

Д. А. Ягодников, В. В. Козичев,
А. В. Сергеев, И. В. Гавриленко

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Рассмотрены вопросы экспериментального определения скорости горения энергетических конденсированных систем (ЭКС) в условиях высокого давления на стационарных и нестационарных режимах. Дано обоснование выбора метода измерения, описание экспериментальной установки, обозначены особенности практической отработки установки. Приведены результаты экспериментальных исследований ЭКС различного состава.

E-mail: daj@bmstu.ru; samuraijack85@rambler.ru

Ключевые слова: энергетические конденсированные системы, скорость горения, высокое давление, СВЧ-метод измерения.

В последнее время все большее распространение получают импульсные ракетные двигательные установки (ИРДУ), которые используются как корректирующие двигатели высокоточных летательных аппаратов, а также в качестве вспомогательных двигателей ракет-носителей. В современных ИРДУ номинальное давление достигает 120 МПа, а в перспективных разработках этот параметр может быть увеличен до 200 МПа [1].

Повышение интереса к ИРДУ делает еще более актуальной задачу изучения процесса горения энергетических конденсированных систем (ЭКС) при высоких значениях давления на различных режимах, поскольку важно иметь исчерпывающую достоверную информацию о параметрах и характеристиках процесса горения ЭКС, в том числе о законе горения топливных композиций.

Современные средства исследования процесса горения в основном позволяют получать данные о скорости горения при давлении до 20...30 МПа. Термопарным методом можно выявить характеристики процесса горения при давлении до 50 МПа и более. Однако ввиду особенностей этого метода при высоких давлениях погрешность измерения скорости горения увеличивается. Также данный метод не обеспечивает приемлемую точность при изучении нестационарных процессов. Манометрический метод [2] дает возможность исследовать скорость горения ЭКС при давлении до 200 МПа и более. Однако он позволяет работать исключительно с малоразмерными образцами (массой до единиц граммов) на нестационарном режиме с высокими значениями скорости роста давления (до 100...1 000 МПа/с и более), а трудности учета процесса теплообмена между продуктами

сгорания (ПС) и элементами конструкции [3] приводят к заведомо невысокой точности экспериментальных данных. При использовании ультразвуковых методов [4] ограничение накладывается на максимальную измеряемую скорость горения ЭКС и максимальную величину давления в камере сгорания (КС).

При работе в области высоких давлений по сравнению с обозначенными методами преимуществами обладает СВЧ-метод измерения скорости горения ЭКС [5], поскольку при его использовании непосредственно осуществляется определение положения фронта горения с высокой разрешающей способностью вне зависимости от внутрикамерных процессов, что исключает их влияние на точность измерения.

К достоинствам данного метода измерения относится безынерционность ввиду высокой временной разрешающей способности (25 мкс и более), что позволяет исследовать быстропротекающие процессы, такие как горение быстрогорящих (до единиц м/с) материалов, нестационарные режимы и т. п. Пространственная разрешающая способность изменяется в процессе выгорания образца и составляет 0,034...0,0028 мм. Теоретическая точность определения скорости горения может достигать 1 %. Практически достижимый уровень погрешности составляет 4,5 %, он зависит от таких факторов, как состав, физические и диэлектрические параметры ЭКС и ее компонентов, длина образца и др. [5].

При исследовании горения ЭКС при давлениях до 200 МПа определенные трудности обусловлены прочностью элементов системы измерения, в частности гермоввода СВЧ-излучения. В случае изготовления гермоввода из стеклотекстолита с пределом прочности 350...540 МПа (в зависимости от ориентации армирующего материала) максимально допустимое внутрикамерное давление составляет 150 МПа. При применении радиопрозрачных керамических материалов с высоким пределом прочности и модулем упругости допустимая величина внутрикамерного давления может достигать 300 МПа и более [6].

На рис. 1 представлена принципиальная схема устройства для определения положения фронта горения ЭКС СВЧ-методом. Система состоит из измерителя полных сопротивлений (ИПС) с гермовводом СВЧ-излучения в камеру сгорания и волноводной втулкой с исследуемым образцом ЭКС в виде образца торцового горения. СВЧ-излучение вводят в исследуемый образец со стороны забронированного торца. Электромагнитная волна проходит через образец ЭКС и, отражаясь от границы раздела фаз продукты сгорания — ЭКС, возвращается обратно. Определение положения фронта горения основано на измерении параметров электромагнитного поля, образованного прямой и отраженной от фронта горения электромагнитными волнами. Линейную скорость горения ЭКС вычисляют путем численного дифференцирования положения фронта горения по времени. Сопо-

ставление величин внутрикамерного давления и скорости перемещения поверхности горения позволяет определить закон горения ЭКС по результатам проведения одного эксперимента.

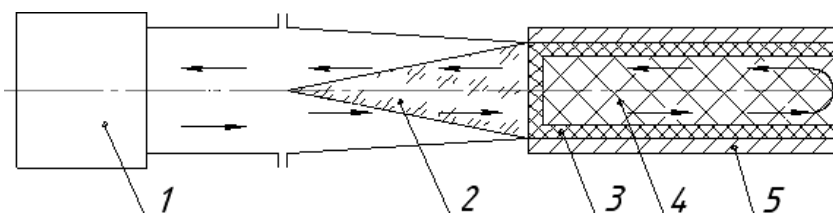


Рис. 1. Схема облучения образца в металлическом волноводе:

1 — измеритель полных сопротивлений; 2 — гермоввод; 3 — бронепластина; 4 — образец ЭКС; 5 — металлический волновод

Целью данной работы является разработка экспериментальной установки, метода измерения и исследование скорости горения ЭКС при давлениях до 100 МПа на квазистационарных режимах и режиме роста давления.

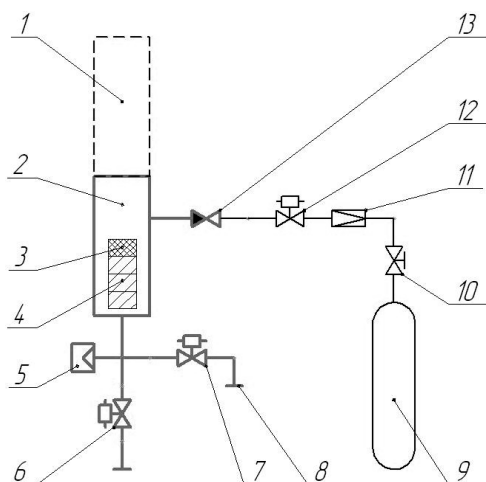


Рис. 2. Пневмогидравлическая схема огневой части установки:

1 — СВЧ-система измерения положения фронта горения; 2 — камера сгорания; 3 — дополнительный образец; 4 — балласт; 5 — датчик давления; 6 — клапан принудительного сброса давления; 7 — предохранительный клапан; 8 — устройство нулевой тяги; 9 — баллон высокого давления; 10 — баллонный вентиль; 11 — газовый редуктор; 12 — электроклапан системы наддува; 13 — обратный клапан

Экспериментальная установка [7] состоит из камеры сгорания, затворного узла и системы обеспечения режимов работы, содержание которой варьируется в зависимости от текущей задачи. На рис. 2 представлена пневмогидравлическая схема (ПГС) установки. Затвор-

ный узел [6] служит коммуникационным звеном между системой измерения и рабочим участком установки и состоит из образца исследуемого материала, воспламенителя и гермоввода электромагнитного излучения. Система измерения включает в себя генератор СВЧ-излучения с частотой 9,03 ГГц и мощностью 54 мВт, ферритовый вентиль, 4-зондовый датчик полных сопротивлений и магистральные волноводы.

Высокое давление в КС достигают за счет сгорания образца ЭКС в замкнутой КС постоянного объема. Данный способ позволяет реализовать небольшие скорости роста давления, а также по сравнению с горением на стационарном режиме с истечением в окружающую среду продуктов сгорания через критическое сечение дает возможность за один эксперимент получить закон горения в широком диапазоне изменения значений давления.

В качестве исследуемого объекта использовали цилиндрический образец ЭКС торцового горения диаметром 18 мм. Величину и зависимость скорости роста давления в КС от времени настраивали за счет изменения соотношения свободного объема и длины образца. Регулирование свободного объема осуществляли заполнением КС балластом, выполненным из жидкости или твердого теплоизолирующего материала. Дополнительными способами настройки служат величина предварительного наддува и параметры вспомогательного образца ЭКС, используемого для увеличения массоприхода продуктов сгорания и соответствующего повышения величины и скорости роста давления.

Эксперимент проводили по следующей методике. Затворный узел снаряжали образцом исследуемого ЭКС, забронированным по холодному торцу и боковой поверхности, и газофакельным воспламенителем [8, 9] с навеской воспламенительного состава. Дополнительно под кожухом затворного узла может быть размещен вспомогательный образец, предназначенный для увеличения максимального давления либо для увеличения скорости роста давления. Далее снаряженный затворный узел устанавливали в КС и фиксировали байонетным замком, подключали системы измерения, питания воспламенителя и магистраль наддува. За 2 с до замыкания цепи воспламенительного устройства включали регистрацию данных на ЭВМ (частота дискретизации 1,7...100 кГц) — величин внутрикамерного давления и положения фронта горения. Предварительный наддув КС инертным газом осуществляли в случае необходимости обеспечения повышенных начальных значений давления в КС.

В работе [7] проанализирована теория и практика влияния различных параметров установки на величину и скорость изменения давления при горении образца. Выведены зависимости, позволяющие аналитически рассчитать величину и скорость изменения давления по времени для известных параметров ЭКС и установки. Данные зависимости используют для прогнозирования режимов работы на основе результатов предварительного пуска или имеющейся информа-

ции о характеристиках горения ЭКС. В ходе отработки стенда, включающей проведение экспериментальных работ на различных ЭКС, установлено, что допущение об отсутствии тепловых потерь можно использовать при давлении в КС до 10 МПа. При более высоком давлении теплообмен между продуктами сгорания исследуемой ЭКС, элементами КС и затворного узла вызывает резкое понижение температуры продуктов сгорания и, как следствие, снижение достижимого уровня давления по сравнению с расчетной величиной. Такая степень реализации давления может составлять 10...40 % в зависимости от параметров установки и исследуемого образца ЭКС.

Другой характерной особенностью эксплуатации установки при давлении свыше 30 МПа является различие схем бронирования образцов в зависимости от механических параметров ЭКС. Смесевые ЭКС на основе полимерных материалов и каучуков характеризуются хорошей адгезией к материалу бронировки и могут быть забронированы непосредственно в металлическую втулку-волновод. Баллиститные ЭКС обладают невысокой адгезией, особенно в случае с гладкой поверхностью образца. Под действием внутрикамерного давления величиной свыше 15...20 МПа наблюдалось отслоение бронирующего покрытия от наружной поверхности ЭКС с последующим прогаром.

Для исключения прогара разработана специальная методика бронирования. В соответствии с ней обточенный (с уровнем шероховатости поверхности не менее 0,05 мм) до заведомо меньшего диаметра образец покрывали слоем бронирующего покрытия и обтачивали в размер втулки-волновода. При этом бронирующее покрытие механически не связано с материалом втулки-волновода, оно деформируется под действием внутрикамерного давления совместно с образцом ЭКС, не отслаиваясь от него. Экспериментально подтверждена работоспособность данной схемы при давлении до 50 МПа.

В ходе отработки экспериментальной установки и методики проведены исследования трех видов ЭКС. Типовая осциллограмма изменения давления в КС приведена на рис. 3. Результаты вторичной обработки, при которой исследовали изменение скорости горения по времени, представлены на рис. 4.

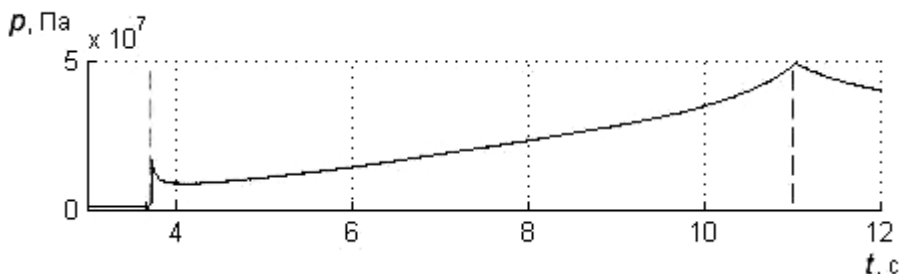


Рис. 3. Типовая осциллограмма изменения давления в КС

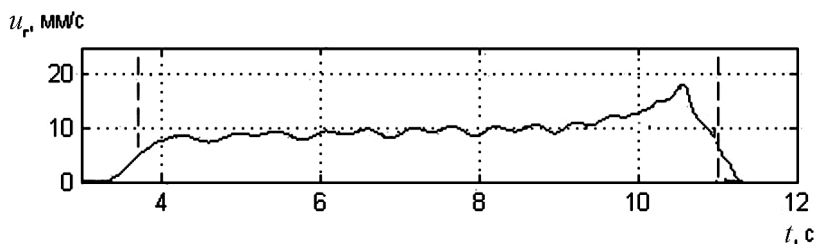


Рис. 4. Осциллограмма изменения скорости горения

Для баллиститных ЭКС марок Н и Р (рис. 5, а и б) получены законы горения при давлении до 24 МПа и 32 МПа соответственно. Для ЭКС марки Н полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с известным степенным законом горения во всем достигнутом диапазоне значений давлений:

$$u = 0,7 \left(\frac{P}{98\,066,5} \right)^{0,6},$$

где u — скорость горения, мм/с; P — давление в КС, Па.

Полученный закон горения ЭКС марки Р удовлетворительно согласуется с известным паспортным законом горения:

$$u = 3,26 \left(\frac{P}{98\,066,5} \right)^{0,25}$$

при давлении до 9 МПа, после чего наблюдается переход закона горения в линейный:

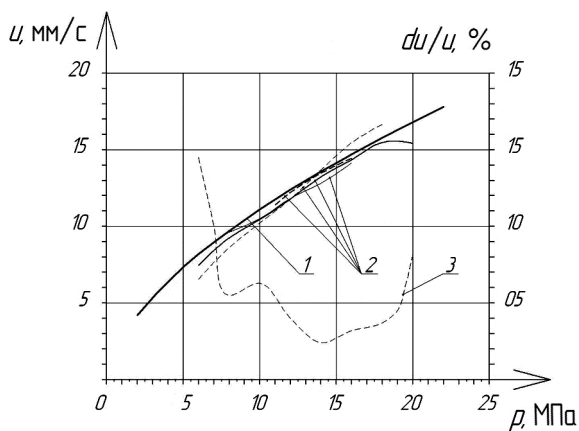
$$u = 4,7 + 6,8 \left(\frac{P}{98\,066,5} \right).$$

Для смесового низкотемпературного ЭКС (рис. 5, в) определен закон горения в диапазоне значений давлений 4...50 МПа, который в области низких давлений хорошо согласуется с известными экспериментальными значениями стационарной скорости, мм/с:

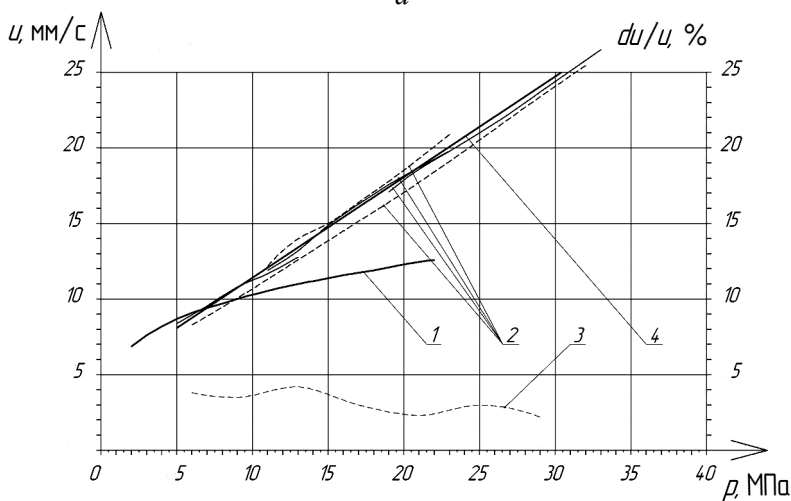
$$u = 2,47 \left(\frac{P}{98\,066,5} \right)^{0,26}.$$

В диапазоне значений давлений 17...27 МПа зарегистрирована слабая зависимость линейной скорости горения от давления. При давлении более 27...30 МПа начинается резкий рост скорости горения, изменяющийся по линейному закону:

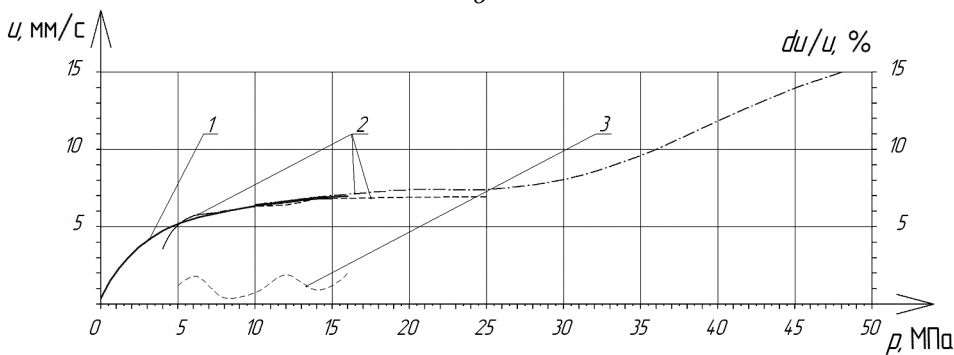
$$u = -5,225 + 0,042 \left(\frac{P}{98\,066,5} \right).$$



а



б



в

Рис. 5. Обобщенные результаты огневых пусков для баллиститных ЭКС марок Н (а), Р (б) и смесового ЭКС (в):

1 — паспортный закон горения; 2 — результаты вторичной обработки экспериментальных данных; 3 — средняя относительная погрешность определения закона горения; 4 — полученный закон горения

Таким образом, разработанные экспериментальная установка и СВЧ-метод диагностики позволили определить закон горения баллиститных и смесевых ЭКС в диапазоне значений давлений 0,1...50 МПа с погрешностью до 5 %.

Работа выполнена при поддержке гранда РФФИ № 11-08-01186-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование зенитных управляемых ракет / И.И. Архангельский, П.П. Афанасьев, Е.Г. Болотов и др.; под ред. И.С. Голубева, В.Г. Светлова. М.: Изд-во МАИ, 2001. 732 с.
2. Хоменко Ю.П., Широков В.М. Определение нестационарных законов горения пороха на основе манометрических испытаний // Физика горения и взрыва. 2006. Т. 42, № 2. С. 29–38.
3. Архипов В.А., Зимин Д.А. Анализ условий применимости обратных методов восстановления нестационарной скорости горения // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 3. С. 39–43.
4. Коти Ф., Ерейдес Ч. Ультразвуковой метод измерения скорости горения: ошибки, шумы и чувствительность // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 1. С. 59–67.
5. Лавров Б.П., Шарай Ю.М. Определение скорости горения твердого топлива с применением измерителя полных сопротивлений СВЧ-диапазона // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2009. № 1. С. 28–36.
6. Экспериментальная методика и модельная установка для исследования горения энергетических конденсированных систем при высоких давлениях / Д.А. Ягодников [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Спец. вып. “Энергетическое и транспортное машиностроение”. 2010. С. 63–73.
7. Применение СВЧ-метода измерения скорости горения энергетических конденсированных систем в условиях сверхвысокого давления / Д.А. Ягодников, Б.П. Лавров, А.В. Сергеев, М.Ю. Антонов, В.В. Козичев // Наука и образование. Электронное научно-техническое издание. Москва. 2011. <http://technomag.edu.ru/77-30569/306807>.
8. Пат. RU 2415290 С1. Устройство воспламенения образца твердого ракетного топлива и способ воспламенения с его использованием / А.В. Сухов, Б.П. Лавров, А.В. Сергеев. Заявл. 27.08.2009; Опубл. 27.03.2011. Бюлл. № 9.
9. Газофакельное воспламенительное устройство / А.В. Сухов [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Машиностроение. 2010. № 3. С. 70–76.

Статья поступила в редакцию 26.09.2012