

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРА КОЛЕБАНИЙ РЕАКТИВНОЙ СИЛЫ
ПРИ ГОРЕНИИ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ***

© 2006 г. А. Б. Кискин

Институт химической кинетики и горения Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск

Поступила в редакцию 07.04.2006

В работе на основе экспериментальных данных по отборам конденсированных продуктов вблизи поверхности горения проводится моделирование структуры смесового металлизированного топлива. В соответствии с полученной вероятностной структурой рассчитывается временное поведение реактивной силы оттекающих от поверхности горения продуктов газификации. Проводится сравнение расчетных и экспериментальных энергетических спектров величины реактивной силы. На модельном примере показана возможность оценки размеров образований на поверхности горения по спектральным компонентам.

Из опыта экспериментальных исследований процесса горения твердых ракетных топлив с помощью датчика реактивной силы [1, 2] можно сделать вывод, что практически у всех изученных топлив в режиме самоподдерживающегося горения наблюдаются колебания реактивной силы, а значит и скорости горения. В ряде случаев нестационарность горения была обусловлена неустойчивостью режима горения с ярко выраженным автоколебательным типом [3–5]. В основном же причина нестационарности реактивной силы заключается в неоднородности реагирования на поверхности горения. В случае гомогенного топлива это результат очаговости выгорания, а у топлив с гетерогенной структурой естественная неоднородность реагирования. Для смесевых топлив с достаточно мелкими компонентами без металлического горючего амплитуда колебаний, как правило, не превышает 10–15% от среднего уровня. В случае металлизированных смесевых топлив типичная амплитуда колебаний реактивной силы оттекающих от поверхности горения продуктов газификации имеет существенно нестационарный характер (рис. 1) и достигает 30–50% от среднего уровня. Это связано с существенной неоднородностью выгорания топлива. Исключая краевые эффекты, наиболее значительным вкладом в создание неоднородностей на поверхности горения является процесс формирования и отрыва агломератов от поверхности. Проверке этой гипотезы и посвящена данная работа.

Предварительная оценка показывает, что уровень возмущения, создаваемого одиночной частицей, существенно ниже уровня чувствительности датчика. Считаем, что запись реактивной силы представляет собой чисто кооперативный эффект воздействия множества частиц. Проверка гипотезы о решающем вкладе агломерации про-

водилась путем сравнения экспериментальных спектров сигнала реактивной силы с расчетными спектрами. Для проведения расчетов по математической модели агломерации необходимо знать спектр размеров частиц, покидающих поверхность горения. Такие экспериментальные данные по отборам конденсированных продуктов замороженных вблизи поверхности горения были получены и опубликованы в работе [6], где исследовались 7 типов металлизированных топлив различающихся типом защитного покрытия алюминиевых частиц. Смесевые топлива состояли из крупных фракций ПХА (18%) и октогена (35%), мелких фракций Al (18%) и ПХА (9%) и энергетического связующего (20%). В [6] изучены конденсированные продукты горения, их дисперсность и химический состав. Там же были представлены спектры колебаний сигнала реактивной силы при самоподдерживающемся горении.

Модель процесса формирования агломератов при горении СТТ базируется на представлениях модели “карманов”. Учитывая дисперсный состав исходных компонентов, можно считать, что в пространстве карманов, образующихся между крупнодисперсными частицами ПХА и октогена, находится практически однородное топливо (именуемое в дальнейшем как “заполнитель”), состоящее из связующего, мелкодисперсной фракции окислителя и мелкодисперсного Al. Считаем, что именно в процессе выгорания вещества “карманов” и происходит образование агломератов, а размеры получившихся агломератов коррелируют с объемом “карманов”. Поскольку в экспериментах, используемых в качестве источника данных, замораживание продуктов горения проводилось на небольшом удалении от поверхности горения СТТ, полагаем, что размеры и состав собранных агломератов совпадают с их значениями

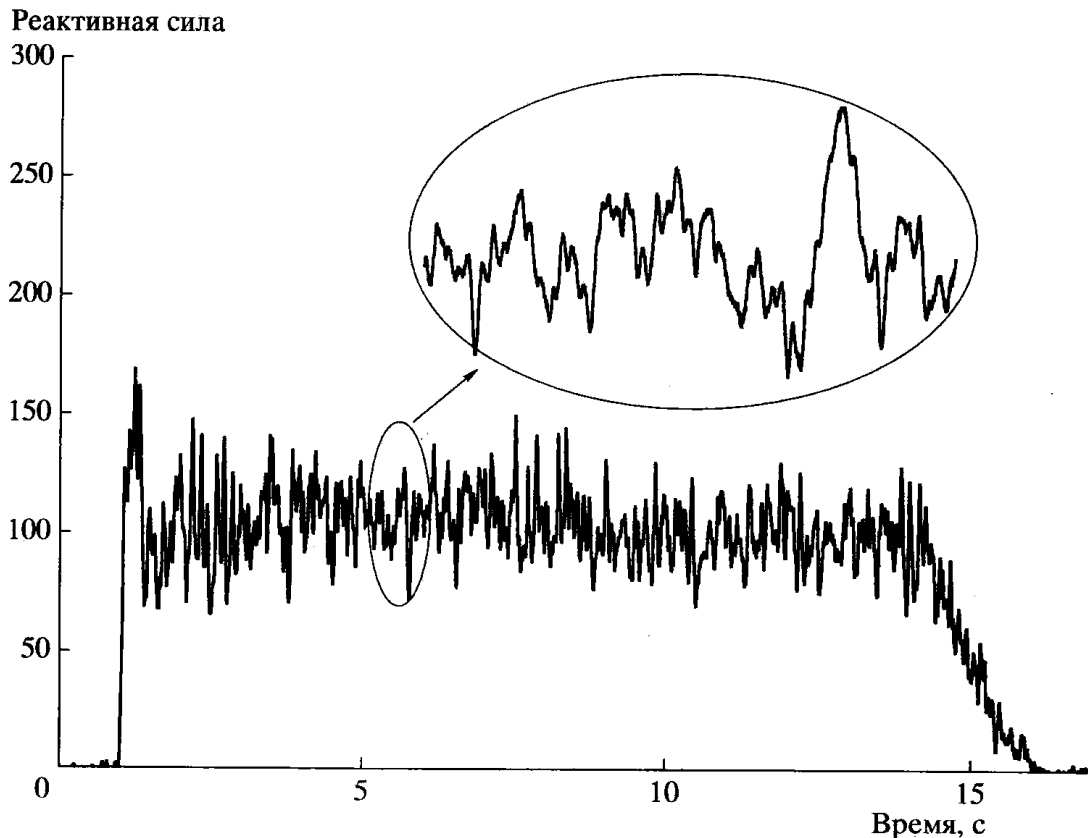


Рис. 1. Пример записи сигнала реактивной силы при горении металлизированного топлива.

в момент отрыва от поверхности топлива. Исходя из этого, решаем обратную задачу для получения информации о размерах “карманов”.

Вся масса собранных продуктов горения (окислы и агломераты) состоит из двух групп: мелкая фракция m_{fine} (меньше 80 микрон) и крупная m_{ag} (собственно агломераты). Для последней получено распределение частиц по размеру. Пусть C_{Al}^{ag} средняя массовая концентрация атомарного алюминия в отобранных агломератах, тогда объем металла, образовавшего агломераты, равен

$$V_{Al}^{ag} = m_{ag} C_{Al}^{ag} / \rho_{Al} = \beta \frac{\pi}{6} \sum_{i=1}^N n_i (d_i^{ag})^3. \quad (1)$$

Здесь ρ_{Al} – плотность алюминия, $1/\beta$ – среднее относительное увеличение объема агломерата за счет окисления Al, n_i – число частиц i -ой фракции агломератов с диаметром d_i^{ag} , N – число счетных каналов (фракций) гистограммы распределения частиц по размерам. Далее будут использоваться обозначения: C – массовая концентрация, d – диаметр, m – масса, V – объем, α – средняя объемная доля заполнителя в кармане, расходуемая на формирование агломерата, γ – объемная доля заполнителя, приходящаяся на карманы. Индексы означают следующее: 0 – невозмущенный, ag – агломерат, Al – алюминий, AP – перхлорат ammo-

ния, AP_{coarse} – крупная фракция перхлората аммония, AP_{fine} – мелкая фракция перхлората аммония, b – связующее, ccp – конденсированные продукты горения, НМХ – октоген, i, j – индексы, p – карман, pr – топливо, f – заполнитель, $fine$ – мелкий.

Величину C_{Al}^{ag} из (1) можно рассчитать по экспериментально определенной величине C_{Al}^{ccp} содержания металлического Al в продуктах горения в целом и массовой доле m_{ag} агломератов, содержащих металл и окисел, а также массовой доле m_{fine} мелких частиц, состоящих только из окиси Al_2O_3 :

$$m_{ag} C_{Al}^{ag} = (m_{ag} + m_{fine}) C_{Al}^{ccp} + \frac{9}{17} [(m_{ag} + m_{fine}) C_{Al}^{ccp} - m_{fine}].$$

Здесь учтено, что содержание атомарного Al в окисле составляет 9/17 его веса. После упрощения получаем

$$C_{Al}^{ag} = \frac{1}{17} \left[9 + 8 \left(1 + \frac{m_{fine}}{m_{ag}} \right) C_{Al}^{ccp} \right]. \quad (2)$$

Объем V_f , занимаемый в образце топлива заполнителем, включает в себя V_{Al} – алюминий, V_b – связку и V_{APfine} – мелкий перхлорат и равен

$$V_f = V_{Al} + V_b + V_{APfine} = m_{pr} \left(\frac{C_{Al}}{\rho_{Al}} + \frac{C_b}{\rho_b} + \frac{C_{APfine}}{\rho_{AP}} \right).$$

Из всего объема V_f вещества заполнителя доля $\gamma \leq 1$ приходится на карманы, а остаток приходится на прослойки, не образующие агломераты. Объемная доля металла $\alpha \leq 1$, заключенного в кармане, участвует в образовании агломератов. Оставшаяся часть алюминия выносится с поверхности в виде одиночных частиц, либо микроагломератов и успевает полностью окислиться на поверхности топлива, либо в газовой фазе до момента “замораживания”. Эти частицы окиси алюминия регистрируются экспериментальной методикой в едином счетном канале гистограммы распределения частиц в диапазоне размеров 0–80 микрон. Пренебрегая уносом алюминия из агломерата за время образования последнего на поверхности топлива и движения в газовой фазе до момента “замораживания”, можно записать уравнение баланса металла в агломератах:

$$\alpha \gamma \rho_f V_f C_{Al}^f = \rho_{Al} \beta \frac{\pi}{6} \sum_{i=1}^N n_i (d_i^{ag})^3, \quad (3)$$

здесь

$$C_{Al}^f = \frac{C_{Al}}{C_{Al} + C_b + C_{APfine}} -$$

концентрация Al в заполнителе. Таким образом, по соотношениям (1), (2) можно рассчитать коэффициент β . Из уравнения (3) можно получить только величину произведения параметров $\alpha \gamma$, т.е. один из этих параметров необходимо определить из дополнительных условий. В этом случае имеющихся данных будет достаточно, чтобы рассчитать объем вещества кармана, из которого образуется агломерат заданного размера. Для простоты область заполнителя (“карман”), при выгорании которой происходит образование одного агломерата, полагается сферической формы. Математическое моделирование структуры образца осуществляется путем наполнения цилиндрического объема круглыми частицами, начиная с крупных фракций перхлората и октогена, помещаемых в точку со случайным значением координаты вдоль оси образца. В такой одномерной постановке контролируется суммарная поперечная площадь “насыпки” – она не должна превосходить площади сечения образца. В случае превышения частица сдвигается, т.е. координата ее центра смещается, пока не будет достигнуто положе-

ние, в котором она не “торчит” за боковую грань образца. Порядок заполнения – от крупных фракций к мелким. Далее проводится наполнение заполнителем. Вначале по аналогичному алгоритму распределяются карманы (форма сферическая), объем которых обеспечивает образование агломератов соответствующих экспериментальному спектру данных. Оставшийся объем образца приписывается межчастичным прослойкам из заполнителя. Доля прослоек в общем объеме заполнителя равна величине $(1 - \gamma)$. Таким образом, из двух неизвестных параметров α и γ , второй характеризует геометрическую структуру упаковки. Именно его значение и задается в качестве независимого параметра, а параметр α определяется из соотношения (3).

При моделировании реактивной силы оттекающих от поверхности горения продуктов газификации предполагается, что в отсутствие процесса агломерации амплитуда колебаний реактивной силы за счет неплоского фронта горения и вариации соотношения горючее/окислитель незначительна, скорость горения постоянна. Образование же агломератов, напротив, вносит существенные возмущения величины реактивной силы. В зависимости от выбранного значения параметра α либо весь металл кармана участвует в образовании агломерата, либо отчасти, а остальные частицы алюминия покидают поверхность топлива, не контактируя с соседними частицами или в виде микроагломератов лишь из нескольких частиц алюминия. Механизм возникновения возмущающего воздействия на реактивную силу заключается в том, что образующийся агломерат экранирует (уменьшает) поверхность газификации и уменьшает величину реактивной силы в направлении нормали к поверхности.

Функция возмущения $\Phi(t)$ имеет единый вид для всех размеров агломератов. Это финитная производящая функция равная 0 всюду, за исключением отрезка $[0, 1]$. Таким образом, поведение реактивной силы во времени можно описать соотношением

$$F(t) = F_0 \left[1 - \sum_i A_i \sum_j \Phi \left(\frac{t - t_{i,j}}{\tau_i} \right) \right], \quad \tau_i = \frac{d_i^p}{u}, \quad (4)$$

где F_0 – уровень реактивной силы в отсутствие агломерации, $t_{i,j}$ – момент достижения фронтом горения поверхности j -го кармана, формирующего агломерат из i -го счетного канала. В зависимости от величины агломерата (номера счетного канала) варьируются амплитуда возмущения A_i и характерный временной масштаб τ_i выгорания кармана. Поскольку при сечении плоским фронтом сферического кармана объем V_i выгоревшего

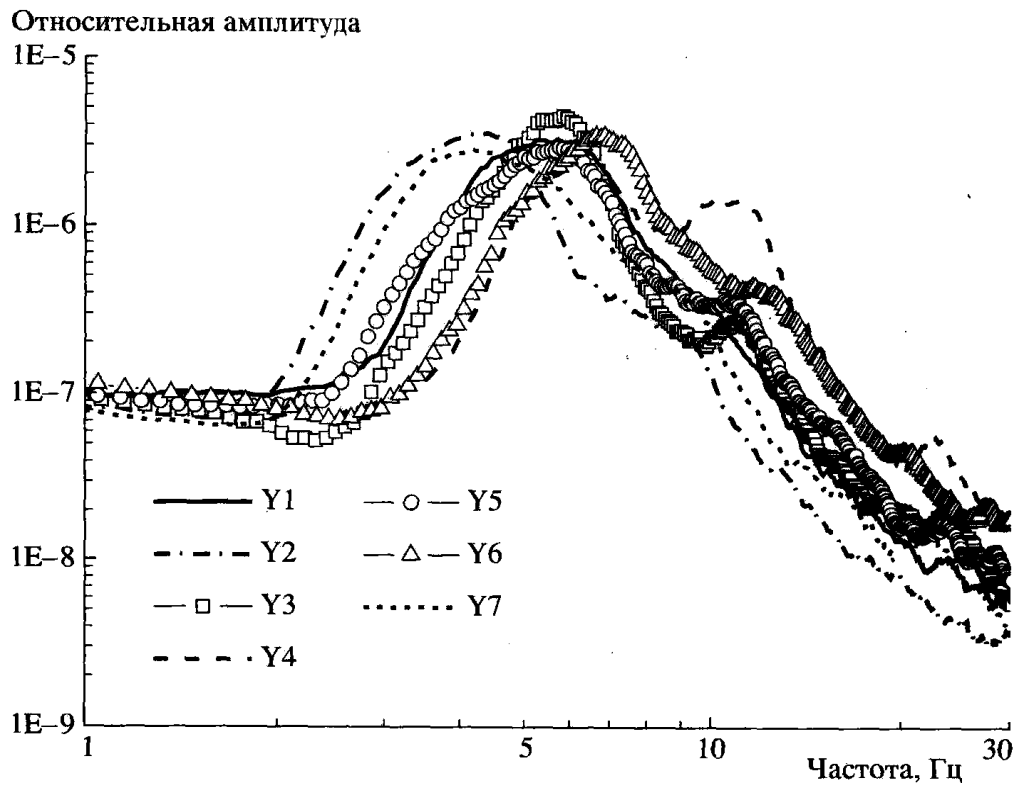


Рис. 2. Расчетные энергетические спектры возмущения реактивной силы за счет затенения поверхности горения агломератами.

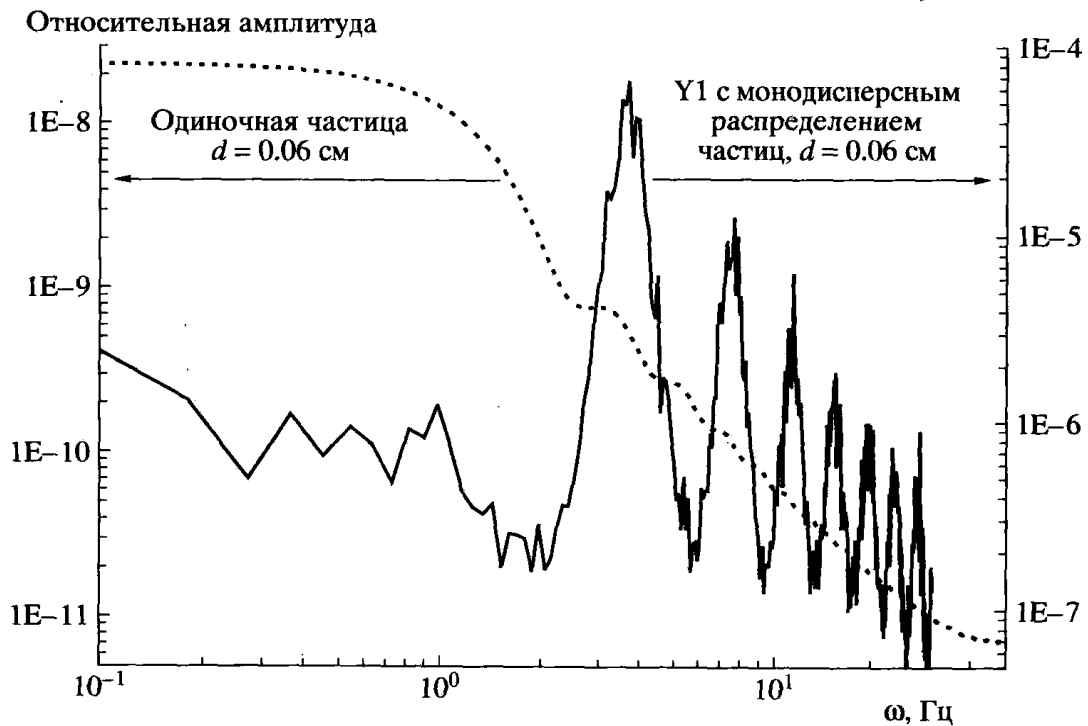


Рис. 3. Расчетные энергетические спектры возмущения реактивной силы одиночной частицей и при замене в топливе Y1 массы агломератов частицами с монодисперсным распределением и характерным размером 600 мкм.

вещества меняется по закону

$$V_i(t^*) = \frac{\pi}{3} h^2(t^*) [1.5d_i^p - h(t^*)],$$

$$h(t^*) = ut^*, \quad 0 \leq t^* = t - t_{i,j} \leq \tau_j,$$

то диаметр формирующегося агломерата равен

$$d_i^{ag}(t^*) = \left(\frac{6\alpha\rho_f C_{Al}^f V_i(t^*)}{\pi\beta\rho_{Al}} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

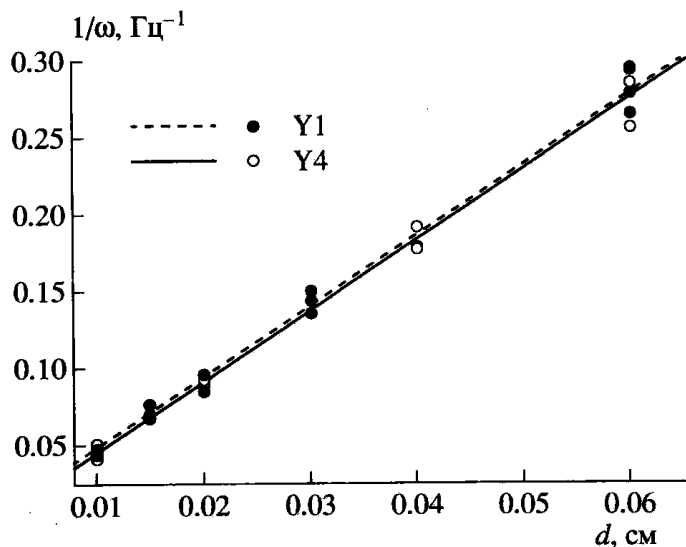


Рис. 4. Зависимость величины, $1/\omega$ от диаметра частиц агломератов.

Величина возмущающего фактора пропорциональна площади поверхности, затеняемой агломератом, и равна

$$\frac{\pi(d_i^{ag}(t^*))^2 F_0}{4 S} = \frac{\pi[h^2(t^*)(3d_i^p - 2h(t^*))]^{2/3} F_0}{4v^{2/3} S},$$

где S – площадь сечения образца и

$$v = \frac{\beta \rho_{Al}}{\alpha \rho_f C_{Al}^f}.$$

Тогда функция ϕ и амплитуда A_i имеют вид

$$\phi(x) = [x^2(3-2x)]^{2/3}, \quad A_i = \frac{\pi(d_i^{ag})^2}{4v^{2/3}S}, \quad (5)$$

где x изменяется от 0 до 1. Зная структуру расположения карманов в образце топлива, можно определить времена $t_{i,j}$ достижения каждого из них фронтом горения. Затем, по соотношениям (4), (5), рассчитывается изменение реактивной силы во времени и проводится спектральный анализ полученных данных.

Численные расчеты проводились для образцов длиной 2 см при диаметре 0.8 см. Усреднение спектров проводилось по результатам расчета 10 вариантов структуры заполнения образца. Сглаженные результаты представлены на рис. 2. Видно, что для всех топлив модельные спектры имеют резонансный характер. У топлив Y2 и Y7 резонансная частота несколько ниже. Топливо Y4 имеет второй резонансный купол в области более высоких частот. Именно это топливо отличается от других наличием значительного числа относительно мелких агломератов в диапазоне размеров 150–250 мкм.

На рис. 3 приводятся спектр возмущений реактивной силы для одиночной частицы диаметром 600 мкм и спектр условного топлива Y1' – это топливо Y1, в котором вся масса агломератов имеет монодисперсное распределение – состоит из ча-

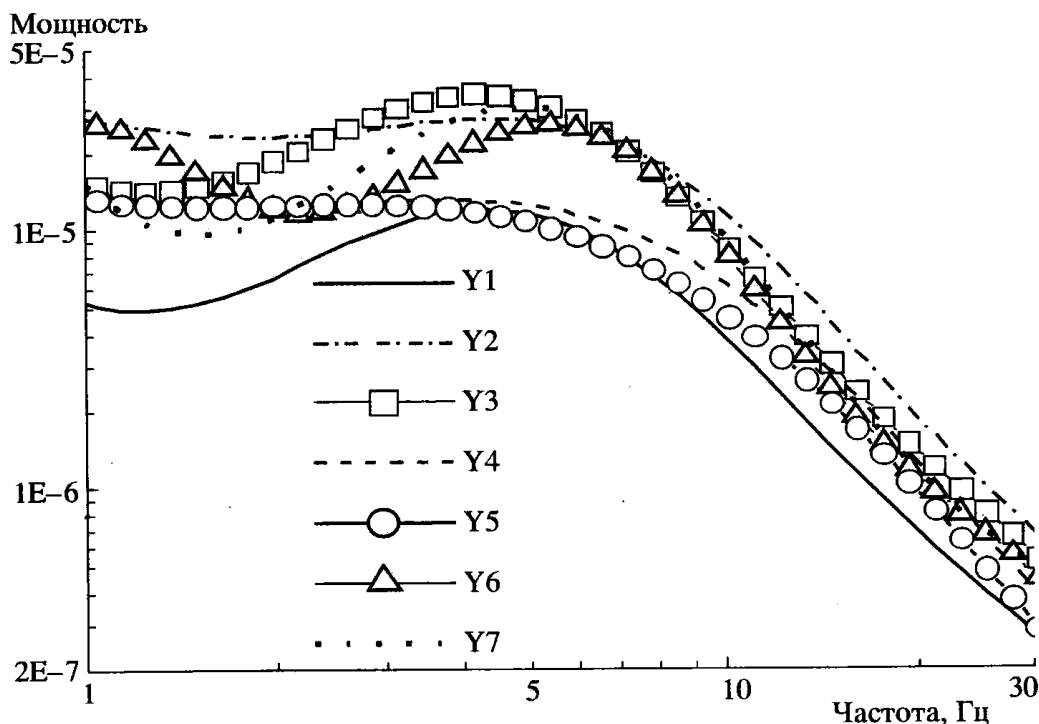


Рис. 5. Экспериментальные энергетические спектры.

стиц диаметром 600 мкм. Прием замены широкого спектра агломератов на монодисперсное распределение позволяет получить зависимость частоты резонансного пика от размера частиц. Для всех анализируемых топлив эти зависимости оказываются очень близкими и, можно считать, совпадающими в пределах разброса исходных данных (см. рис. 4.). Функция зависимости величины, обратной резонансной частоте ω , от диаметра частиц линейна. С помощью данной функции можно оценить характерные размеры, соответствующие резонансным куполам на рис. 2.

Сравнение расчетных результатов с экспериментальными данными (рис. 5) показывает, что, несмотря на отсутствие в эксперименте у некоторых топлив выраженного резонансного купола, область частот, где наблюдается наивысшая амплитуда возмущений, соответствует диапазону частот 3–7 Гц в как в экспериментальном, так и в расчетном случаях. На рис. 5 видно, что с уменьшением частоты в области менее 1.5 Гц мощность компонент экспериментального спектра существенно нарастает. Связано это, скорее всего, с наличием такого низкочастотного процесса, как изменение геометрии горячей поверхности. Именно вклад этого относительно медленного и крупномасштабного (сравнимого по площади с сечением образца) явления и приводит к меньшей выраженности экспериментальных куполов. Следует отметить, что относительные амплитуды в экспериментальных спектрах приблизительно на порядок больше расчетных. Возможно, это связано с более мощными процессами при отрыве агломератов от поверхности, чем простое уменьшение газификации, заложенное в модельный механизм. В заключение можно сказать, что результаты моделирования показывают как существование связи между размерами образований на поверхности горения смесевых металлизированных топлив и

спектром колебаний реактивной силы оттекающих от поверхности горения продуктов газификации, так и возможность оценки размеров этих образований. При дальнейшем развитии подхода желательно получить экспериментальные данные на составах с более выраженными амплитудно-частотными особенностями, а при моделировании следует учесть следующие факторы: проведение вариаций формы функции ϕ с целью уточнения закона влияния (возможна зависимость функции ϕ от размера агломерата), учет влияния вариации соотношения перхлората, октогена и заполнителя на величину реактивной силы, затенение поверхности горения исходными частицами металла, учет затенения агломератами компонент, отличных от заполнителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Симоненко В.Н., Зарко В.Е. // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17. № 3. С. 129.
2. Кискин А.Б., Симоненко В.Н. // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36. № 1. С. 129.
3. Zarko V.E., Simonenko V.N., Kiskin A.B. Radiation-Driven, Transient Burning: Experimental Results // Nonsteady Burning and Combust. Stability of Solid Propellants. Progress in Astronautics and Aeronautics / Eds. De Luca L., Price E.W., Summerfield M. Washington: AIAA, 1987. V. 143. P. 363.
4. Симоненко В.Н., Кискин А.Б., Зарко В.Е., Свит А.Г. // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33. № 6. С. 68.
5. Zanotti C., Carretta U., Grimaldi C., Colombo G. Self-Sustained Oscillatory Burning of Solid Propellants: Experimental Results // Nonsteady Burning and Combust. Stability of Solid Propellants. Progress in Astronautics and Aeronautics / Eds. De Luca L., Price E.W., Summerfield M. Washington: AIAA, 1987. V. 143. P. 399.
6. Glotov O.G., Kiskin A.B., Zarko V.E. et al. // Proc. of 33th Intern. Annual Conf. of ICT. Karlsruhe. Federal Republic of Germany. 2002. report P80.