

УДК 536.46

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВЫМ МЕТОДОМ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ ОКИСЛИТЕЛЯ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КОНДЕНСИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ

К. В. Федотова, А. К. Шостов, В. В. Козичев, Д. А. Ягодников

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва,
fedotova@bmstu.ru, shostov@bmstu.ru, ko_vv@bmstu.ru, daj@bmstu.ru

Проведено экспериментальное определение влияния размера частиц порошкообразного окислителя (нитрата калия) на закон горения модельной энергетической конденсированной системы в интервале давлений $0.5 \div 40$ МПа микроволновым методом бесконтактной диагностики. Исследовался модельный состав системы на основе эпоксидного горючесвязывающего вещества, нитрата калия и модификатора горения — оксида железа Fe_2O_3 . При расчете экспериментальных значений линейной скорости горения учитывались случайные погрешности. Получены аналитические зависимости линейной скорости горения модельных энергетических конденсированных систем от давления, аппроксимированные степенной и линейной функциями. Установлено, что при уменьшении размера частиц порошкообразного окислителя значение давления перехода со степенного закона горения на линейный уменьшается, при этом также увеличивается скорость горения.

Ключевые слова: энергетическая конденсированная система, дисперсность, высокое давление, скорость горения, микроволновый метод.

DOI 10.15372/FGV2024.9462

EDN FXTUOY

ВВЕДЕНИЕ

В условиях вновь возрастающего интереса к межпланетным перелетам актуальной задачей является создание надежных двигательных установок для вывода космического аппарата с межпланетных траекторий на околопланетные орбиты. При этом установка должна развивать сравнительно невысокую тягу в течение продолжительного времени порядка 200 с для того, чтобы не создавать чрезмерного ускорения космического аппарата.

В качестве химического источника энергии в подобных двигательных установках могут применяться как жидкие ракетные топлива, так и энергетические конденсированные системы (ЭКС). Однако свойства жидких ракетных топлив таковы, что использование их в двигательных установках, работающих в условиях космоса, требует разработки сложной системы подачи компонентов в камеру сгорания, а также создает трудности в организации надежного воспламенения [1]. Таким образом, перспективным направлением при создании установок для коррекции траектории космического аппарата может стать применение ЭКС в качестве источника энергии.

При разработке таких двигательных установок необходимо в числе прочих задач определять закон горения для новых составов ЭКС как функцию их линейной скорости горения (u) от давления в камере сгорания. В настоящее время единственным надежным

способом определения величины u для ЭКС различных составов является экспериментальное исследование, ввиду многообразия и сложности протекающих при горении физико-химических процессов, а также в связи с отсутствием универсальной математической модели [2].

Для составов ЭКС, в которых энергетические показатели не являются решающими при выборе компонентов, в качестве окислителя широко применяются порошкообразные нитраты (в частности, нитрат аммония, нитрат натрия и нитрат калия) [3]. Поскольку нитрат аммония нестабилен, обладает высокой гигроскопичностью, сравнительно невысокой плотностью и повышенной зависимостью скорости горения от начальной температуры, его использование в составах для двигательных установок не представляется целесообразным. Нитрат калия обладает сравнительно высоким кислородным балансом, хорошими характеристиками воспламеняемости, умеренной гигроскопичностью, низкой температурой плавления ($T_{пл} = 607 \text{ K}$) и низкой стоимостью [4]. Кроме того, нитраты натрия и калия способны поглощать хлористый водород в продуктах сгорания, что делает их более экологичными. В связи с этим в данной работе в качестве окислителя используется нитрат калия.

В качестве горючесвязующего вещества (ГСВ) модельного состава выбран термореактивный полимер — эпоксидная смола, обладающая сравнительно высокими плотностью и адгезионными свойствами по отношению к порошкообразному наполнителю. Помимо этого, ЭКС на основе эпоксидной смолы характеризуются высокой химической стабильностью, что важно для их использования в двигательных установках.

Разложение нитрата калия (НК) в реакционном слое ЭКС протекает эндотермически, поэтому необходимо использовать различные катализаторы для этого процесса, чтобы получить необходимую скорость горения образцов с пассивным ГСВ. В модельный состав исследуемых образцов ЭКС на основе НК добавляют порошкообразный оксид железа Fe_2O_3 , поскольку, как показано в работе [5], он эффективно уменьшает энергию активации в реакции термического разложения НК.

Степень и характер влияния давления на скорость горения зависят от порядка лимитирующей реакции в общем кинетическом механизме газофазного горения [6]. При низком давлении, конкретное значение которого зависит от состава ЭКС, такими реакциями, как правило, являются бимолекулярные реакции окисления, а при высоком — мономолекулярные реакции. Показатель степени ν при этом может принимать значения в диапазоне $0.15 \div 1$ в обобщенном законе горения $u = bp^\nu$, где b , ν — эмпирические коэффициенты, зависящие от рецептуры и размера частиц порошкообразных компонентов, p — давление.

Известно также, что существенное влияние на скорость горения ЭКС оказывает размер частиц окислителя. Так, при увеличении диаметра частиц перхлората аммония у составов, горящих в диффузионном или диффузионно-кинетическом режимах, скорость горения уменьшается, поскольку при этом снижается скорость лимитирующего процесса смешения компонентов [7].

При горении составов на основе НК с эпоксидной смолой в реакционном слое конденсированной фазы могут происходить плавление, фазовые переходы и предварительные химические реакции между продуктами первичного разложения основных компонентов. Размер частиц окислителя и наличие катализатора влияют на разложение KNO_3 , в результате которого выделяется «свободный» кислород, участвующий в газофазных реакциях горения. Давление в камере сгорания влияет на концентрацию реагентов и скорость реакций в газовой фазе, а следовательно, на интенсивность теплообмена у горячей поверхности. Таким образом, при вариации дисперсности компонентов, добавке катализаторов, а также изменении внешних условий горения, в частности давления, относительная

роль реакций в тонком реакционном слое и в зоне газофазных реакций может меняться, что, в свою очередь, обуславливает изменение скорости горения. Предсказать влияние вышеуказанных факторов на характер изменения скорости горения расчетным образом не представляется возможным. В связи с этим в данной работе проводится экспериментальное определение скорости горения ЭКС микроволновым методом при различных давлениях и дисперсности окислителя.

В настоящее время для экспериментального определения скорости горения применяются различные методы, которые согласно [2] делятся на два больших класса в зависимости от типа измеряемой скорости — квазистационарной или нестационарной. К первому классу относятся различные оптические методы и методы проб, а также методы, основанные на измерении давления и акустической эмиссии. Ко второму классу относятся методы, основанные на мгновенном измерении массы заряда либо параметров горящего свода. Для реализации последнего метода используется, например, рентгенография. Также параметры свода можно определить путем ультразвуковой диагностики и микроволновым методом [8]. Из всего многообразия методов исследования процессов горения ЭКС наиболее перспективным и точным является микроволновый метод ввиду возможности диагностики нестационарных процессов и наличия высоких геометрических и временных разрешений [9].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния размера частиц порошкообразного нитрата калия на характер зависимости скорости горения модельной ЭКС в интервале давлений $0.5 \div 40$ МПа микроволновым методом.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ЭКС

В данной работе образцы гетерогенной ЭКС изготавливаются следующим образом. В качестве окислительного компонента используется НК с диаметром частиц 250 и 400 мкм, массовое содержание которого в образцах составляет 69 %. В качестве инертного ГСВ используется эпоксидная смола ЭД-20 с отвердителем аминного типа Этал-45, предварительно перемешанные в пропорции 2 : 1. Массовое содержание ГСВ в образцах составляет 30 %. Для уменьшения энергии активации реакции разложения НК в реакционном слое горящего топлива применяется катализатор — нанопорошок оксида железа Fe_2O_3 с характерным размером частиц $80 \div 100$ нм и чистотой 99.9 %, массовое содержание которого составляет 1 %.

Окислитель предварительно просеивается через лабораторное сито с характерным размером ячеек $250 \div 400$ мкм, просушивается и смешивается с порошкообразным катализатором. Масса компонентов контролируется с помощью лабораторных весов с предельной допустимой погрешностью 0.001 г. Затем в порошкообразную смесь добавляется ГСВ, и полученную массу тщательно перемешивают в специальной цилиндрической форме, которую далее помещают в вакуумную камеру для дегазации и выдержки модельного состава 24 ч при температуре 40 °С. Далее образцы извлекают из форм и проводят их механическую обработку. Полученные цилиндры длиной 40 мм и диаметром 17.9 мм покрывают тонким слоем ГСВ для прочного скрепления со стальной втулкой. Средняя плотность образцов составляет 1.46 г/см^3 .

Для каждого состава ЭКС, различающегося дисперсностью НК, при различных давлениях выполнялось по три эксперимента. Давление определялось с помощью тензорезистивного датчика абсолютного давления РЗМВ фирмы «Hottinger Baldwin» с диапазоном измерения $0 \div 200$ МПа и основной предельной погрешностью 0.2 %, погрешность определения фазы волны (а значит, и скорости горения) не превышала 6.1 %.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

На кафедре «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н. Э. Баумана разработана и создана экспериментальная установка для измерения скорости горения ЭКС сверхвысокочастотным (СВЧ) методом, в том числе при высоких давлениях до $100 \div 150$ МПа [10]. Основными элементами установки являются источник СВЧ-излучения (отражательный клистрон К-94), волновод (труба прямоугольного сечения 23×10 мм), ферритовый вентиль, датчик полных сопротивлений, переходник с прямоугольного волновода на круглый и затворный узел. Цилиндрический образец торцевого горения модельной ЭКС размещается в модельной камере сгорания. Схема облучения образца СВЧ электромагнитным излучением представлена на рис. 1.

В основе эксперимента лежит принцип измерения параметров стоячей СВЧ-волны при горении цилиндрического образца ЭКС, забронированного по всем поверхностям, кроме торца. Источник СВЧ 1 генерирует волну с частотой 9.027 ГГц, которая проходит через прямоугольный волновод 2 и согласующий конус 4, расположенный на входе в корпус камеры 5. Далее волна, пройдя через исследуемый образец ЭКС, отражается от границы раздела твердой и газообразной фаз. Отраженная волна суммируется с падающей, образуя при этом стоячую СВЧ-волну, параметры которой определяются при помощи четырех диодов 3. На рис. 2 представлена схема образца модельной ЭКС с указанными на ней векторами падающей и отраженной волн. Более подробно экспериментальная установка и методика проведения эксперимента описаны в [10, 11].

Процесс отражения электромагнитной волны от границы раздела фаз ЭКС — продукты сгорания характеризуется зависимостью комплексного коэффициента отражения $K(x)$ в плоскости холодного торца от времени, процедура определения которой подробно изложена в [11]. Схема облучения образца во втулке изображена на рис. 2.

Скорость перемещения границы раздела фаз ЭКС — продукты сгорания, которая

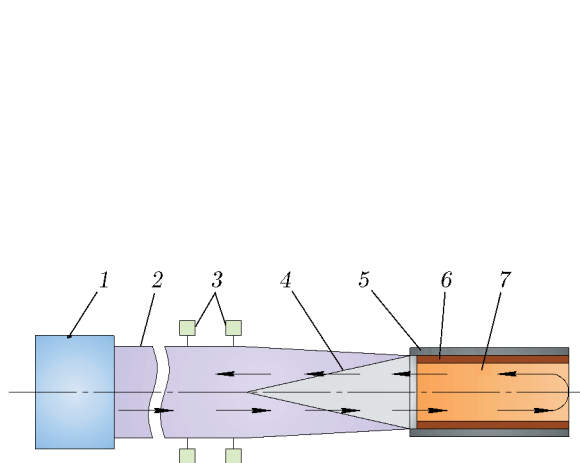


Рис. 1

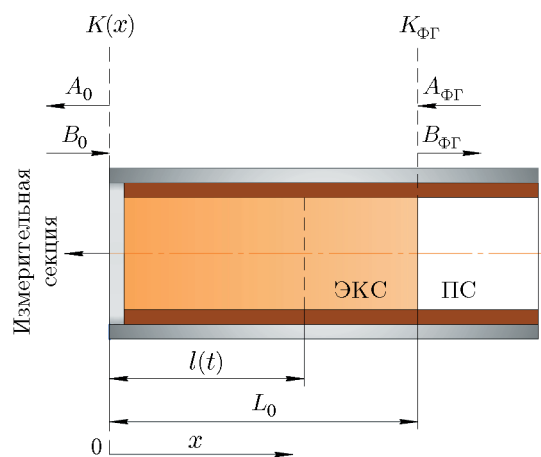


Рис. 2

Рис. 1. Схема облучения исследуемого образца:

1 — источник СВЧ, 2 — прямоугольный волновод, 3 — диод типа 2A202A, 4 — согласующий конус, 5 — втулка, 6 — бронированное покрытие, 7 — исследуемый образец ЭКС

Рис. 2. Схема образца модельной ЭКС, размещенного в волноводе измерительной секции СВЧ-установки:

$B_0, B_{ФГ}$ — векторы падающей волны; $A_0, A_{ФГ}$ — векторы отраженной волны; $l(t)$ — длина образца в некоторый момент времени t ; L_0 — начальная длина образца

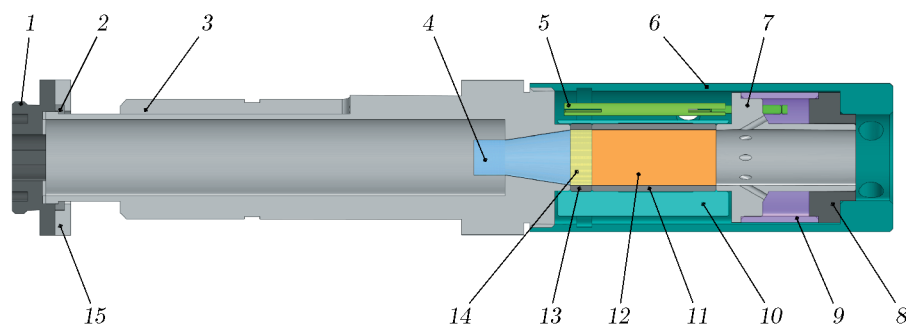


Рис. 3. Схема затворного узла:

1 — переходник, 2 — разрезное кольцо, 3 — основа затворного узла, 4 — согласующий конус, 5 — токовод, 6 — цилиндрическая гайка, 7 — корпус воспламенителя, 8 — крышка воспламенителя, 9 — обечайка воспламенителя, 10 — центрирующая втулка, 11 — волноводная втулка, 12 — исследуемый образец, 13 — корпус проставки, 14 — проставка, 15 — наливной фланец

принимается равной линейной скорости горения образца ЭКС, определяется на основании экспериментальных измерений по формуле

$$u(t) = \frac{\lambda_{\text{ЭКС}}}{4\pi} \frac{d\varphi}{dt}, \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{ЭКС}}$ — длина электромагнитной волны в помещенном в волновод исследуемом образце модельной ЭКС, φ — фаза $K(x)$.

Одним из преимуществ микроволнового метода определения линейной скорости горения ЭКС является возможность проводить исследования при нестационарном давлении. К нестационарным режимам можно отнести пульсации давления, резкую декомпрессию, а также повышение давления в ходе эксперимента. При этом микроволновый метод позволяет за одно испытание определить линейную скорость горения для конечного диапазона давлений.

Реализация каждого из режимов требует своих конструкторских решений. При проведении эксперимента продукты горения образца ЭКС истекают в камеру сгорания, которая представляет собой толстостенный сосуд из нержавеющей стали, в котором имеются отверстия для установки дополнительных узлов и датчиков. В данной работе таких отверстий четыре: для байонетного крепления затворного узла с камерой сгорания, для установки датчика давления, для установки фланца с критическим сечением, для установки клапана сброса давления или заглушки.

Затворный узел предназначен для размещения в нем исследуемого образца, к которому по волноводному тракту подводится электромагнитная волна. Общий вид затворного узла представлен на рис. 3.

При реализации режима квазистационарного давления в одно из отверстий устанавливается фланец с критическим сечением, площадь которого зависит от реализации требуемого уровня давления в камере сгорания, которое слабо изменяется в течение эксперимента. Через критическое сечение продукты сгорания образца истекают в воздуховод, откуда сбрасываются в атмосферу, не подвергая огневой бокс тепловому воздействию.

Как уже отмечалось, режим увеличения уровня давления в ходе эксперимента является предпочтительным, так как в ходе одного испытания можно определить закон горения образца ЭКС. Данный режим конструктивно реализуется следующим способом. На место фланца с критическим сечением ставится заглушка для герметизации внутренней полости. В другое отверстие устанавливается дренажный клапан с релейным управлением, который в ходе испытания остается закрытым до окончания горения заряда ЭКС.

По мере выгорания образца масса продуктов горения во внутренней полости увеличивается, что ведет к росту статического давления, при котором горит исследуемый образец. Свободный объем камеры, куда истекают продукты, составляет $4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$. При окончании горения фаза стоячей волны в волноводе перестает изменяться, так как поверхность отражения неподвижна. Для срабатывания высокотемпературных продуктов и остаточного давления в вентилируемый бокс подается сигнал на открытие дренажного клапана.

Для исключения влияния температурного фактора на скорость горения образцов модельных ЭКС проводилось их термостатирование перед испытанием. Для исключения влияния эрозионного эффекта использовались образцы торцевого горения, забронированные по всем остальным поверхностям. Однотипность и повторяемость составов модельных ЭКС обеспечивалась посредством контроля массы как отдельных компонентов, так и готовых образцов.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе проведена серия экспериментов по определению микроволновым методом скорости горения двух составов модельных ЭКС с диаметрами частиц нитрата калия 400 и 250 мкм, с полимерной основой — эпоксидной смолой и с катализатором горения Fe_2O_3 в диапазоне давления $0.5 \div 40 \text{ МПа}$ по изложенной выше методике.

По сравнению с перхлоратом калия и прочими нитратами, температура плавления НК сравнительно низкая (607 К). Это приводит к тому, что даже в составах с инертным ГСВ данный окислитель достаточно легко воспламеняется. Помимо этого, НК содержит около 39.6 % «свободного» кислорода, который может образоваться в результате разложения данного окислителя в конденсированной фазе топлива по сильно эндотермической квазиглобальной реакции вида $2\text{KNO}_3 \rightarrow \text{K}_2\text{O} + \text{N}_2 + 2.5\text{O}_2$.

Температура разложения ГСВ на основе ЭД-20 составляет приблизительно 610 К, а температура плавления ниже, чем у НК, что приводит к образованию жидкого реакционного слоя на поверхности горящего топлива, в результате чего возможны предварительные реакции между продуктами разложения окислителя и горючего.

Поскольку процессы разложения ГСВ и НК протекают с суммарным эндотермическим эффектом, для поддержания стабильного горения составов на их основе необходим надежный источник воспламенения, который на начальном этапе приводил бы к накоплению достаточного количества газообразных компонентов, способных к самоподдерживающимся экзотермическим реакциям в газовой фазе и формированию фронта пламени. Однако даже при наличии стабильного фронта пламени скорость горения данных топлив сравнительно невысокая и слабо зависит от давления, поскольку процесс горения лимитируется реакциями в жидком реакционном слое.

Механизм каталитического действия Fe_2O_3 , вероятно, связан с активностью катиона Fe^+ в образовании поверхностного комплекса с анионом нитрата NO_3^- . Электронная конфигурация Fe_2O_3 характеризуется незаполненными валентными орбиталями, в результате чего катионы металла обладают высокой способностью притягивать неспаренные электроны атомов кислорода в NO_3^- . Образование связи $\text{Me}-\text{O}$ ослабляет связи $\text{O}-\text{N}$ в анионах нитрата и облегчает разложение НК (снижает энергию активации реакции разложения).

С учетом вышеприведенных особенностей разложения компонентов исследуемых модельных составов можно предположить слабое влияние как давления, так и размера частиц окислителя на скорость горения при лимитирующих реакциях в жидком реакционном слое, и наоборот, при лимитирующих реакциях в газовой фазе должна наблюдаться зависимость скорости горения от указанных факторов.

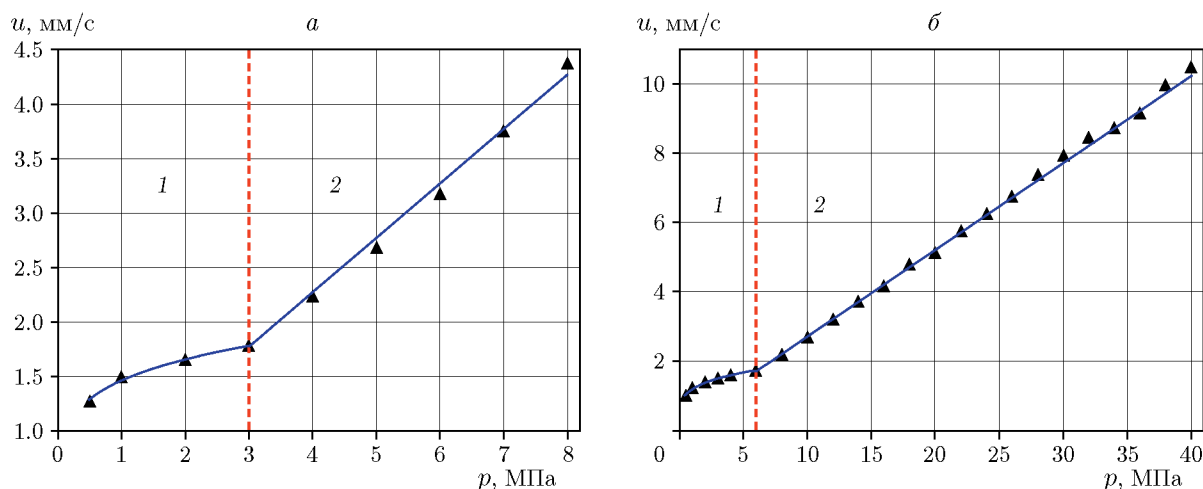


Рис. 4. Зависимость скорости горения ЭКС от давления при диаметре частиц окислителя 250 мкм (а) и 400 мкм (б):

1 — область степенного закона горения, 2 — область линейного закона горения

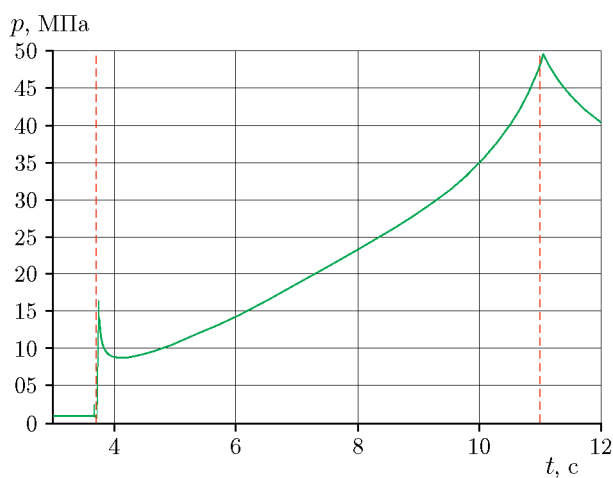


Рис. 5. Осциллограмма изменения давления при горении образца ЭКС с диаметром частиц окислителя 400 мкм

На рис. 4 представлены полученные экспериментальные зависимости скорости горения модельной гетерогенной ЭКС на основе НК в двигательных установках, работающих в условиях космоса.

В ходе проведения эксперимента измерялось давление в камере сгорания. Осциллограмма изменения давления при горении образца ЭКС с диаметром частиц окислителя 400 мкм показана на рис. 5.

На основе полученных экспериментальных данных для двух модельных составов гетерогенных ЭКС получены аппроксимирующие зависимости скорости горения от давления, представленные в таблице.

Аналитические зависимости скорости горения от давления

Диаметр частиц окислителя 250 мкм		Диаметр частиц окислителя 400 мкм	
$p \leq 3$ МПа	$p > 3$ МПа	$p \leq 6$ МПа	$p > 6$ МПа
$u = 1.46p^{0.18}$	$u = 0.5p + 0.27$	$u = 1.19p^{0.21}$	$u = 0.25p + 0.2$

Из анализа экспериментальных данных следует, что для исследуемых составов имеется характерное давление, при котором закон горения меняется со степенного (со сравнительно слабой зависимостью от давления) на линейный. У состава с размером частиц 400 мкм смена режима происходит при более высоком значении давления, что, вероятно, связано с большими затратами тепла на плавление и разложение более крупных кристаллов окислителя. Увеличение же давления приводит к сокращению зоны реакций в газовой фазе, в результате чего фронт пламени оказывается ближе к поверхности топлива, что интенсифицирует теплообмен.

На то, что горение при низком давлении лимитируется реакциями в жидком реакционном слое у поверхности образца, указывают также практически идентичные законы скорости горения в степенной области для составов с различной дисперсностью кристаллов окислителя.

В области лимитирующих реакций в газовой фазе уменьшение размера кристаллов окислителя приводит к увеличению скорости горения (при одинаковом давлении), поскольку кристаллы окислителя меньшего диаметра быстрее плавятся и разлагаются, выделяя в газовую фазу «свободный» кислород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментальных исследований получены зависимости скорости горения модельных ЭКС на основе порошкообразного нитрата калия с размерами частиц 250 и 400 мкм в диапазоне давлений 0.5 ÷ 40 МПа, позволившие сделать следующие выводы.

1. Горение топлив типа НК/ЭС/ Fe_2O_3 лимитируется реакциями в конденсированном реакционном слое, что соответствует сравнительно слабой зависимости от давления, и в зоне газофазных реакций. С увеличением диаметра частиц нитрата калия от 250 до 400 мкм давление перехода со степенного на линейный закон горения увеличивается с 3 до 6 МПа.

2. В области степенного закона скорости горения диаметр кристаллов окислителя не влияет на ее значение вследствие того, что определяющими являются реакции в жидком реакционном слое у поверхности образца.

3. В области линейного закона скорости горения увеличение диаметра частиц окислителя приводит к уменьшению скорости горения (при прочих равных условиях), и состав ЭКС оказывается более предпочтительным для использования в двигательной установке для космического аппарата в силу большего времени работы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-08-31135).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ordonneau G., Haidn O., Soller S., Onofri M.** Oxygen-methane combustion studies in the In Space Propulsion Programme // 4th Eur. Conf. for Aerospace Sciences (EUCASS), 2011.
2. **Zarko V., Kiskin A., Cheremisin A.** Contemporary methods to measure regression rate of energetic materials: A review // Prog. Energy Combust. Sci. — 2022. — V. 91. — 100980. — DOI: 10.1016/j.pecs.2021.100980.
3. **Kubota N.** Propellants and Explosives. Thermochemical Aspects of Combustion. — 3rd ed. — Wiley-VCH, 2015. — DOI: 10.1002/9783527693481.

4. **Bharti M. K., Bansal L., Chalia S.** Catalytic potential of micro-sized additives in enhancing the linear burn rate of potassium nitrate-sucrose based composite solid propellant strands // Int. J. Energ. Mater. Chem. Propul. — 2021. — V. 20, N 4. — P. 61–77. — DOI: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.2021038209.
5. **Wu C. W., Chen Y. C., Wang T. H., Lin C. I., Huang C. W., Zhou S. R.** Effect of Fe-based organic metal framework on the thermal decomposition of potassium nitrate and its application to the composite solid propellants // Combust. Flame. — 2021. — V. 232. — 111556. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111556.
6. **Kuo K. K., Acharya R.** Applications of Turbulent and Multiphase Combustion. — John Wiley & Sons, 2012. — DOI: 10.1002/9781118127575.
7. **Thomas J. C., Morrow G. R., Dillier C. A. M., Petersen E. L.** Comprehensive study of ammonium perchlorate particle size/concentration effects on propellant combustion // J. Propul. Power. — 2020. — V. 36, N 1. — DOI: 10.2514/1.B37485.
8. **Shelton S. V.** A technique for measurement of solid propellant burning rates during rapid pressure transients // 4th ICRPG Combustion Conf. — 1967. — V. 1. — P. 361–372.
9. **Zarko V. E.** Critical review of methods for regression rate measurements of condensed phase systems // Int. J. Energ. Mater. Chem. Propul. — 1994. — V. 3, N 1-6. — P. 600–623. — DOI: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.v3.i1-6.590.
10. **Лавров Б. П., Шарай Ю. М., Сергеев А. В., Гавриленко И. В.** Определение скорости горения твердого топлива с применением измерителя полных сопротивлений СВЧ-диапазона // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. — 2009. — № 1. — С. 28–36. — EDN: KHNBPX.
11. **Ягодников Д. А., Сергеев А. В., Козичев В. В.** Экспериментально-теоретическое обоснование повышения точности измерения скорости горения энергетических конденсированных систем СВЧ-методом // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 2. — С. 51–61. — EDN: SMBIOV.

Поступила в редакцию 19.02.2024.

После доработки 21.05.2024.

Принята к публикации 03.07.2024.
