

Слайд 1

Приветствие

Слайд 2

Мотивацией для данной работы послужили следующие факторы:

- Недостаток экспериментов по исследованию бедных водородно-воздушных пламен
- Отсутствие простых методов исследования 3D фронта пламени
- Важность знания скорости распространения бедных водородно-воздушных пламен для оценки рисков разрушений, вызванных газовыми взрывами.

Слайд 3

Была замечена следующая проблема. На графике представлены результаты расчета коэффициента складчатости французской группой ученых. Коэффициент складчатости – это *по слайду*. Видно, что разброс данных достигает практически 100%, что свидетельствует о несовершенстве модели данных авторов. Это заставило задуматься о создании более точной модели.

Слайд 4

Практически во всех работах, связанных с исследованием распространения пламени при помощи инфракрасных камер, складчатая неустойчивая граница фронта пламени неразличима. В работах Groethe и Mogi лучше всего показан фронт водородно-воздушного пламени. Однако точные параметры съемки в публикациях не описывались. Как видно, съемка производилась с большим временем экспозиции, что видно по очень яркому облаку пламени. При этом плохо различима его граница. Таким образом, было принято решения двигаться в сторону повышения чувствительности инфракрасной камеры.

Слайд 4

Основные цели данной работы, следующие:

- Создать новый метод визуализации пламени на основе инфракрасной термографии;
- Определить его границы применимости и точность пространственных измерений;
- Рассчитать с использованием данного метода коэффициент складчатости;
- Определить скорость распространения бедного водородно-воздушного пламени;

Слайд 5

Как известно, любое нагретое тело излучает в инфракрасном диапазоне. Продуктом окисления водорода является вода. Вода способна излучать в инфракрасном спектре и видна сквозь окна прозрачности атмосферы. Несгоревшая смесь, а именно смесь газов, состоящая из водорода и воздуха, при переходе через фронт пламени нагревается, окисляется и в результате образуются продукты горения – водяной пар с температурой в несколько тысяч кельвин. Данное облако регистрируется инфракрасной камерой. Мы предполагаем, что продукты сгорания неподвижны и имеют постоянную температуру, равную температуре продуктов адиабатического сгорания в течение всего времени распространения пламени. Это важное замечание помогает обосновать использование ик-камеры в нестационарном процессе.

В инфракрасном спектре излучают только колеблющиеся молекулы. Молекула воды является имеет 3 основные частоты, соответствующие симметричному - ν_1 , деформационному - ν_2

и асимметричному - v_3 типам колебаний. Переход между первыми симметричными и несимметричными уровнями характеризуются излучением с длиной волны около 2,7 мкм. Колебательное возбуждение уровней 001 и 100 происходят в результате равновесной населенности колебательных степеней свободы. Переход 020 → 000 обладает гораздо меньшей вероятностью, поэтому не учитывается. При этом обычно уровень 020 дезактивируется через 010, что соответствует большей длине волны – 6,3 мкм.

Слайд 7

Заселение валентных колебательных уровней происходит в процессе поступательно-колебательной релаксации. Число колебательных переходов с испусканием фотонов с длиной волны 2.7 мкм пропорционально заселенности соответствующих уровней. Равновесная концентрация возбужденных молекул определяется распределением Больцмана. Определим отношение интенсивности излучения переходов 100 → 000 и 001 → 000 в несгоревшей смеси при начальной температуре, температуре в начале и конце предпрогревного слоя и в продуктах сгорания. Интенсивность излучения газа зависит от температуры, концентрации водяного пара и полной концентрации газа.

Слайд 8

В качестве начального значения будем полагать излучение горючей смеси при начальной температуре. Исходя из отношений интенсивности каждого слоя к интенсивности излучения переходов, получим, что интенсивность излучения продуктов сгорания на 3 порядка выше, чем интенсивность в конце предпрогревного слоя. Таким образом становится понятно, что излучение, регистрируемое камерой, является объемным излучением продуктов горения. В зависимости от толщины излучающего слоя меняется его интенсивность.

Слайд 9

Была собрана установка для регистрации полусферического пламени инфракрасной и высокоскоростной камерами. ИК - камера располагалась на расстоянии от фронта для того, чтобы пучок расходящихся от пламени лучей был как можно более параллельным. Перпендикулярно ей через теневой прибор ИАБ-451 осуществляла съемку высокоскоростная камера. Начало съемки камерами было синхронизировано с моментом поджига смеси. Также осуществлялась покадровая синхронизация между камерами. Полусферичность пламени достигалась путем установки плексигласовой пластины – непрозрачной в ИК-диапазоне. Газовая смесь состояла из 15% водорода и 85% воздуха. Смесь выдерживалась в баллоне не менее суток. На пластину натягивалась латексная оболочка, удерживающая газ.

Слайд 10

Результатом таких экспериментов стала серия ик-кадров и теплерограмм, со скоростью съемки 300 кадров в секунду и различной экспозицией 10, 5, и 3 мкс для ик-камеры и 100 мкс для высокоскоростной. Сопутствующая ик-камере программа может интерпретировать изображения в различных палитрах и единицах. На картинке представлены исходные ик-изображения, а также в кельвинах и милликельвинах. Изображения, представленные в единицах температуры натолкнули на идею о создании трехмерной картины фронта по ик-изображению. Как видно, имеются несколько областей разного цвета. Мы провели аналогию таких изображений с томографическими слоями трехмерной картины.

Слайд 11

Рассмотрим изображения фронта пламени в двух плоскостях. Представлен график зависимости радиуса пламени от времени. На графике указаны средний радиус, полученный

после программной обработки инфракрасных изображений, а также радиус фронта пламени перпендикулярный пластине и вдоль пластины, полученный после обработки теневых изображений. Небольшой разброс данных в пределах 1го процента указывает на сохранение полусферичности фронтом пламени. Погрешность измерений не превышает размера точки на графике.

Слайд 12

Реконструкция трехмерного изображения из плоского ИК требует определенных предположений: по слайду. Задача сводится к нахождению функции зенитных (θ) и азимутальных (ϕ) углов, описывающих фронт пламени. Интеграл от искомой функции вдоль оси z для фиксированных значений x и y должен быть функцией количества излучения в соответствующей точке на изображении. Точка искрового промежутка, в которой проводилось зажигание, была принята за центр облака продуктов сгорания. Координаты x_p и y_p – проекции точек фронта пламени на плоскости изображения.

Предположим, что фронт пламени описывается уравнением ____ . Это уравнение означает, что к среднему радиусу добавлено волновое возмущение, моделирующее неустойчивость пламени. Исходя из предположений и математических выкладок получаем следующую систему с ограничением на максимальный зенитный угол.

Слайд 13

На этом слайде представлены изображения ик и восстановленные по ним трехмерные картины. В качестве сравнения приведены изображения из работы Кузнецова, в которой автор проинтегрировав уравнение Сивашинского построил трехмерную модель фронта пламени.

Слайд 14

По полученным трехмерным картинам с использованием метода триангуляции можно посчитать площадь поверхности пламени. Как уже было сказано: отношение площади морщинистого неустойчивого пламени к площади сферы с аналогичным средним радиусом называется фактором складчатости Ξ и является характеристикой ускорения фронта. В двумерном случае экспериментально можно рассчитать этот параметр через отношение длины гладкой окружности к морщинистой. Результат представлен на графике. Видно, что значения коэффициента в трехмерном случае больше двумерного в 2 раза.

Слайд 15

С использованием предложенной формулы можно посчитать скорости.

Слайд 16

Выводы.

Слайд 17

Публикации автора