего расхода конвективного потока.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Абруков, С. А.* Теневые и интерференционные методы исследования оптических неоднородностей / С. А. Абруков. – Казань : Изд-во Казанского ун-та, 1962. – 84 с.
2. *Васильева, О. В.* Процессы сажеобразования в пламенах конденсированных систем на основе перхлората аммония и полибутадиенового каучука / О. В. Васильева, С. И. Ксенофонтов, Р. Р. Санатуллово // Вестник Чувашского государственного педагогического университета имени И. Я. Яковлева. – 2013. – № 2 (78). – С. 21–28.
3. *Вулис, Л. А.* Основы теории газового факела / Л. А. Вулис, Ш. А. Ершин, Л. П. Ярин. – Л. : Энергия, 1968. – 204 с.
4. *Гейдон, А. Г.* Спектроскопия пламен / А. Г. Гейдон ; под ред. В. Н. Кондратьева. – М. : ИЛ, 1957. – 383 с.
5. *Ксенофонтов, С. И.* Измерение скорости двухфазного потока современными методами / С. И. Ксенофонтов, А. В. Егоров // Теория и методика обучения физике, математике и информатике в среднем и высшем профессиональных образовательных учреждениях : сб. мат. конф. : в 2 т. Т. 1 : Физика. Информатика. – Чебоксары : Чуваш. гос. пед. ун-т, 2010. – С. 74–78.
6. *Ксенофонтов, С. И.* Измерение скорости потока продуктов горения конденсированных систем / С. И. Ксенофонтов, А. В. Егоров, О. В. Васильева // Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий : мат. науч.-практ. конф. – Казань : Отечество, 2011. – С. 87–89.
7. *Теснер, П. А.* Образование углерода из углеводородов газовой фазы / П. А. Теснер. – М. : Химия, 1972. – 136 с.