

А. Р. Мухутдинов, З. Р. Вахидова

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ КАРТИНЫ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Ключевые слова: фоторегистрация, горение, твердое топливо, температура, среда, картина, процесс.

Представлены результаты изучения процесса горения твердого топлива с использованием информационных технологий. Разработано прикладное программное средство, способное повышать качество фотоснимков, анализировать изображение и определять по результатам анализа температуру горения топлива.

Keywords: photo registration, combustion, solid fuel, temperature, environment, painting process.

The results of the study of the combustion of solid fuels with the use of information technology. Developed software tools that can improve the quality of photos, to analyze the image and determine the results of the analysis of the temperature of combustion.

Анализ применения твердого топлива (ТТ) аммиачно-селитренного состава (АСС) в автономных теплогенерирующих устройствах, используемых для интенсификации нефтедобычи, выявил случаи аварийного режима их работы. Широкое применение ТТ в различных технических системах и технологиях инициирует дальнейшее исследование механизма процесса горения ТТ. Горение ТТ в условиях газовой среды при высоком давлении в научной литературе представлен широко [1-6]. Известно, что наиболее объективным методом исследования картины процесса горения ТТ является – фоторегистрация. Однако, несмотря на значительное число работ [1-4], задача получения качественной картины процесса горения топлива является в значительной мере нерешенной. Причиной низкого качества фотографий процесса горения ТТ в газовой среде является малая прозрачность наблюдаемой картины, вызванная продуктами сгорания. Предлагаемый в работе [6] способ повышения прозрачности картины горения ТТ за счет обдува продуктов сгорания в манометрической бомбе потоком инертного газа снизу образца топлива не привели к заметному повышению качества фотоснимков. Помещение сжигаемого образца топлива в плексигласовую трубку, прилегающую к защитному стеклу оптического окошка манометрической бомбы, также не дали положительного результата. Так как, материал из плексигласа легко обгорает и затемняет картину. Решение проблемы повышения прозрачности наблюдаемой картины достигли в работе [7] путем замены в манометрической бомбе защитного органического стекла из плексигласа на неорганическое, в частности термостойкое кварцевое стекло. Это предохраняет поверхность основного плексигласового оптического окошка от высокотемпературного воздействия при сгорании образца, непосредственно прилегающего к кварцевому стеклу, и дает возможность получения более четкой картины процесса горения. Кварцевое стекло является инертным материалом, которое не взаимодействует с нагретыми продуктами горения и обладает высокой оптической прозрачностью.

Изучение картины процесса горения ТТ в жидкой среде при высоком давлении проводилось в бомбе переменного давления с регистрацией процесса методом фоторегистрации с использованием информационных технологий. Стендовая установка (рис. 1),

основой которой является манометрическая бомба переменного давления внутренним объемом 0,3 л, состоящая из корпуса (2) и двух оптических окошек из органического стекла (3, 8). При этом одно окошко (8) имеет электроввод для подачи электрического тока к спирали узла воспламенения сжигаемого образца (9), который устанавливается в бомбе таким образом, что его неорганическое стекло оптически плотно прилегает к другому окошку (3). Замена в манометрической бомбе защитного органического стекла из плексигласа на неорганическое позволило исключить воздействие газообразных продуктов горения на четкость изображения пламени и поверхность горения образца ТТ.

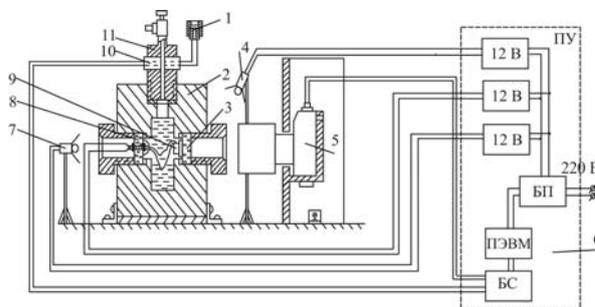


Рис. 1 – Схема стендовой установки: 1 - предохранительный клапан; 2 - корпус манометрической бомбы; 3, 8 - оптическое окошко; 4, 7 - лампа осветительная; 5 - фотокамера; 6 - регистрирующая аппаратура; 9 - образец, закрепленный на кварцевом стекле; 10 - датчик давления; 11 - крышка

Применение дополнительной подсветки (4, 7) значительно повышает качество фотоснимков и видеосъемки. Регистрация процесса горения осуществлялась цифровой фотокамерой *Canon EOS 350D*. Фотокамера размещалась по оси оптических окошек за предохранительным щитом. Съемка производилась в ручном режиме с расстояния 36 мм с выдержкой 1/30 секунды при полностью открытой диафрагме. Фиксирование картины и изменения давления во времени процесса горения ТТ осуществляется на регистрирующей аппаратуре (6), состоящей из блока сопряжения (БС) и персонального компьютера (ПЭВМ).

Интенсивное развитие аппаратных и программных средств вычислительной техники открывает новые возможности для исследования процесса горения твердого топлива (ТТ) [8]. Современные персональные компьютеры позволяют проводить обработку и анализ данных любой сложности, а интеллектуальные программы осуществлять распознавание объектов, разнообразные виды расчетов и прогнозирование [9]. Следует также отметить, что еще одним перспективным путем повышения качества фотоснимков является применение современных методов обработки информации, основанных на использовании информационных технологий. В связи с этим актуальным является разработка прикладного программного средства для повышения качества фотоснимков и определения температуры горения ТТ по графическому изображению данного процесса. Поэтому эффективность предлагаемого подхода повышения качества фотоснимков и профессиональная обработка изображений на усовершенствованной установке в работе проверяется с помощью современных информационных технологий.

Определению значения температуры горения ТТ посвящено большое количество работ и предложено много методов [10, 11]. Однако есть возможность определения температуры и с помощью визуальных и графических средств. К первым относятся пирометры, позволяющие измерить температуру непрозрачных тел по их излучению в оптическом диапазоне спектра. Ко вторым относится метод определения температуры по изображениям, полученным в ходе изучения процесса горения. Существуют различные алгоритмы обработки и анализа изображений, которые позволяют с высокой точностью получать данные из их графического представления. Это позволяет максимально автоматизировать длительные и трудоемкие процессы по обработке информации.

В работе разработано программное средство (фрагмент листинга программы представлен на рис. 2), способное повышать качество фотоснимков, анализировать изображение и определять по результатам анализа температуру горения топлива (окна программы представлены на рис. 3). В качестве входных данных приложение получает набор цифровых фотографий процесса горения, задаются критерии анализа и оценки изображений. Пример анализа изображения и получения на его основе гистограммы приведен ниже.

Гистограмма обеспечивает общее описание сущности изображения и помогает идентифицировать различные компоненты, такие как фон и объекты, показывает количественное распределение пикселей с определенным значением уровня (яркости). Распределение пикселей по их отражательным (излучающим) свойствам может быть изучено путем анализа гистограммы значений яркости как для целого изображения, так и для конкретного участка. Гистограмма позволяет выяснить, имеются ли пиксели, соответствующие различным областям температуры на исследуемом изображении, а также узнать, происходит ли изменение яркости пикселей во всем диапазоне или же пределы их изменения невелики.

```
private Histogram red = null;
private Histogram green = null;
private Histogram blue = null;

public void ImageStatistics(Bitmap image)
{
    // Получение размеров изображения
    int width = image.Width;
    int height = image.Height;
    int pixels = width * height;

    // Блокировка данных изображения
    BitmapData imgData = image.LockBits(new Rectangle(0, 0, width, height),
    ImageLockMode.ReadOnly, PixelFormat.Format24bppRgb);

    // Создание спецмассивов
    int[] r = new int[256];
    int[] g = new int[256];
    int[] b = new int[256];
    RGB rgb = new RGB();
    int offset = imgData.Stride - width * 3;

    // Обработка изображения
    unsafe
    {
        byte* p = (byte*) imgData.Scan0.ToPointer();
        for (int y = 0; y < height; y++)
        {
            for (int x = 0; x < width; x++, p += 3)
            {
                r[p[RGB.R]]++;
                g[p[RGB.G]]++;
                b[p[RGB.B]]++;
            }
            p += offset;
        }
    }

    // Разблокировка данных
    image.UnlockBits(imgData);

    // Получение гистограмм
    red = new Histogram(r);
    green = new Histogram(g);
    blue = new Histogram(b);
}
}
```

Рис. 2 – Фрагмент листинга программы

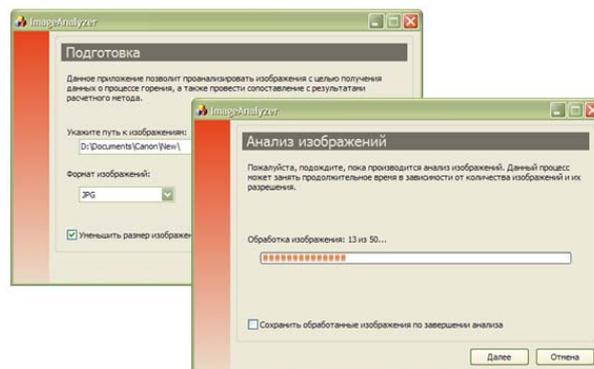


Рис. 3 – Окна программы для ввода данных и анализа изображений

Изучение картины процесса горения ТТ осуществлялось на опытных образцах с рецептурой, % (мас.): аммиачная селитра (АС) - 72; бихромат калия (БК, катализатор) - 3; эпоксидный компаунд (ЭК) - 25, оптимизированной в работе [12] для автономного теплогенерирующего устройства. Исследуемый образец прилегает непосредственно к оптическому окошку бомбы (рис. 1), что предопределяет его форму в виде прямоугольного сечения с ограниченными размерами оптического окошка. В опытах использовалось кварцевое стекло диаметром 30 мм и толщиной 3 мм, на котором в специальной оправе-формочке прессовался образец ТТ. Герметичное покрытие, состоящее из слоя ЭК, обеспечивает надежную защиту от влияния жидкой среды и давления, а также прочное крепление исследуемого образца к кварцевому стеклу. Воспламенение и сжига-

ние образцов ТТ осуществляется с верхнего торца заряда при давлениях от атмосферного (0,1 МПа) до 10 МПа. Результаты фоторегистрации представлены на цифровых фотоснимках рис. 4.

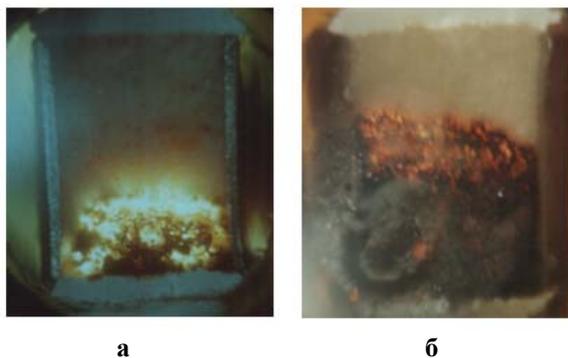


Рис. 4 – Картина процесса горения образца топлива в газовой (а) и жидкой (б) средах

Применение в стендовой установке цифровой фотокамеры и ПЭВМ позволяет быстро (высокоскоростной интерфейс *USB 2.0*) выводить полученный снимок на экран монитора. Мощный процессор обработки изображений *DIGIC II* позволяет осуществлять скорость непрерывной съемки - 3 кадра в секунду в серии до 14 кадров. Предусмотрена возможность одновременной записи изображения в форматах *RAW* и *JPEG* высокого разрешения. Камера готова к работе уже через 0,2 секунды после включения.

Картина процесса горения образца ТТ с нижнего торца в газовой (а) и жидкой (б) средах представлена на рис. 4. Для образцов, горение которых протекает в жидкой среде, характерно равномерное распространение плоского фронта горения, сопровождающееся низкой яркостью и однородностью свечения, что подтверждает стабилизирующую, повышающую устойчивость процесса горения ТТ роль окружающей жидкой среды. При горении образцов в газовой среде, наоборот, им присуща более вогнутая поверхность фронта горения, сопровождающаяся высокой яркостью и однородностью свечения, что свидетельствует о более высокой температуре в зоне горения. Толщина зоны горения образцов ТТ в жидкой среде, в пределах скоростей горения $(0,6...0,8) \cdot 10^{-3}$ м/с, примерно в два раза меньше, чем в газовой.

Температура процесса горения ТТ в жидкой и газовой средах (рис. 4) различна. Для образцов, горение которых протекает в жидкой среде, значение температуры по обработанному программой изображению лежит в интервале 610...1000 К, а при горении в газовой среде – 680...1200 К. Между тем расчетное значение температуры горения ТТ данной рецептуры не превышает 1400 К. Следует также отметить, что по результатам проведенных экспериментальных исследований значение температуры составляет 950 К – для жидкой среды и 1100 К – для газовой среды.

Таким образом, во всех приведенных случаях температура ТТ находится в пределах 600...1400 К и

хорошо согласуется с расчетными и экспериментальными данными.

Программное средство разработано в бесплатной среде Microsoft Visual C# 2005 Express Edition. Полученный код компактен и хорошо оптимизирован, что сказывается на общем быстродействии программы. Процесс распознавания изображений вынесен в отдельный поток, что также повышает отклик приложения на действия пользователя.

Выводы

1. Разработано программное средство, способное повышать качество фотоснимков, анализировать изображение и определять по результатам анализа температуру горения твердого топлива.

2. С использованием программного средства установлено, что:

- условия окружающей жидкой среды и давления по сравнению с газовой существенно влияют на картину процесса горения образца ТТ: толщина зоны горения существенно уменьшается, а фронт горения имеет сравнительно низкую яркость и однородность свечения;

- для образцов, горение которых протекает в жидкой среде, значение температуры по обработанному программой изображению лежит в интервале 610...1000 К, а при горении в газовой среде – 680...1200 К.

Литература

1. *Андреев К.К.* Термическое разложение и горение взрывчатых веществ / К.К. Андреев / М.: Наука, 1966. – 346 с.
2. *Беляев А.Ф.* Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем / А.Ф. Беляев / М.: Наука, 1968. – 255 с
3. *Бахман Н.Н.* Горение гетерогенных конденсированных систем / Н.Н. Бахман, А.Ф. Беляев / М.: Наука, 1967. – 255 с
4. *Похил П.Ф.* Журнал физической химии / П.Ф. Похил, О.П. Рысакова, Л.Д. Ромоданова / - 1962. Т.34, № 6. С. 784.
5. *Мальцев В.М.* Основные характеристики горения / В.М. Мальцев, М.И. Мальцев, Л.Я. Кашпоров / М.: Химия, 1977. – 298 с.
6. *Шелухин Г.Г.* Экспериментальные исследования процесса горения гетерогенных конденсированных систем / Г.Г. Шелухин, В.Ф. Булдаков, В.Г. Белов / Физика горения и взрыва. - 1969. Т.5, № 1. С. 42.
7. *Мухутдинов А.Р.* Обработка результатов исследования картины процесса горения твердого топлива в жидкой среде / А.Р. Мухутдинов, В.Е. Леонтьев / Автоматизация в промышленности. 2011. № 2. С.9-12.
8. *Мухутдинов А.Р.* Применение современных информационных технологий для определения и изучения упругих характеристик композиционных сгораемых материалов / А.Р. Мухутдинов, З.Р. Вахидова, М.В. Окулин / Вестник Казан. технол. ун-та. – 2011 – Т.14, № 21. – С. 84-91.
9. *Мухутдинов А.Р.* Повышение эффективности работы котла ТП-230 за счет нейросетевых технологий / А.Р. Мухутдинов, З.Р. Вахидова, П.Е. Любимов. / Вестник Казан. технол. ун-та. – 2011 – Т.14, № 21. – С. 91-94.

10. *Гейдон А.Г.* Пламя, его структура, излучение и температура / *А.Г. Гейдон, Х.Г. Вольфгард* / М.: Металлургия, 1959. – 334с.
11. *Ксандонупо Г.И.* Химия пламени / Г.И. Ксандонупо / М.: Химия. 1980. – 286 с.

12. *Мухутдинов А.Р.* Оптимизация рецептуры образца аммиачно-селитренного состава для термоимпозитивной обработки призабойной зоны пласта по характеристикам прочности / А.Р. Мухутдинов, И.Ф. Садыков / Вестник Каз. гос. технол. ун-та. 2001. №1. С.149-153.

© **А. Р. Мухутдинов** – д-р техн. наук, проф. КНИТУ, muhutdinov@rambler.ru; **З. Р. Вахидова** – канд. техн. наук, доц. КФУ, MRZulphiya@rambler.ru.