

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. 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 сжигание 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. а б

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.