

Отчет по гранту

Фонда поддержки молодых ученых ОИВТ РАН

Получатель: Матвеева Наталья Андреевна

Подразделение: Лаборатория 1.1.2.2. Неравновесных процессов

Научный руководитель: Михеева Екатерина Юрьевна

Измерение температуры при воспламенении горючих смесей за ударными волнами методом эмиссионно-абсорбционной спектроскопии

Целью данного проекта являлось экспериментальное и теоретическое исследование характера изменения температуры при ударно-волновом инициировании воспламенения горючих смесей $10\text{-}20\%$ ($\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$) + Ar и $10\text{-}20\%$ ($\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\% \text{O}_2$) + Ar в диапазоне температур $T_5=900\text{-}1700 \text{ K}$ и давлений $p_5=3\text{-}5 \text{ бар}$ с одновременным измерением временных профилей давления и температуры.

Эксперименты проводились в лаборатории «Неравновесных процессов» ОИВТ РАН на установке «ИРИС» на базе ударной трубы. Параметры за падающей ударной волной (ПУВ) и отраженной ударной волной (ОУВ) рассчитывались по измеренной скорости ПУВ. Скорость определялась путем измерения времени прохождения ПУВ между двумя пьезоэлектрическими датчиками давления, расположенных на расстоянии 94 мм друг от друга (рис. 1).



Рис. 1. Осциллограмма с датчиков давления, установленных в ударной трубе

С помощью временного профиля давления (рис. 2) измерялся период задержки воспламенения (время от момента прихода ОУВ до момента воспламенения).

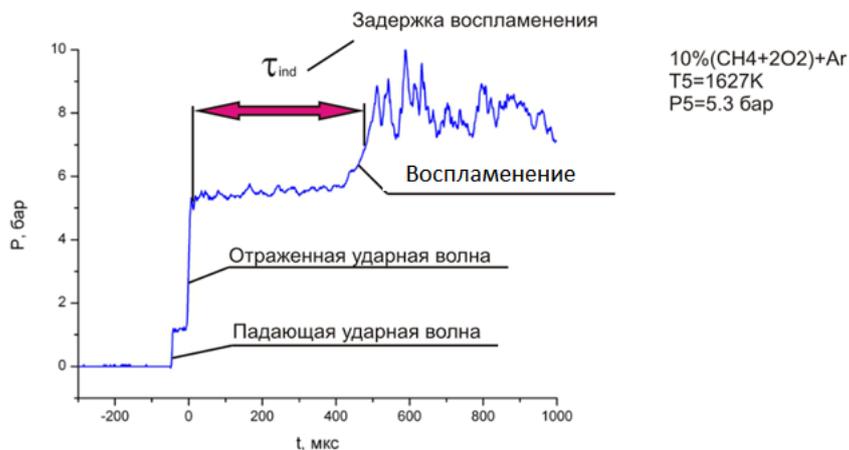


Рис. 2. Временной профиль давления, измеренный в газовой смеси $10\%(\text{CH}_4+2\text{O}_2)+\text{Ar}$, параметры за ОУВ: температура $T_5=1627\text{ K}$ и давление $p_5=5,3\text{ бар}$.

Кроме экспериментального исследования проводилось кинетическое моделирование процесса воспламенения в программе Chemkin. Для смеси метан/кислород использовался кинетический механизм из работы [1], для смеси ацетилен/кислород из работы [2]. Во время эксперимента во всех режимах было замечено, что возрастание давления в момент воспламенения совпадает с интенсивным ростом концентрации радикала OH. Теоретические задержки воспламенения в метано-кислородных и ацетилено-кислородных смесях были определены как время от начала расчета до момента резкого возрастания концентрации радикала OH. Графики изменения концентрации радикала OH для серии экспериментов представлены на рис. 3.

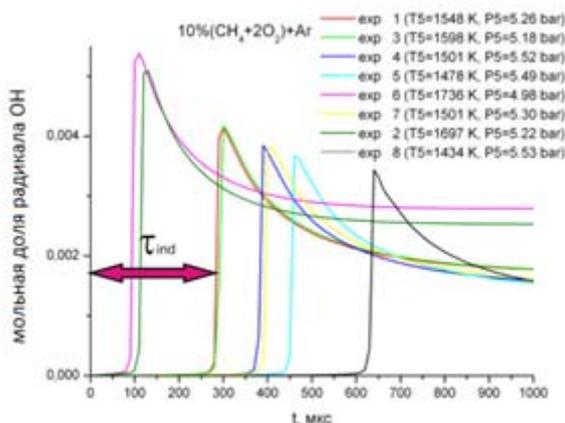


Рис.3. График изменения концентрации радикала OH(расчет) для серии экспериментов в смеси $10\%(\text{CH}_4+2\text{O}_2)+\text{Ar}$

В рамках данной исследовательской работы предложен метод диагностики температуры газовой среды за ОУВ – метод эмиссионно-абсорбционной спектроскопии, основанный на одновременном измерении излучения и поглощения газовой среды. Один оптический канал использовался для регистрации сигнала излучения, тогда как на другом оптическом канале регистрировался суммарный сигнал излучения среды и поглощения света от источника сравнения.

Оптическая схема представлена на рис.4. В качестве источника сравнения для измерения поглотительной способности среды была использована вольфрамовая светоизмерительная лампа СИ10-300у с ленточным телом накала. Измерения проводились на длине волны 589 нм, соответствующей резонансной линии натрия. Натрий присутствовал в системе в качестве естественной примеси аргона. Яркостная температура лампы на диагностической длине волны варьировалась в диапазоне 1800-2200К. Свет от лампы фокусировался собирающей линзой 1 на разделительной пластине 2, содержащей два одинаковых отверстия диаметром 2,3 мм, расположенных на расстоянии 2,6 мм друг от друга. С помощью собирающей линзы 3 изображение лампы фокусировалось в центре ударной трубы. За выходным окном УТ собирающей линзой 4 световой поток от каждого канала фокусировался на разделительную зеркальную призму 5 и далее через алюминиевые зеркала 6, 7 и собирающие линзы 8, 9 через светофильтры 10, 11 регистрировался при помощи ФЭУ-ФОТОН 12, 13. Расстояние между лампой и линзой 1, линзой 1 и разделительной пластиной 2, разделительной пластиной 2 и линзой 3, линзой 3 и центром исследовательского сечения УТ равнялось удвоенному фокусному расстоянию соответствующей линзы для получения действительного изображения лампы в центре УТ.

Излучение от лампы проходило через линзы и окна ударной трубы. Потери интенсивности излучения в видимой области составляют порядка 4% на каждой поверхности. Для измерения температуры лампы с учетом потерь в центре УТ было установлено алюминиевое зеркало. Яркостная температура на поверхности зеркала была измерена с помощью пирометра IMPAC IS 140 и пересчитана в истинную температуру. Пирометр был установлен напротив торца УТ, причем торцевой фланец был снят. Таким образом, между зеркалом и пирометром не находилась никакая оптика. Яркостная температура, соответствующая длине волны 589 нм (d-линия натрия), была рассчитана с учетом известной излучательной способности вольфрама.

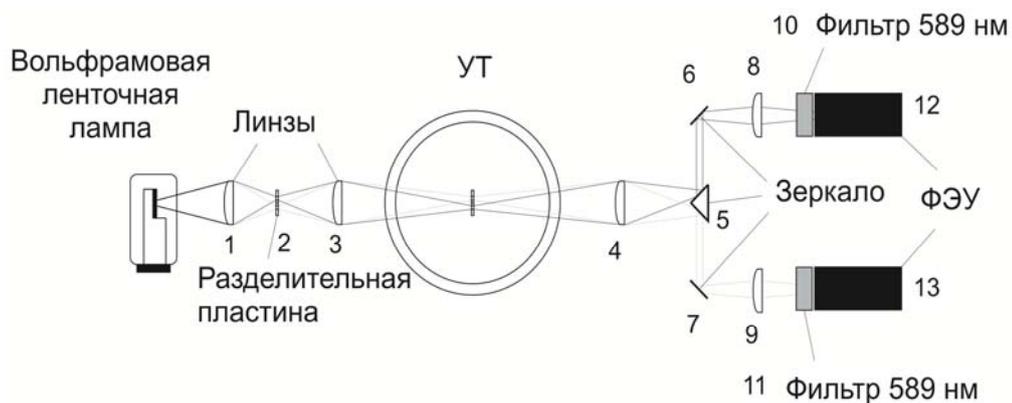


Рис 4. Схема измерения температуры методом абсорбционно-эмиссионной спектроскопии. 1, 3, 4, 8, 9 – собирающие линзы; 2 – разделительная пластина с двумя одинаковыми отверстиями (диаметр отверстия 2.3 мм, расстояние между отверстиями 2.6 мм); 5 – зеркальная призма; 6, 7 – алюминиевые зеркала; 10, 11 – узкополосные светофильтры; 12, 13 – фотоэлектронные умножители

Итоговые калибровочные кривые: зависимость истинной и яркостной температуры от силы тока представлены на рис.5.

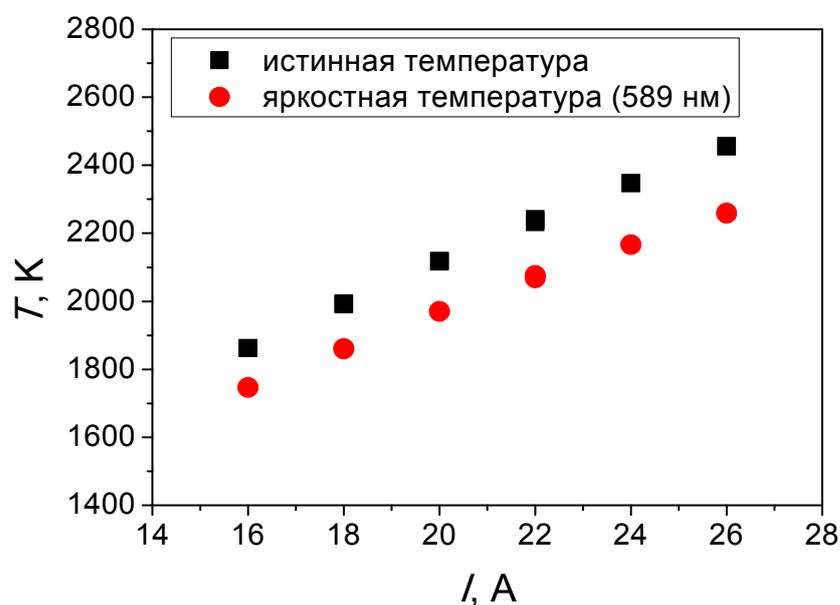


Рис.5. Калибровочная зависимость температуры вольфрамовой ленточной лампы

Для апробации диагностики были проведены измерения температуры в нереагирующих смесях аргона с добавками диоксида кислорода и кислорода. Исследования проводились за ОУВ в диапазоне температур $T_5=1700-3080$ К и давлений $P_5=6-8$ бар. Полученные значения $T_{изм}$ в зависимости от начальной температуры за ОУВ T_5 представлены на рис.6.

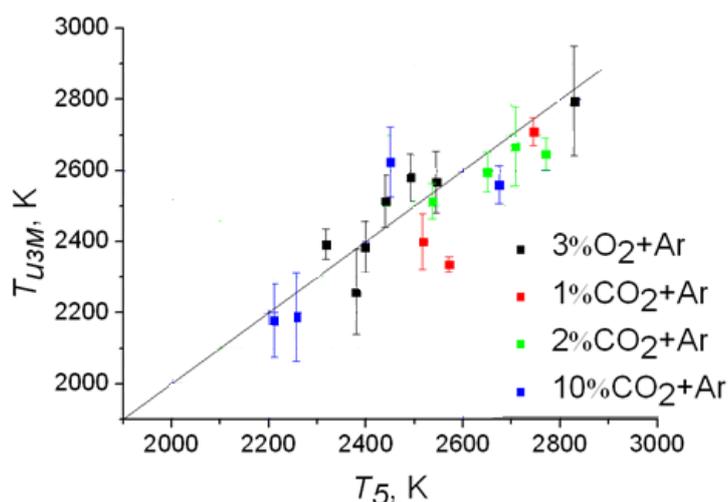


Рис. 6. Зависимость измеренной температуры от начальной температуры за ОУВ T_5 в смесях $3\%O_2+Ar$, $1\%CO_2+Ar$, $2\%CO_2+Ar$, $10\%CO_2+Ar$

В ходе работы выяснилось, что температура в интересующем нас диапазоне может меняться из-за диссоциации кислорода и углекислого газа. Для оценки величины падения температуры в связи с расходом энергии на частичную диссоциацию была проведена количественная оценка по определению зависимости изменения температуры в результате диссоциации от T_5 для всех смесей. Кинетическая оценка проводилась, используя литературные данные для распада кислорода [3] и углекислого газа [4]. Диссоциация становится существенной только при достаточно высоких температурах (от 2600 К). График зависимости измеренной температуры от начальной с учетом диссоциации представлен на рис. 7.

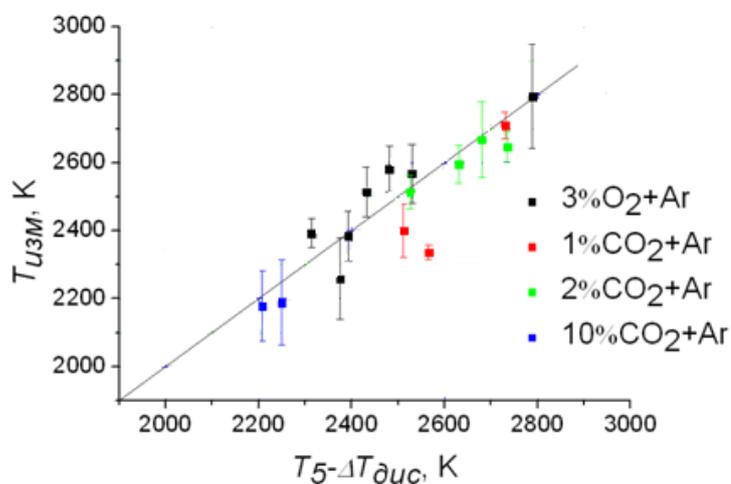


Рис. 7. Зависимость измеренной температуры $T_{изм}$ от начальной T_5 с учетом диссоциации в смесях $3\%O_2+Ar$, $1\%CO_2+Ar$, $2\%CO_2+Ar$, $10\%CO_2+Ar$

При исследовании смесей 20% (CH_4+2O_2) + Ar и 20% ($\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5 \text{ O}_2$) + Ar выяснилось, что температура после воспламенения поднимается выше 3000 К. В связи с ограничением максимальной температуры источника сравнения (вольфрамовой лампы) измерения в данных смесях имели погрешность более 10%, поэтому было принято решение перейти к меньшей концентрации горючего.

Экспериментально полученные температурные зависимости задержек воспламенения для смесей 10% (CH_4+2O_2) + Ar и 10% ($\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5 \text{ O}_2$) + Ar представлены точками на рис. 8. Результаты моделирования неплохо согласуются с экспериментом – линии на рис.8. Однако теоретически предсказанные задержки для смеси 10% (CH_4+2O_2) + Ar оказались меньше, чем экспериментальные, а для смеси 10% ($\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5 \text{ O}_2$) больше, чем экспериментально полученные, во всем диапазоне температур.

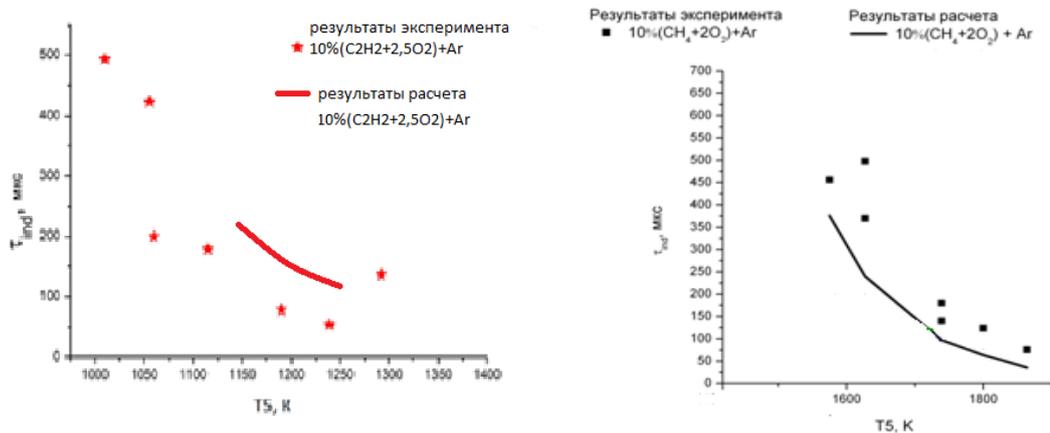


Рис.8. Сравнение экспериментально полученных задержек воспламенения (точки) с теоретическими задержками, предсказанными по кинетическим моделям [1,2] (кривые) в смесях 10%($\text{C}_2\text{H}_2+2,5\text{O}_2$)+Ar (слева) и 10%(CH_4+2O_2)+Ar (справа)

Соответствующие временные профили температуры, измеренные после момента воспламенения в смесях 10% (CH_4+2O_2) + Ar и 10% ($\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5 \text{ O}_2$) + Ar, представлены на рис. 9. Временного разрешения измерений (порядка 10-20 мкс) не хватило, чтобы измерить рост температуры во время протекания химических реакций воспламенения. Далее в течение порядка 500-700 мкс после момента воспламенения значение температуры в реакторе оставалось постоянным. Наблюдаемые осцилляции являются следствием турбулизации, вызванной горением. Измеренные значения температуры соответствуют

равновесной температуре продуктов горения. Установлено, что величина измеренной температуры в зоне горения не зависит от начальных параметров (P_5 , T_5).

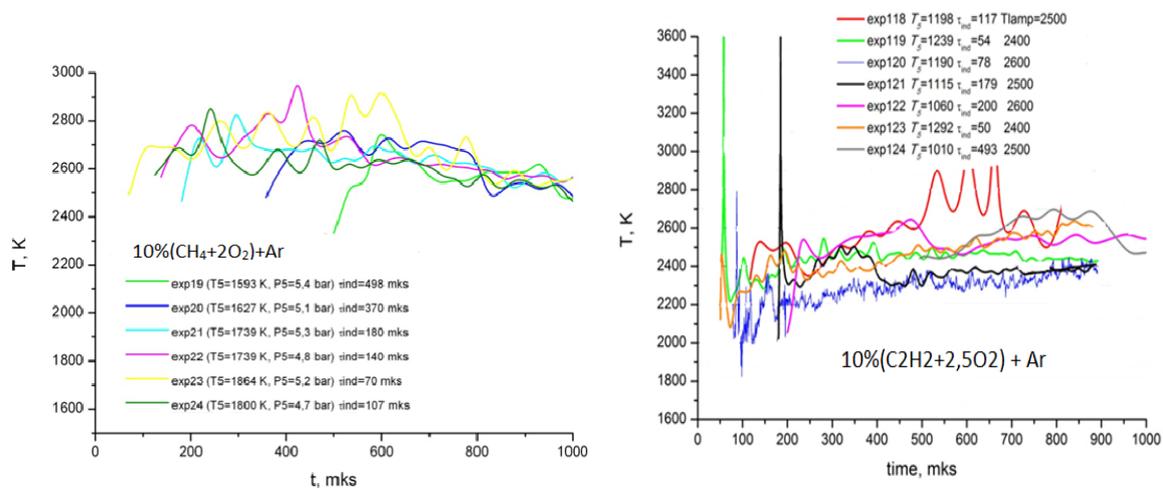


Рис. 9. Графики изменения температуры от времени для смесей $10\%(C_2H_2+2,5O_2) + Ar$ (справа) и $10\%(CH_4+2O_2) + Ar$ (слева) при различных начальных условиях.

В рамках дальнейшей работы предполагается измерение температуры в зоне индукции до момента воспламенения горючих смесей в ИК области, что позволит уточнить кинетические механизмы воспламенения метана и ацетилена и получить больше сведений о процессах горения

Выступления:

Доклад представлен на Всероссийской конференции «Студенческая научная весна 2015». МГТУ им. Н. Э. Баумана, Первое место в разделе «теплофизика»

Список литературы:

- 1-GRI-Mech 3.0, http://www.me.berkeley.edu//gri_mech/, Wang H, Dames E, Sirjean B, Sheen DA, Tangko R, Violi A, et al. JetSurF version 2.0. Available from: <http://www.stanford.edu/group/haiwanglab/JetSurF/>
- 2 -Hai Wang, Alexander Laskin, „A Comprehensive Kinetic Model of Ethylene and Acetylene oxidation at High Temperatures, Optimization of a Comprehensive Detailed Chemical Kinetic Model for Simulating High-Speed Propulsion p.p1-67.
- 3-И. Jerig L., Thielen K., Roth P Journal AIAA J, Title – High temperature dissociation of oxygen diluted or nitrogen. 1991. AIAA Journal, vol. 29, issue 7, pp. 1136-1139
- 4-Burmeister, Roth, ARAS measurement on the thermal decomposition of CO₂ behind shock waves. 1990. AIAA Journal, Vol. 28, No. 3 (1990), pp. 402-405.

