

Электрическая структура факела газового смесового пламени

М. Ю. Трофименко^а, С. К. Асланов^а, В. П. Смоляр^б

^аОдесский национальный университет им. И.И. Мечникова,
ул. Дворянская, 2, г. Одесса, 65082, Украина, e-mail: aslanov@onu.edu.ua

^бОдесский национальный политехнический университет,
пр. Шевченко, 1, г. Одесса, 65044, Украина

Рассматривается горение открытого факела смеси бытового газа с воздухом в атмосфере. Уточнено понятие стехиометрического соотношения для такой системы. Выделено горение обогащённой смеси, смеси стехиометрического состава, обеднённой смеси. Из электрических и оптических измерений найдены для каждого случая структура факела и ее изменения при условии перехода горения в пульсационный режим. Отмечается значительная роль вторичного (внешнего, атмосферного) воздуха при горении факела, соответствующего стехиометрическому соотношению.

Ключевые слова: электрический пробой, пламя, структура факела, стехиометрия.

УДК 526.461:462

ВВЕДЕНИЕ

Развитие энергоёмких технологий стимулирует рациональное применение горючих ископаемых. Эффективность горения зависит от соответствующей его организации. Так, практически у всех видов горючего как твёрдых, так жидких и газообразных, при определённых условиях наступает пульсационный режим горения. Контролируемый в заданных пределах, он обеспечивает экономичность использования горючего ввиду ускорения различных теплообменных процессов (смесеобразования, испарения, теплопередачи), увеличения теплонапряженности топочного объёма и полноты сгорания топлива по сравнению с устойчивым, стационарным горением [1–3].

Наиболее распространено в бытовой технике и промышленных установках газовое смесовое пламя. Механизм горения такого пламени рассматривается на примере факела пропан-бутановой смеси. В работах [4, 5] отмечается, что наступление пульсационного режима горения для пропан-бутановой смеси соответствует определённому интервалу соотношений горючее-окислитель и является внутренним свойством факела, приводящим к характерным изменениям его структуры.

Ниже будет рассмотрено горение открытого ламинарного ($Re \approx 780$) факела пропан-бутановой смеси, использовавшейся в качестве горючего (пропан – 40%, бутан – 60%), вертикально установленной горелки с принудительной подачей реагирующих компонентов (окислитель-воздух) в воздушной атмосфере при нормальных условиях (температура окружающей среды 20°C, давление 768 мм рт.ст.).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерения проводились на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 1.

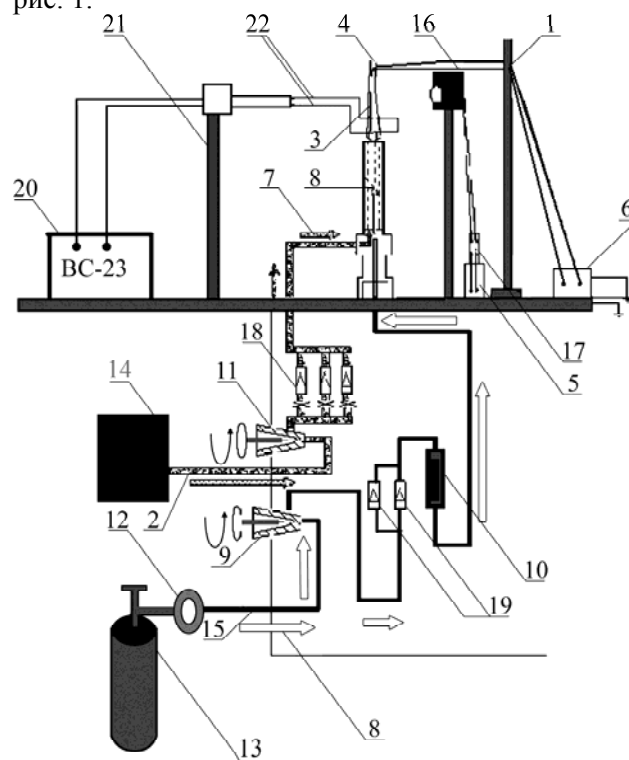


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1, 21 – препаративодители; 2, 15 – трубопроводы; 3 – исследуемое пламя; 4 – спай термопары, находящийся в исследуемом пламени; 5 – осциллограф С1-112А; 6 – вольтметр В7-35; 7 – направление движения воздуха; 8 – направление движения газа; 9 и 11 – игольчатые краны; 10 – племегаситель (стружки металла); 12 – редуктор грубой регулировки давления газа; 13 – газовый баллон; 14 – компрессор; 16 – фотодиод; 17 – усилитель; 18 – блок ротамеров, измеряющий расход воздуха; 19 – блок ротамеров, измеряющий расход газа; 20 – источник высокого напряжения ВС-23; 22 – электроды.

Редуктором 12 давление газа устанавливалось в пределах 1,2–4,5 атм. Расход газа на горелке регулировался с помощью игольчатого крана 9. Подача воздуха осуществлялась компрессором 14, расход воздуха регулировался с помощью игольчатого крана 11. Воздух и газ подавались в рабочий объем горелки, где перемешивались, и, таким образом, в сопло поступала приготовленная однородная рабочая смесь. Регистрация расхода исходных компонентов осуществлялась набором соединённых параллельно ротаметров 18 и 19 (соответственно для окислителя – воздуха и для горючего – пропан-бутановой смеси).

Полученный факел имеет типичное строение факела бунзеновской горелки и состоит из двух конусов – внешнего и внутреннего, размеры, форма и соотношение объемов которых зависят от соотношения окислитель – горючее в исходной смеси. При определённом соотношении окислитель–горючее внутренний конус замыкается, образуя сформированную острую вершину, и пропадает жёлтое свечение, характерное для наличия в факеле сажистых частиц К-фазы, образованных избыточным содержанием несгоревшего углерода в факеле. Очевидно, этот момент соответствует стехиометрическому соотношению окислитель–горючее [6] (если для органического горючего пропан-бутановая смесь, пары бензина и т.п. – вообще правомерно вводить понятие «стехиометрическое соотношение» ввиду неоднозначной последовательности промежуточных химических реакций).

Такой оптический подход к определению понятия стехиометрии имеет преимущество по отношению к расчётному определению стехиометрии на основании весовых, молекулярных и т.д. соотношений, заключающееся в том, что в последнем случае очень трудно, если не невозможно учесть влияние вторичного (атмосферного) воздуха. Между тем наличие этого вторичного воздуха влияет на структуру факела.

Тем не менее, осуществляя привязку к доступным нашему измерению параметрам, мы будем говорить, что при нашей организации факела (используемой геометрии горелки и расходах окислителя и горючего) условие стехиометрического горения (исходя из указанного оптического постулата) наступает при соотношении в исходной горючей смеси 600 единиц объёма воздуха и 140 единиц объёма пропан-бутановой смеси. Фотографии, зафиксировавшие разные режимы горения исходной смеси, представлены на рис. 2.

Горению смеси стехиометрического состава соответствует факел, в верхней части внутреннего конуса которого наблюдается исчезающее

жёлтое свечение (рис. 2а).

В случае избытка газа в исходной смеси по отношению к стехиометрическому соотношению (обогащённая смесь) практически весь факел (особенно в верхней его части) окрашен жёлтым свечением (рис. 2б). При недостатке газа в исходной смеси (обеднённая смесь) факел структурирован и излучение его окрашено в синеголубой цвет (рис. 2в).

В описанном факеле, начиная со стехиометрического соотношения и вплоть до его потухания с уменьшением подачи газа (при фиксированной подаче воздуха), наблюдаются оптические пульсации яркости излучения [4, 5], амплитуда и частота которых увеличиваются по мере обеднения исходной горючей смеси.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Большой объем информации о структуре факела можно получить из электрических исследований пламени.

Исходя из материалов монографии [6], можно выделить три аспекта влияния на пламя присутствующих в нем заряженных частиц.

Первый заключается в том, что в пламени фиксируется протекание разветвлённых цепных реакций, проходящих через стадии, включающие множество радикалов. Это приводит к возникновению в углеродных пламенах значительно более высоких концентраций ионов и радикалов, чем при равновесной ионизации в горячих продуктах сгорания.

Второй аспект касается условий сажеобразования. Все сажистые частицы в пламени (конденсированные частицы – К-фаза) заряжены, по крайней мере при наличии электрического поля. Это обуславливает возможность электрического воздействия на концентрацию и дисперсный состав образующихся частиц К-фазы, а из электрических измерений – сделать выводы о процессах сажеобразования.

Третий аспект – влияние заряженных частиц (в частности, радикалов, поступающих из зоны горения) на процессы пиролиза горючего и образование при этом сажистых частиц, приводящих к частичному изменению структуры энергораспределения (увеличению роли излучения) в пламени. Это особенно характерно для случая, когда горючее подводится к пламени и достигает высокой температуры преимущественно при отсутствии кислорода или, по крайней мере, при его недостатке.

Описанные механизмы ведут к появлению в пламени электрических неоднородностей, локализованных в местах протекания реакций горения, и воздействию этих неоднородностей на само пламя. Необходимо отметить, что электри-

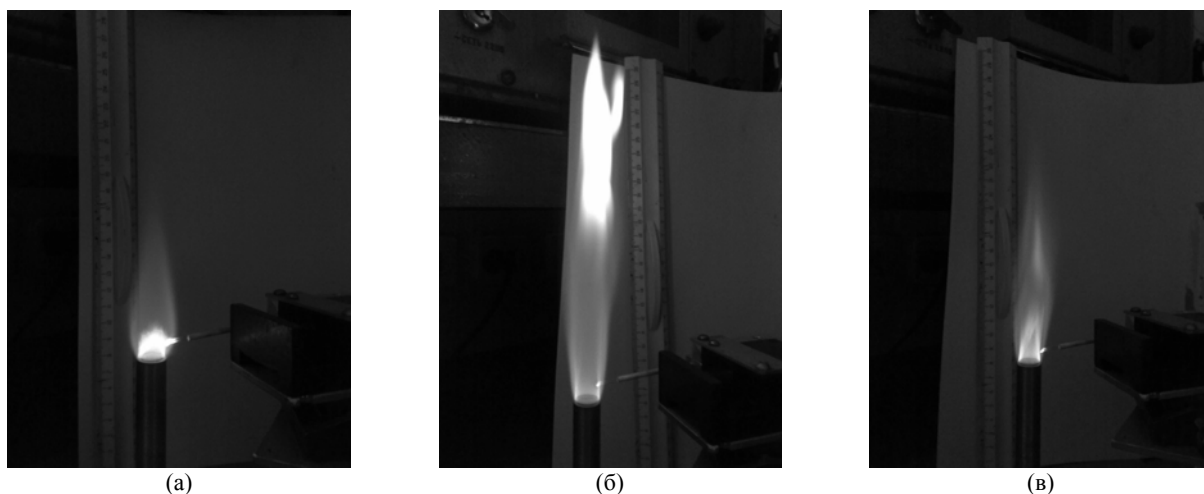


Рис. 2. Фотографии факелов пропан-бутановой смеси при различных соотношениях окислитель–горючее. (а) – стехиометрическое соотношение (600 усл. ед. возд., 140 усл. ед. п.-б. смесь.); (б) – обогащённая смесь (600 усл. ед. возд., 200 усл. ед. п.-б. смесь); (в) – обеднённая смесь (600 усл. ед. возд., 80 усл. ед. п.-б. смесь).

ческие изменения в пламени первичны по отношению к температурным и обладают большей скоростью.

Таким образом, целью электрических измерений наших исследований является использование электрического поля как инструмента, с помощью которого можно определить структуру факела и изменение этой структуры при изменении соотношения окислитель–горючее в исходной смеси. Следует указать также на вероятно большую чувствительность (по сравнению с температурными измерениями) предлагаемого метода электрических измерений, учитывая наличие в пламени упомянутых выше локализованных разветвлённых цепных реакций, создающих избыточные носители зарядов по отношению к присутствующим в горячих продуктах сгорания при равновесной ионизации.

В экспериментальной установке на препаративодитель укрепляется блок электродов, расположенных навстречу друг другу в горизонтальной плоскости, расстояние между которыми можно изменять симметрично от центра их соприкосновения. Нами измерялась величина напряжения электрического пробоя в пламени пропан-бутановой смеси между двумя платиновыми электродами диаметром 0,5 мм. Измерения с шагом 1 мм проводились вдоль линии, проходящей через ось симметрии исходного факела в горизонтальных плоскостях, расположенных на разных расстояниях от среза сопла горелки.

Следует отметить, что напряжение пробоя при наступлении пульсационного режима горения в обеднённой смеси практически остается постоянным при изменении расстояния между электродами в зоне реакций факела в интервале 1,5–8 мм. Хотя может несколько изменяться по абсолютной величине при замене металлов, используемых в качестве электродов. Указанный факт дает нам основание считать, что измеряемая

величина напряжения пробоя характерна для самого состояния пламени (интенсивность реакций, наличие радикалов), и изменения ее позволяют определить структуру факела.

Полученные результаты для смеси стехиометрического состава (рис. 2а) представлены на рис. 3, для смеси обогащённого состава (рис. 2б) – на рис. 4, для смеси обеднённого состава (рис. 2в) – на рис. 5.

Как видно из графиков, для случаев обогащённой смеси и смеси стехиометрического состава распределения проходят через минимальные значения напряжения пробоя. На рис. 6 отображены положения минимумов величины напряжения электрического пробоя вдоль оси симметрии факела в зависимости от их положения в горизонтальном распределении величин напряжения пробоя.

Общепринятым считается предложенный авторами [7] следующий механизм горения газового факела: граница внутреннего и внешнего конусов соответствует фронту пламени; внешний конус – догорание избыточного топлива (главным образом в виде СО и Н) и неразложившегося или не до конца разложившегося исходного топлива при диффузии в область реакции в качестве окислителя вторичного (внешнего) воздуха. Горение дополнительно поддерживается горячими газами и активными центрами – свободными радикалами, образовавшимися в области, примыкающей к фронту горения.

Как видно из представленных графиков, при стехиометрическом соотношении окислитель–горючее совокупность достигаемых в различных сечениях факела минимальных значений величин напряжения электрического пробоя образует геометрическую поверхность, совпадающую (или близкую) с поверхностью внутреннего конуса факела (рис. 2а). Такая поверхность соответствует фронту горения, а полностью сфор-

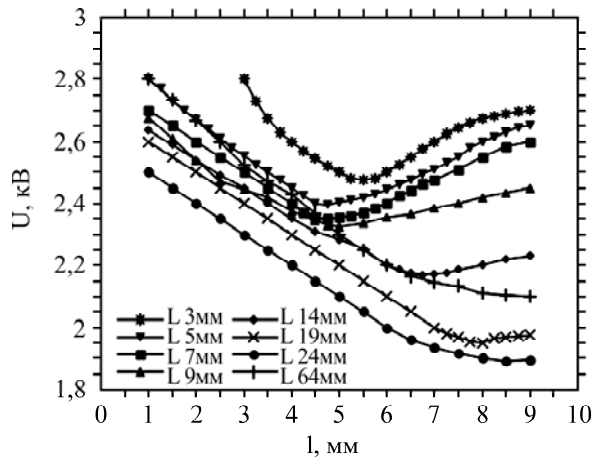


Рис. 3. Распределение величин напряжения пробы в горизонтальном сечении факела для смеси стехиометрического состава (изображение факела, рис. 2а).

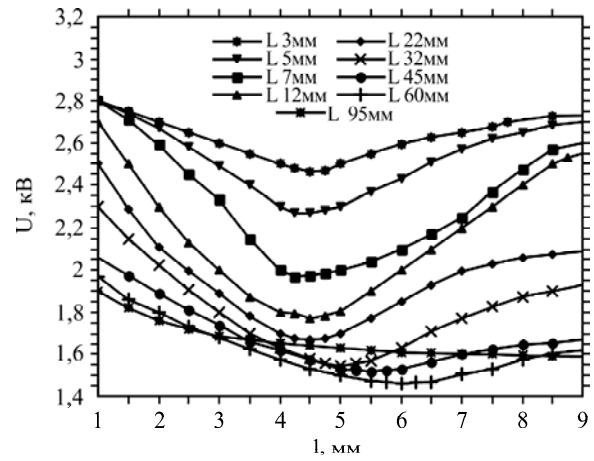


Рис. 4. Распределение величин напряжения пробы в горизонтальном сечении факела для обогащённой смеси (изображение факела, рис. 2б).

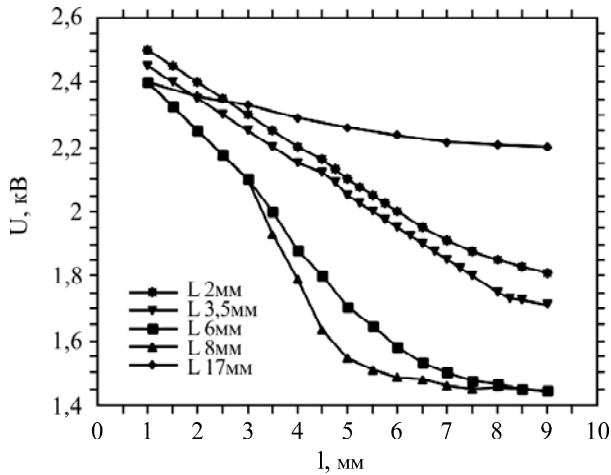


Рис. 5. Распределение величин напряжения пробы в горизонтальном сечении факела для обеднённой смеси (изображение факела, рис. 2в).

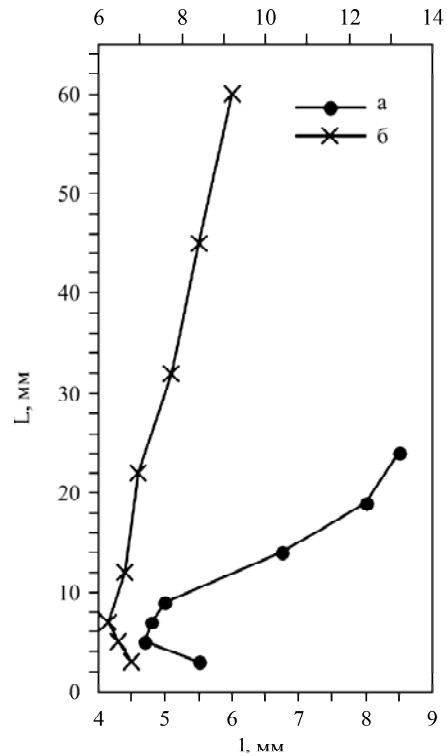


Рис. 6. Вертикальные распределения местоположения вдоль оси симметрии факела минимумов величин напряжений электрического пробы факела в зависимости от их положения в горизонтальных распределениях. *a* – стехиометрическое соотношение; *б* – обогащённая смесь.

мированный (замкнутый в верхней части) внутренний конус – наступлению режима пульсационного горения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты дают основание утверждать, что изменения, происходящие в факеле при переходе горения исходного состава смеси от обогащённого к обеднённому, носят следующий характер.

Пламя обогащённой смеси (рис. 2б) имеет большие линейные размеры, мало структурировано, в нем на значительном удалении от торца горелки напряжение пробы сохраняет низкие

значения (рис. 4). Значение величины напряжений пробы может определяться наличием в пламени избыточных радикалов, сохранившихся от реакций во фронте горения пламени, результатом разветвлённых цепных реакций, мелкодисперсных частиц, возникающих при пиролизе исходной смеси. В любом случае необходимо отметить, что практически вдоль всего факела в пламени существуют электрически заряженные, химически активные частицы, которые могут выходить за пределы оптических границ факела. Лимитирующим компонентом является воздух первичной горючей смеси. Роль вторичного воздуха незначительна.

Зафиксировав уровень подачи воздуха и уменьшая уровень подачи газа, можно достичь стехиометрического соотношения воздух–пропан–бутановая смесь. При этом образуется замкнутый внутренний конус пламени (рис. 2а), наличие которого соответствует наступлению пульсационного режима горения пламени. По сравнению с обогащённой смесью возрастает также величина напряжения электрического пробоя в пределах внешнего конуса (рис. 3), указывая на более полное сгорание газа. Структура факела определяется балансом трёх компонент: первичного и вторичного воздуха и горючего газа. Причём вторичный (атмосферный) воздух оказывает значительное влияние на форму внутреннего конуса пламени.

Дальнейшее уменьшение уровня подачи газа (обеднение смеси) приводит к уменьшению линейных размеров факела (рис. 2в), уширению фронта реакций в зону. Увеличивается напряжение электрического пробоя в пределах внешнего конуса и уменьшается в пределах малого (рис. 5). Амплитуда и частота фиксируемых оптических пульсаций яркости [5] зависят от соотношения окислитель–газ и определяемой этим соотношением геометрической структуры факела. Лимитирующий компонент – содержание пропан–бутана в первичной горючей смеси.

Таким образом, при переходе от стехиометрического соотношения к обеднённой смеси возрастает температура горения, что обуславливает увеличение как количества радикалов, поставляемых избыточным окислителем, так и теплового потока навстречу движению горючей смеси. Это способствует предварительной предпламенной подготовке последней и геометрическому уширению фронта реакции, который превращается в зону. По мере обеднения смеси увеличиваются линейные размеры зоны горения, а местоположение её в факеле приближается к соплу. Так, исходя из данных работ [8, 9], линейные размеры такой зоны в направлении движения потока могут достигать 6–8 мм. При этом наступает пульсационный режим горения, механизм которого [5] определяется наличием в исходной смеси локальных объёмов с отличающимся от среднего соотношением окислитель – горючее.

ВЫВОДЫ

- Из электрических и оптических измерений определена структура факела, соответствующая переходу горения в пульсационный режим, наступающий при условии формирования замкнутого внутреннего конуса факела.

- Отмечается, что при переходе к пульсационному режиму горения фронт пламени расши-

ряется в зону горения, размеры и местоположение которой зависят от соотношения окислитель–горючее в исходной смеси.

- Обращается внимание на роль внешнего воздуха при формировании структуры факела, горящего в режиме стехиометрического соотношения.

- Для органических горючих, которым свойственна неоднозначность последовательности промежуточных химических реакций, предлагается определение понятия стехиометрического соотношения, исходя из оптической структуры факела.

ЛИТЕРАТУРА

1. Палиев И.И., Кацнельсон Б.Д., Таракановский А.А. Теплообмен и массообмен частиц в потоке при пульсациях. *Труды II Всесоюзной научно-технич. конф. по вибрационному и пульсационному горению*. Казань: Изд-во Казан. Ун-та, 1963. С. 150–162.
2. Накоряков В.Е., Бурдуков А.Т., Болдарев А.М., Терлеев П.В. *Тепло- и массообмен в звуковом поле*. Новосибирск: Наука, 1970. 253 с.
3. Подымов В.Н., Северянин В.С., Щелоков Я.М. *Прикладные исследования вибрационного горения*. Казань: Изд-во Казан. Ун-та, 1978. 219 с.
4. Трофименко М.Ю., Асланов С.К., Калинин В.В., Зуй О.Н., Олешко Г.М. Исследование пульсационного горения пропан–бутановой смеси вблизи пределов его существования. *Физика аэродисперсных систем*. 2005, (42), 104–111.
5. Трофименко М.Ю., Асланов С.К., Калинин В.В. Об условиях самовозбуждения пульсационного режима горения открытого факела пропан–бутановой смеси. *Химическая и радиационная физика*. Под ред. И.Г. Ассовского, А.А. Берлипа, Г.Б. Манелиса, А.Г. Мержанова. М.: Торус Пресс, 2011. Том 4. С. 236–241.
6. Лаутон Дж., Вайнберг Ф. *Электрические аспекты горения*. М.: Энергия, 1976. 294 с.
7. Гейдон А.Г., Вольфгард Х.Г. Пламя, его структура, излучение и температура. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по чёрной и цветной металлургии, 1959. 333 с.
8. Trofimenko M.Yu., Aslanov S.K., Kalinchak V.V., Smolyar V.P. The Electrical Structure of Propane-butane Mixture Torch and it's Changing at the Beginning of Pulse Burning Mode. *Proceedings of 3rd International Conference on the Physics of Dusty and Burning Plasmas*. Odessa, Ukraine, August 25–29, 2010. pp. 135–136.
9. Трофименко М.Ю., Асланов С.К., Калинин В.В., Смоляр В.П., Тищенко Г.А. Изменение структуры факела пропан–бутановой смеси при переходе её горения в пульсационный режим. *Материалы XXIV научной конференции стран СНГ «Дисперсные системы»*, 20–24 сентября 2010. Одесса, Украина, 2010. С. 292–293.

Поступила 15.01.13

Summary

The combustion, in the air atmosphere, of an open flame consisting of the town gas and air is examined. The concept of the stoichiometric ratio is specified more precisely for such system. Three cases of combustion are specified for: the enriched mixture, stoichiometric mixture and deluted mixture. For each case, by electric

and optic measurements, the flame structure and its rearrangements during the transition to the pulsating mode are found. A significant role of the secondary (ambient, atmospheric) air is noted for the stoichiometric mixture burning.

Keywords: electrical breakdown, flame, flame structure, stoichiometry.