

УДК 533.2

**Определение акустической проводимости зоны горения
безметалльных и металлизированных энергетических
конденсированных систем**

Куроедов А.А.*, Борисов Д.М., Семёнов П.А.*****

Исследовательский центр имени М.В Келдыша,

Онежская ул., 8, Москва, 125438, Россия,

**e-mail: kaa8000@yandex.ru*

***e-mail: borisovdm62@mail.ru*

****e-mail: mezhyvel_pavlo@mail.ru*

Аннотация

В работе представлена конструкция импульсной Т-камеры для определения акустической проводимости зоны горения энергетических конденсированных систем. В качестве устройств генерации возмущений давления используются вспомогательные камеры с разрывными мембранами. Конструкция установки позволяет варьировать частоту реализуемых возмущений и рабочее давление в Т-камере. Представлены результаты измерений для низкотемпературных безметалльных и высокотемпературных металлизированных составов. Проводится сравнение акустической проводимости и функции отклика зоны горения по давлению исследуемых составов с аналогами.

Ключевые слова: акустическая неустойчивость, Т-камера, коэффициент затухания, твёрдое топливо, акустическая проводимость.

Введение

Исследование устойчивости к малым изоэнтропическим возмущениям является важным этапом при проектировании энергетических установок твердого топлива (ЭУТТ). Переход на неустойчивые режимы работы может приводить к различным нежелательным последствиям, вплоть до разрушения конструкции летательного аппарата, в составе которого используется ЭУТТ.

Процесс исследования заключается в корректном определении притока и диссипации акустической энергии в камере сгорания установки. Основным источником акустической энергии является зона горения твёрдого топлива (ТТ), тогда как к потерям относятся вынос акустической энергии через сопло, потери на частицах, вязкоупругие потери в топливе и на элементах конструкции. Динамические характеристики зоны горения ТТ заслуживают особого внимания, так как именно в ТТ запасена энергия, идущая на подпитку колебаний давления в камере сгорания. Сложность физико-химических процессов, протекающих в зоне горения ТТ, значительно ограничивает возможности численного моделирования акустической проводимости зоны горения с использованием моделей нестационарного горения смесевых ТТ. В настоящее время целесообразно использовать различные расчетно-экспериментальные методы определения акустической проводимости зоны горения ТТ.

Начало интенсивных работ по экспериментальному исследованию акустических свойств зоны горения приходится на конец 1950-х – начало 1960-х гг. В этот период в США Э. Прайсом (E.W. Price) была предложена специальная

установка для определения акустической проводимости зоны горения ТТ, называемая Т-камерой. [1]. В самой простой конфигурации Т-камера представляет собой металлическую трубу длиной от полуметра до нескольких метров и диаметром несколько сантиметров. По торцам трубы располагаются исследуемые образцы ТТ в форме дисков. Продукты сгорания истекают из отверстия в середине трубы, что определяется необходимостью минимизации потерь для первой продольной моды колебаний. Основными преимуществами данной установки являются простота конструкции, небольшой расход ТТ, приходящийся на один опыт, а также возможность определения акустической проводимости зоны горения в широком диапазоне частот и давлений в камере сгорания. Данные обстоятельства делают Т-камеру наиболее применимым устройством определения акустической проводимости зоны горения ТТ.

В классической Т-камере происходит самопроизвольное возбуждение первой продольной моды колебаний продуктов сгорания ТТ. При этом в эксперименте фиксируются коэффициент роста (growth constant) на начальном этапе работы Т-камеры (после инициации зарядов) и коэффициент затухания колебаний (decay constant) в конце запуска после того, как оба заряда выгорают (данный подход в англоязычной литературе получил название growth-decay approach). Первые работы по исследованию процессов в Т-камере были направлены на подтверждение возможности получения воспроизводимых результатов в данной установке и возможности сравнения разных рецептур ТТ не только качественно, но и количественно [2, 3, 4]. В дальнейшем были предложены новые схемы Т-камеры,

позволяющие определять акустическую проводимость зоны горения для высоких частот (до 20 кГц). В таких конфигурациях центральное сопло заменялось щелями (прорезями), сделанными в корпусе Т-камеры по кольцу [5].

По мере совершенствования топливных рецептов и введения в состав ТТ металлических добавок все чаще возникали случаи, когда в классической Т-камере не происходило самопроизвольное возбуждение колебаний, вызванное сильным рассеянием акустической энергии на частицах окислов металлов. Однако существуют примеры успешного применения классической Т-камеры для металлизированных ТТ [6].

В конце 1960-х годов сформировались два основных подхода к решению данной задачи. Первый подход заключался в создании возмущения давления в Т-камере внешними устройствами с дальнейшим измерением коэффициентов затухания генерированных возмущений [7, 8, 9, 10, 11, 12]. Второй подход сводился к развитию поверхности горения ТТ с целью увеличения притока акустической в камеру сгорания.

В рамках первого подхода появились варианты импульсной Т-камеры (pulsed T-burner) [7, 8]. В дальнейшем была предложена более универсальная установка, которая позволяла в одном запуске измерять и коэффициент роста, и коэффициент затухания в Т-камере (в том числе и на частицах окислов металлов). Данный результат достигался размещением по торцам Т-камеры двух устройств для генерации возмущений. Первое устройство срабатывало через некоторое время

после воспламенения зарядов, второе – в начале режима спада давления в конце работы камеры.

В рамках второго подхода удавалось создать колебания в классической Т-камере путем сложной перфорации поверхности заряда [13]. Также был предложен метод, в котором происходила замена формы заряда с диска на стакан или цилиндр с перфорацией. От опыта к опыту варьировалась начальная площадь горения зарядов и измерялся только коэффициент роста. Установка получила название Т-камера с варьируемой площадью (Variable Area T-burner или VATB) [14].

В данной работе предлагается конфигурация импульсной Т-камеры, с помощью которой проводятся измерения акустической проводимости и функции отклика зоны горения по давлению для безметалльного низкотемпературного твердотопливного состава и металлизированного состава в диапазоне частот от 150 ... 850 Гц.

Описание экспериментальной установки

Схема предлагаемой импульсной Т-камеры представлена на рис. 1. В состав установки входят классическая Т-камера [13] и две вспомогательных камеры генерации возмущений давления (далее ВК). Т-камера состоит из пяти съёмных стальных секций. Изменение числа секций Т-камеры позволяет варьировать частоту создаваемых продольных колебаний продуктов сгорания, давая возможность измерять акустическую проводимость зоны горения в широком диапазоне частот. Конструкция соплового блока предусматривает возможность изменения диаметра

критического сечения до запуска установки путём замены молибденового вкладыша.

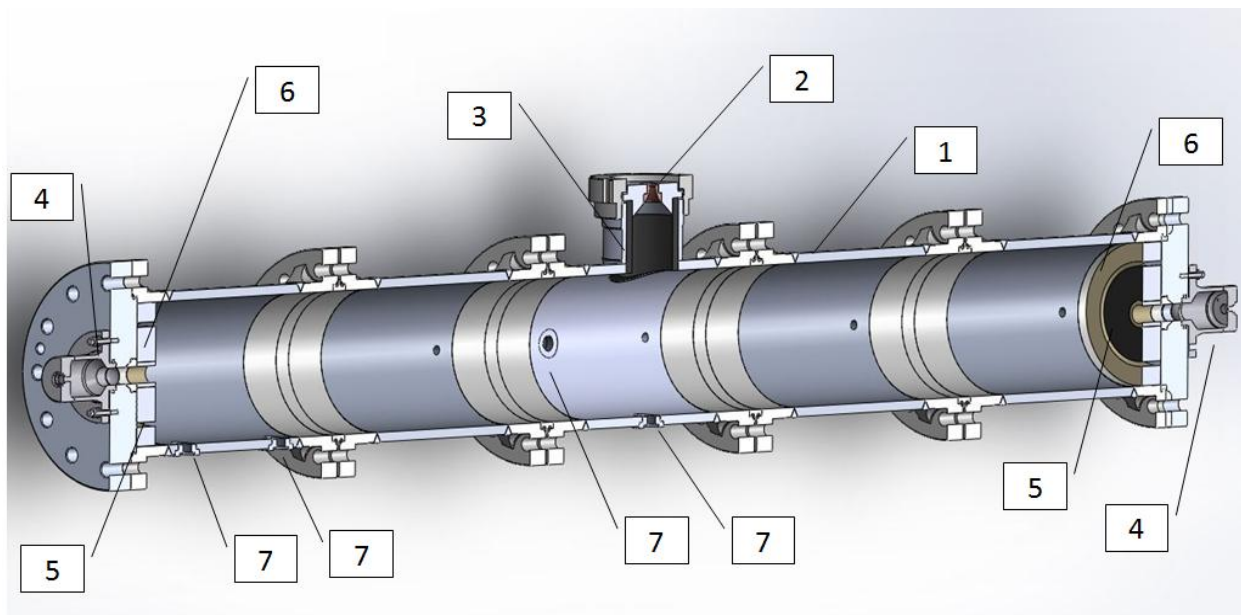


Рис. 1. Схема импульсной Т-камеры: 1 - съёмные стальные секции Т-камеры; 2 – молибденовый вкладыш критического сечения сопла; 3 – сопловой блок; 4 – вспомогательные камеры генерации малых возмущений; 5 – ТТ; 6 – бронировка поверхности ТТ; 7 – посадочные места импульсных датчиков давления.

В качестве устройств генерации импульса давления в Т-камере выступают вспомогательные камеры генерации возмущений давления (ВК), которые крепятся к крышкам Т-камеры посредством шпилек. В свободном объёме ВК размещается пиротехнический состав, обеспечивающий разрыв металлической мембраны, зажимаемой в канале, соединяющем свободный объём ВК и Т-камеры (рис. 2). Посадочное место разрывной мембраны в крышке Т-камеры и поверхность ответной детали ВК имеют форму усеченного конуса. Данная конструкция позволяет сформировать при зажиме мембраны кольцевой концентратор напряжений, по которому происходит её разрыв.

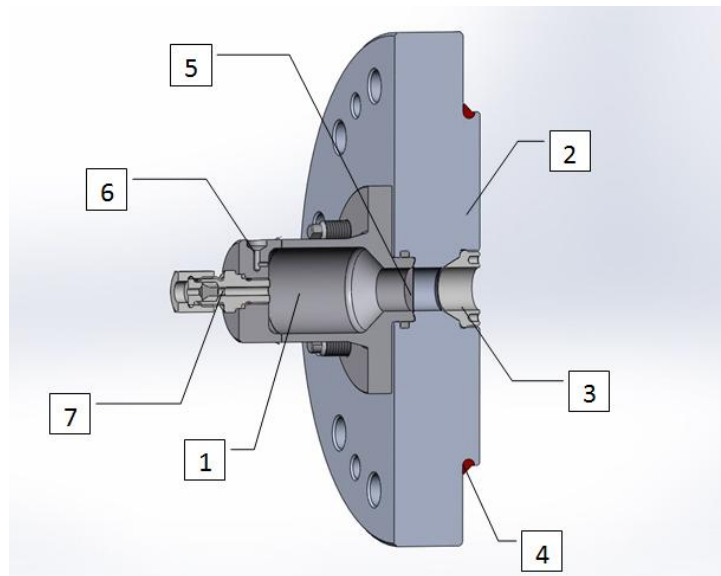
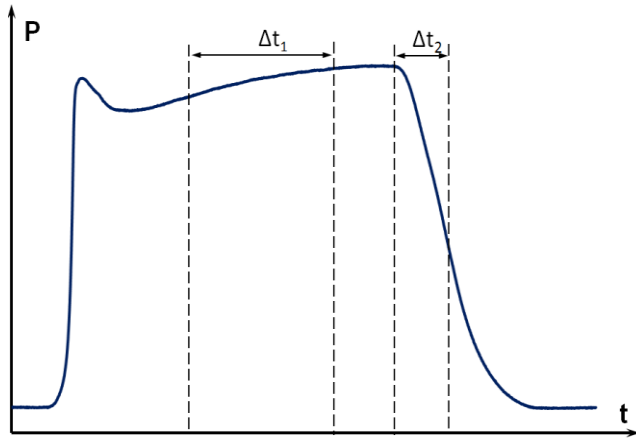


Рис. 2. Схема установки вспомогательной камеры генерации малых возмущений на крышке Т-камеры: 1 – вспомогательная камера; 2 – крышка Т-камеры; 3 – втулка короткая; 4 – уплотнительная резинка; 5 – разрывная мембрана; 6 – посадочное место датчика давления; 7 – штуцер сальниковый.

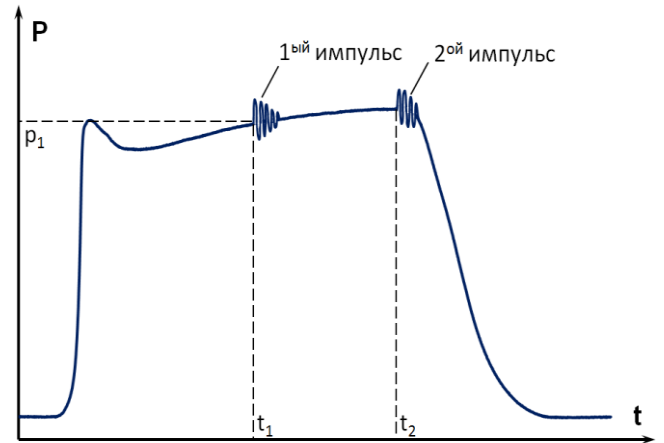
Методика проведения эксперимента

Для определения акустической проводимости зоны горения исследуемого топлива проводится серия опытов. Для каждого опыта изготавливаются цилиндрические заряды с центральным отверстием. В первом опыте ВК не используются, а по торцам Т-камеры устанавливаются крышки без отверстий, к внутренней поверхности которых приклеиваются изготовленные заряды. В начальный момент времени после подачи сигнала происходит одновременное срабатывание воспламенительных устройств №1 и №2, необходимых для поджига основных зарядов (рис. 4). По полученным данным определяется

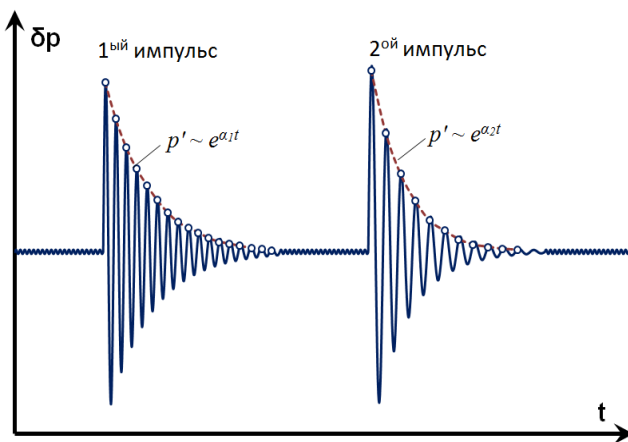
продолжительность работы установки, необходимая для правильного выставления временной задержки срабатывания пиротехнических составов в ВК в последующих запусках (рис. 3а).



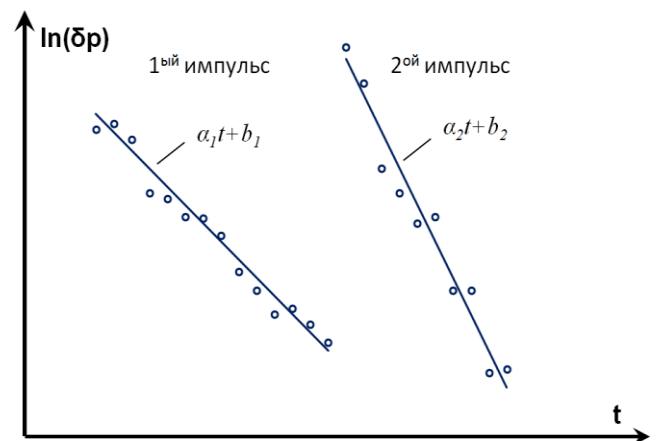
а) определение временных задержек в запуске без ВК



б) генерация импульсов в Т-камере

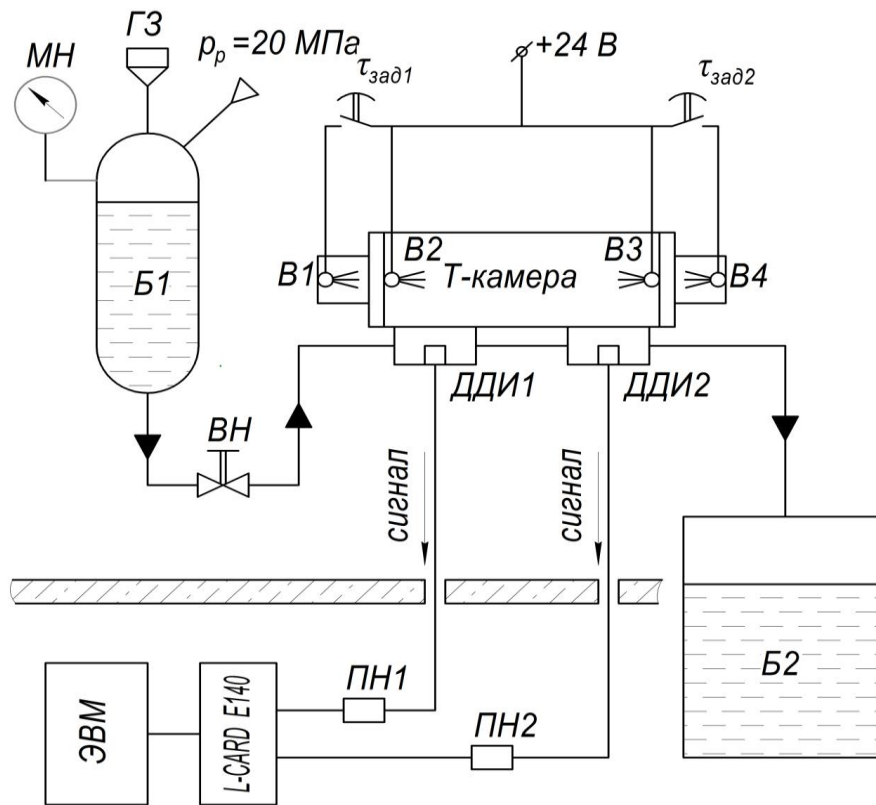


в) выделение пульсационной составляющей



г) расчет коэффициентов затухания

Рис. 3. Последовательность измерений.



Техническая характеристика

- | | |
|--------------------------|-------------------------------------|
| 1. Рабочая среда | - продукты сгорания ТТ, |
| 2. Вспомогательная среда | - вода; |
| 3. Расход вспом. среды | - 5 л/мин; |
| 4. Время работы системы | - до 10 с; |
| 5. Задержки | - $\tau_{зад1} = 3...5 \text{ с}$; |
| | $\tau_{зад2} = 6...9 \text{ с}$. |

Рис. 4. Схема испытательного стенда.

В дальнейших запусках по торцам Т-камеры устанавливаются ВК с металлическими мембранами. Временная задержка выставляется таким образом, чтобы срабатывание ВК приходилось на основной период работы установки Δt_1 и на участок спада Δt_2 , когда оба заряда уже выгорели. В начальный момент времени срабатывают воспламенительные устройства №1 и №2. Затем после того как пройдет время, установленное на задержках, последовательно срабатывают воспламенительные устройства №3 и №4. При достижении в ВК давления разрыва мембраны в Т-камере создается импульс давления, который затухает со временем. На основании измеренных пульсаций давления рассчитываются коэффициенты затухания первого и второго импульсов (рис. 3б, в, г).

По полученным коэффициентам затухания рассчитывается акустическая проводимость зоны горения ТТ и функция отклика зоны горения по давлению. Для первого импульса коэффициент затухания

$$\alpha_1 = \alpha_c + \alpha_d, \quad (1)$$

Где $\alpha_c > 0$ – коэффициент роста, характеризующий приток энергии от поверхности горения ТТ; $\alpha_d < 0$ – коэффициент затухания, описывающий диссипацию акустической энергии Т-камере. При этом [9, 11]:

$$\alpha_c = 2f \frac{S_b a}{S_c a_g} (A_b + M_b), \quad (2)$$

$$R_b = \frac{1}{\gamma} + \frac{A_b}{\gamma M_b}, \quad (3)$$

где f – частота реализуемых колебаний; S_b – площадь горения ТТ; S_c – площадь проточной части Т-камеры; $a = 2Lf$ – скорость звука в продуктах сгорания; L – длина проточной части Т-камеры; $a_{th} = \sqrt{\gamma R T_{th}}$ – теоретическая скорость звука в продуктах сгорания, находящихся в термодинамическом равновесии; T_{th} – температура продуктов сгорания; A_b – акустическая проводимость зоны горения; $M_b = \frac{\rho_p u_T(P_T)}{a_{th} \rho_{th}}$ – число Маха у поверхности горения ТТ; ρ_p – плотность ТТ; $u_T(P_T)$ – скорость горения ТТ при давлении $P(t_1)$, R_b – функция отклика зоны горения по давлению.

Для второго импульса $\alpha_c = 0$, так как оба заряда уже выгорели, поэтому

$$\alpha_2 = \alpha_d \quad (4)$$

Таким образом, получаем следующие соотношение для акустической проводимости:

$$A_b = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) S_c a_g}{2f S_b a} - M_b \quad (5)$$

В работе [11] было предложено соотношение для A_b , учитывающее различие частот реализуемых колебаний для первого и второго импульсов:

$$A_b = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_1}{f_1} - \frac{\alpha_2}{f_2} \right) \frac{S_c}{S_b} \frac{a}{a_{th}} - M_b \quad (6)$$

Для получения значений акустической проводимости при других частотах и давлениях в установке изменяется количество секций и диаметр критического сечения сопла.

Результаты экспериментов

В работе проводились измерения акустической проводимости зоны горения для низкотемпературного безметалльного (№1-Б в таб.1) и металлизированного (№3-М в таб.1) составов.

Таблица. 1. Характеристики составов.

	ПХА	Связка	Алюминий
№1-Б	42% – < 50 мкм 28% – 160-315 мкм	22%	—

№2-Б*	76% - 90 мкм	24% PBAN	—
№3-М	42% – < 50 мкм 28% – 160-315 мкм	11%	18%
№4-М**	31,95% - 2 мкм 39,05% - 200 мкм	12% НТРВ	15% 95 мкм
№5-М***	38,5% - < 50 мкм 38,5% – 165-315 мкм	20% Бутилкаучук	3% АСД-4
№6-М***	32% - <50 мкм 32% – 165-315 мкм	20% Бутилкаучук	16% АСД-4

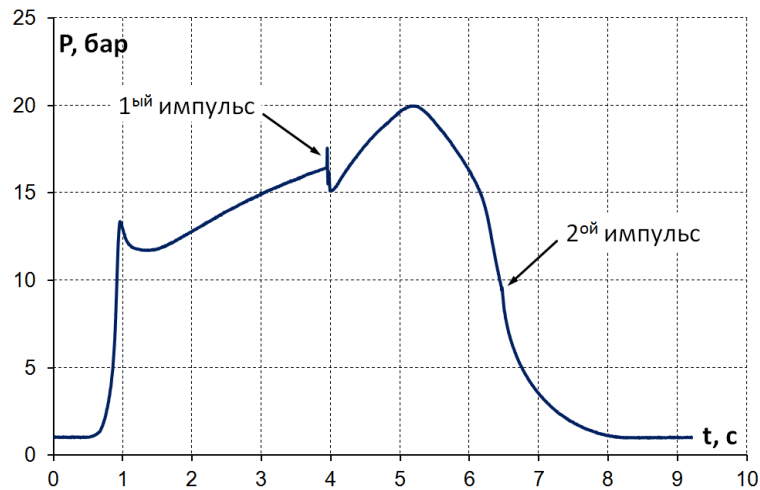
* - данные представлены на основании [16]

** - данные представлены на основании [15, с. 86].

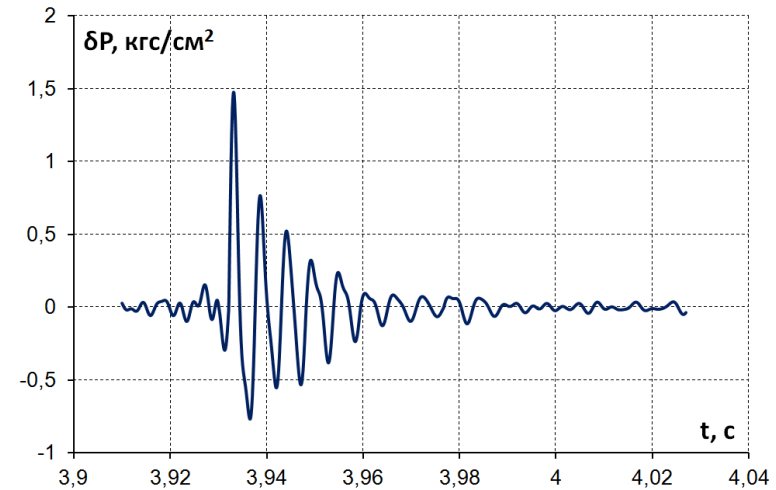
*** - данные представлены на основании [13].

Как следует из данных, представленных в таблица. 1, прямое сравнение результатов проведенных экспериментов для групп составов {№1-Б, №2-Б} и {№3-М, №4-М, №5-М, №6-М} является не совсем корректным. Данное обстоятельство обусловлено некоторыми различиями в массовых долях компонент и дисперсности частиц ПХА и алюминия.

Результаты измерений с использованием низкотемпературного состава №1-Б для случая пяти секций Т-камеры (минимальная частота) представлены на рис. 5 а-г. Результаты измерений с использованием металлизированного состава №3-М для случая пяти секций Т-камеры представлены на рис. 6 а-г.

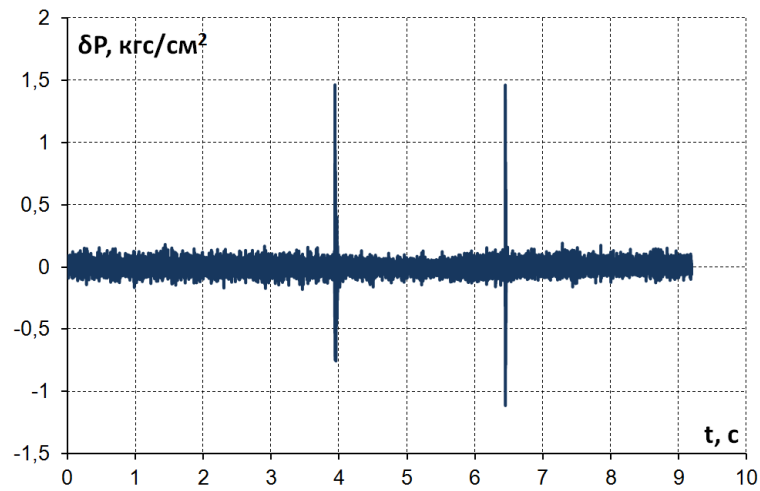


а) Давление у поверхности горения ТТ



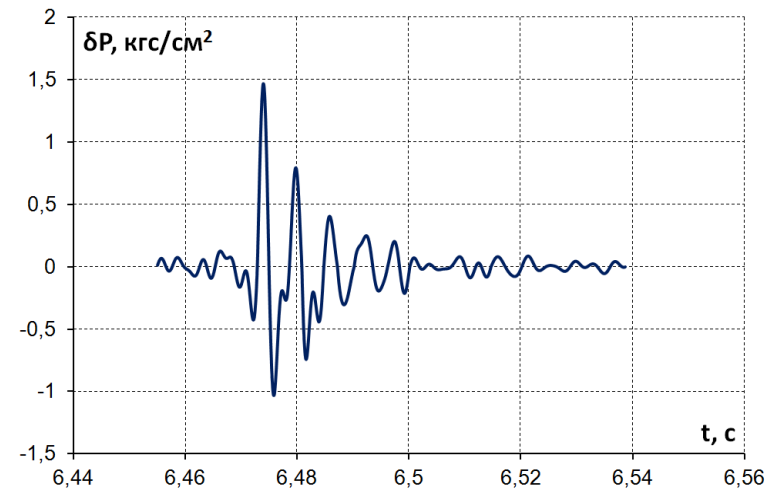
б) Пульсации давления после срабатывания

первой ВК



в) Пульсационная составляющая давления

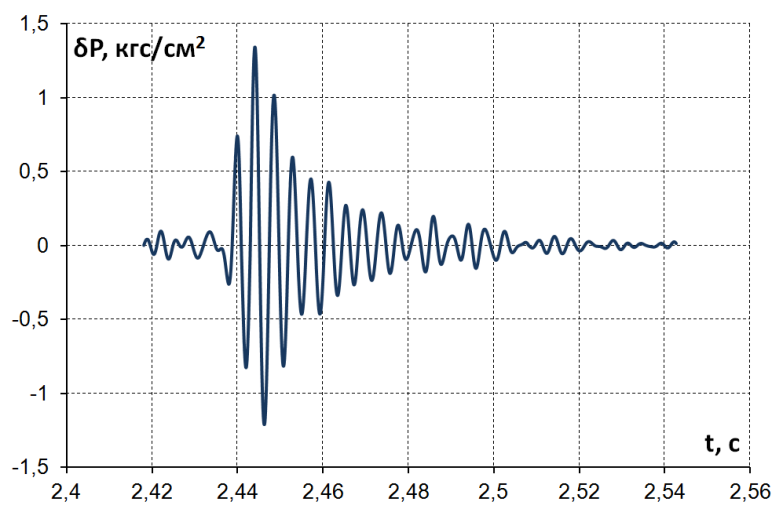
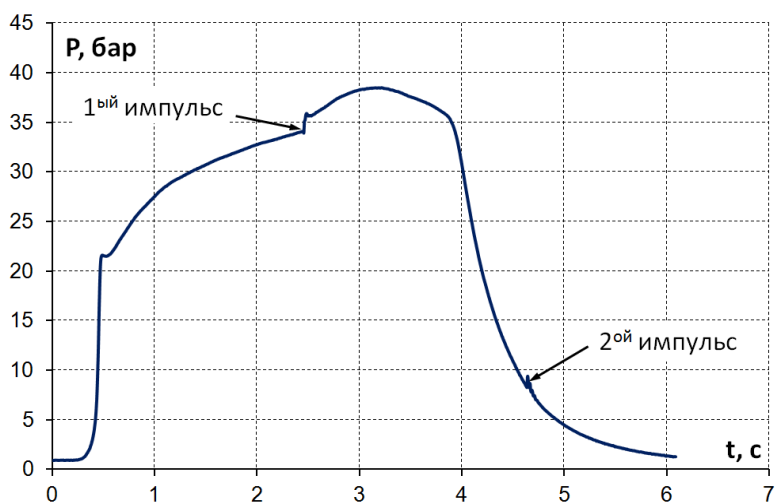
в зоне у поверхности горения ТТ;



г) Пульсации давления после срабатывания

второй ВК;

Рис. 5. Генерация возмущений давления в Т-камере с низкотемпературным безметальным топливом №1-Б.

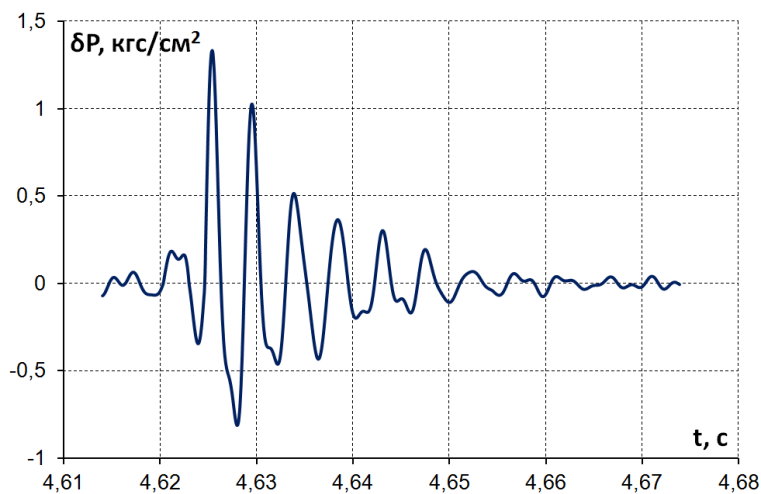
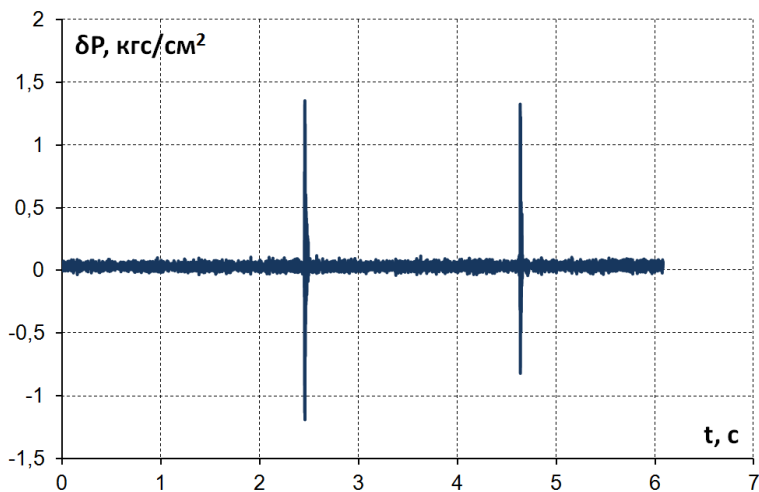


а) Давление у поверхности горения ТТ

б)

Пульсации давления после срабатывания

первой ВК



в) Пульсационная составляющая давления

г)

Пульсации давления после срабатывания

в зоне у поверхности горения ТТ;

второй

ВК;

Рис. 6. Генерация возмущений давления в Т-камере с металлизированным топливом №3-М.

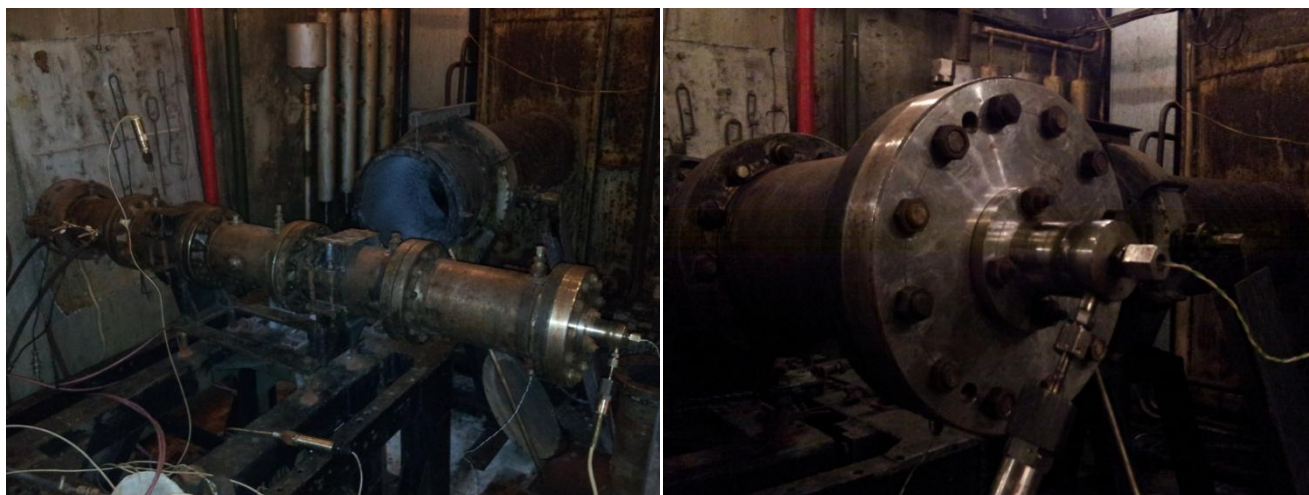


Рис. 7. Т-камера с ВК на стапеле испытательного стенда.

Результаты расчетов акустической проводимости, функции отклика зоны горения и соответствующих параметров ПС для других частот представлены в таблица. 2 и 3.

Таблица. 2. Результаты расчетов для безметального состава №1-Б.

№ запуска	1	2	3	4
$\alpha_1, 1/c$	-84,3	-91,15	-92,3	-95,6
$\alpha_2, 1/c$	-89,3	-98,292	-102,2	-108,1
$f_1, Гц$	182,4	267	460	587
$L, м$	1,604	1,304	0,882	0,582
$R_1, м$	0,0585	0,0585	0,0585	0,0585
$R_2, м$	0,014	0,014	0,014	0,014
$a, м/с$	585,4	696,5	811,5	683,2
$P_g, МПа$	1,638	1,664	1,69	1,7
$T_{th}, К$	1497,15	1497,22	1497,3	1497,3
$\rho_{th}, кг/м^3$	2,46	2,5	2,55	2,55
$M_b, 10^{-3}$	2,2	2,1	2,1	2,1
$a_{th}, м/с$	929,738	929,725	929,708	929,708
$A_b, 10^{-3}$	13,3	10,8	9,2	8
R_b	5,45	4,59	4,09	3,78

Таблица. 3. Результаты расчетов для металлизированного состава №3-М.

№ запуска	5	6	7	8
$\alpha_1, 1/c$	-76,1	-80,01	-85,2	-92
$\alpha_2, 1/c$	-88,1	-100,1	-95,2	-115
$f_1, \Gamma\text{ц}$	236,7	396,6	620,17	823
$L, \text{м}$	1,58	1,28	0,858	0,558
$R_{1,\text{м}}$	0,055	0,055	0,055	0,055
$R_{2,\text{м}}$	0,014	0,014	0,014	0,014
$a, \text{м/с}$	747,9	1015,4	1064,2	918,6
$P_g, \text{МПа}$	3,4	2,9	3,6	3,2
$T_{th}, \text{К}$	3403,4	3390,7	3408,34	3400
$\rho_{th}, \text{кг/м}^3$	3,35	2,9	3,55	3,23
$M_b, 10^{-3}$	4	4,4	3,9	4,1
$a_{th}, \text{м/с}$	1332,5	1330,52	1333,3	1332
$A_b, 10^{-3}$	14,6	19	6,4	7,3
R_b	3,84	4,54	2,21	2,3

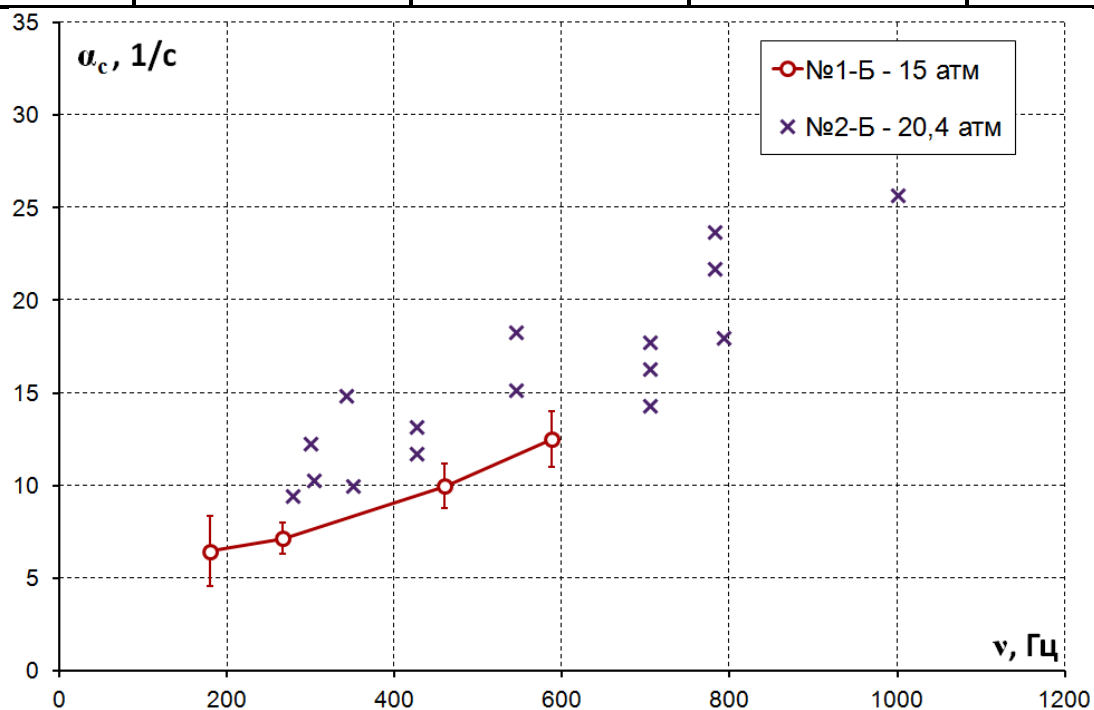


Рис. 8. Зависимость коэффициента роста зоны горения безметаллических ТТ №1-Б и №2-Б от частоты малых возмущений давления в Т-камере.

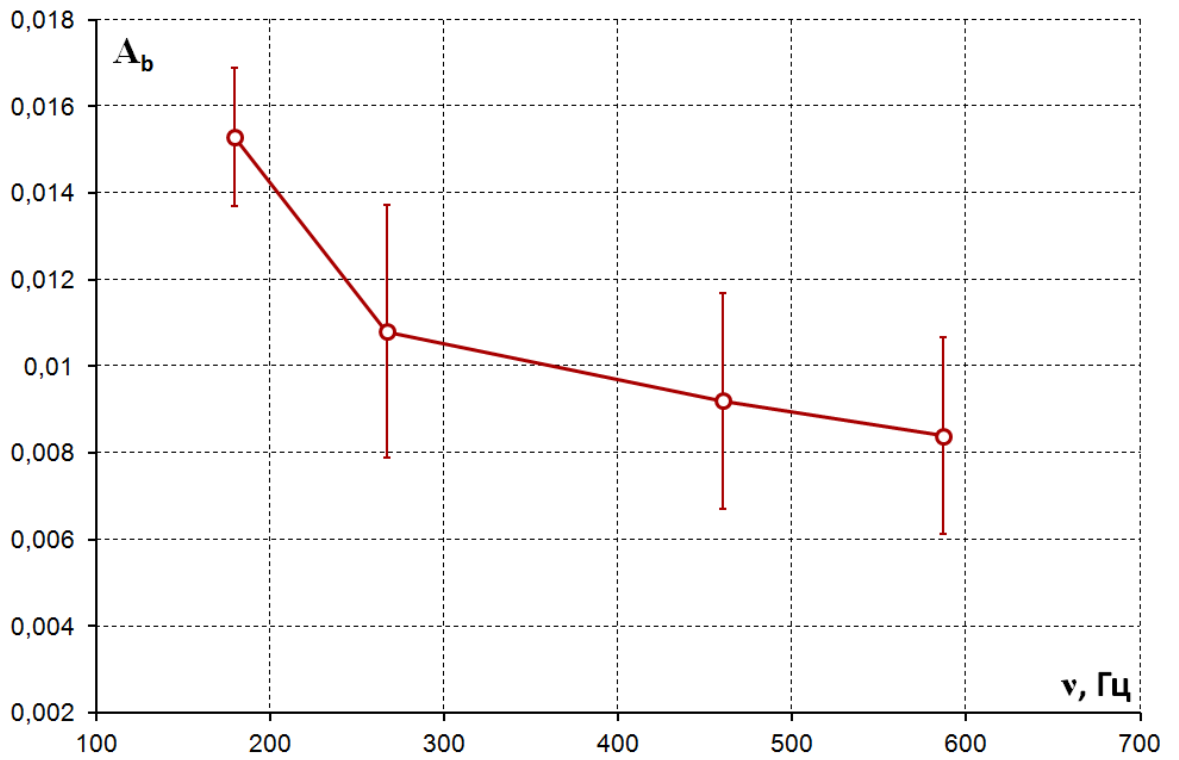


Рис. 9. Зависимость акустической проводимости зоны горения безметалльных ТТ №1-Б от частоты малых возмущений давления в Т-камере.

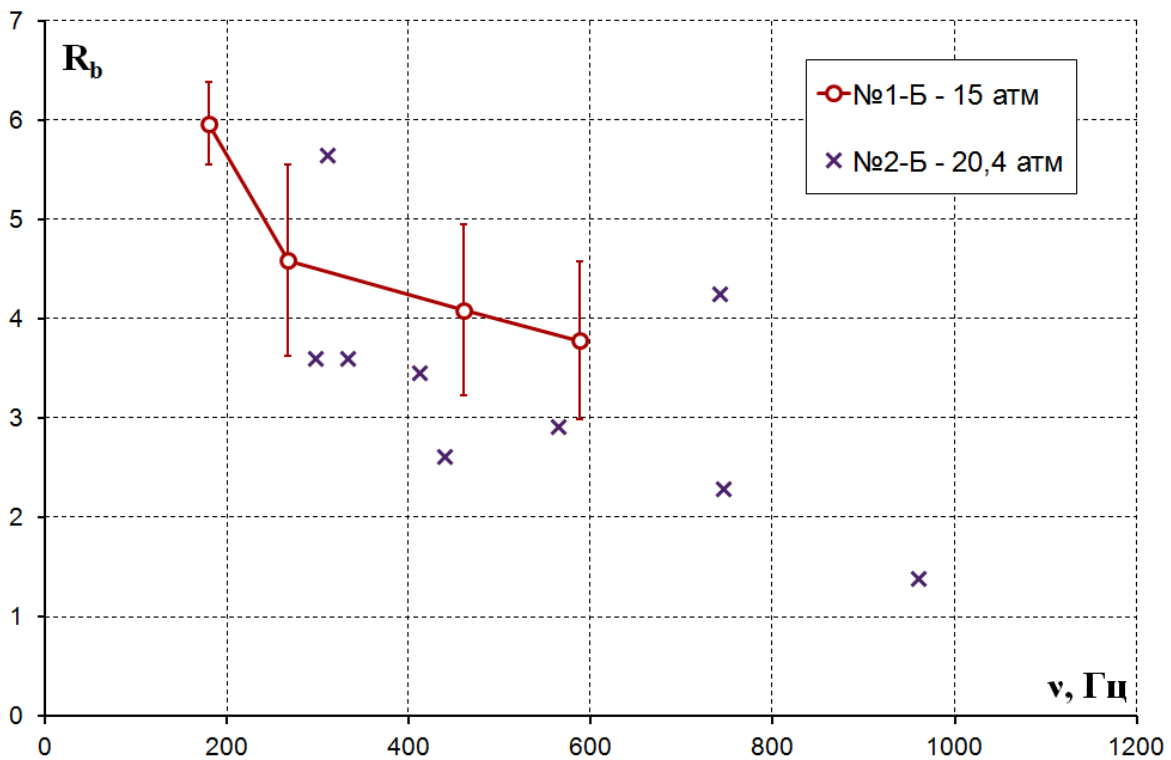


Рис.10. Зависимость функции отклика зоны горения по давлению для безметалльных ТТ №1-Б и №2-Б от частоты малых возмущений давления в Т-камере.

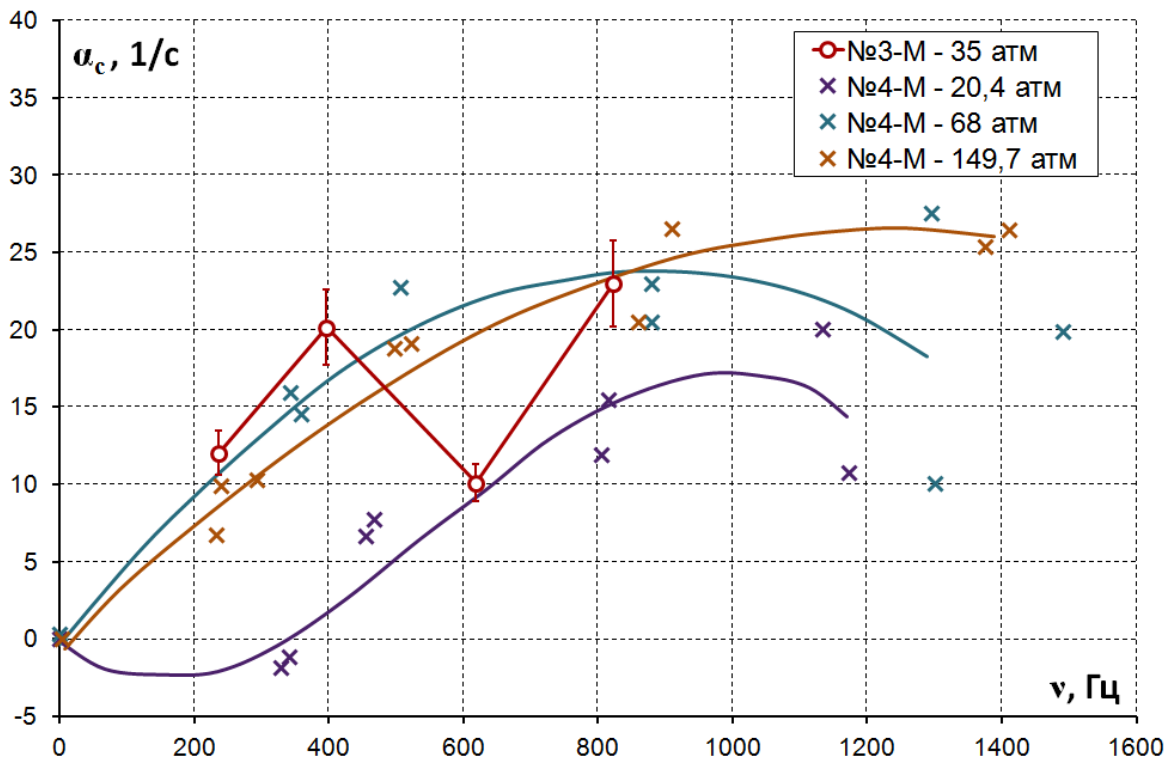


Рис. 10. Зависимость коэффициента роста зоны горения металлизированных ТТ №3-М и №4-М от частоты малых возмущений давления в Т-камере.

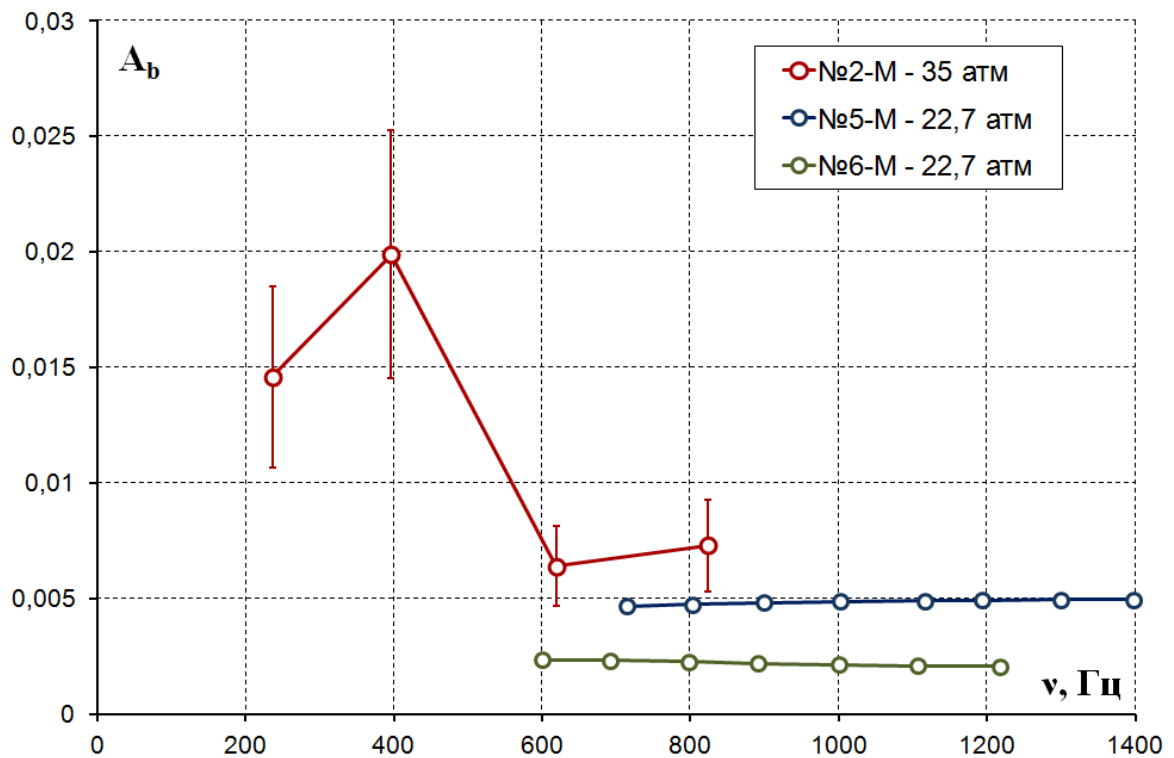


Рис.11. Зависимость акустической проводимости зоны горения металлизированных ТТ №3-М №5-М и №6-М от частоты малых возмущений давления в Т-камере.

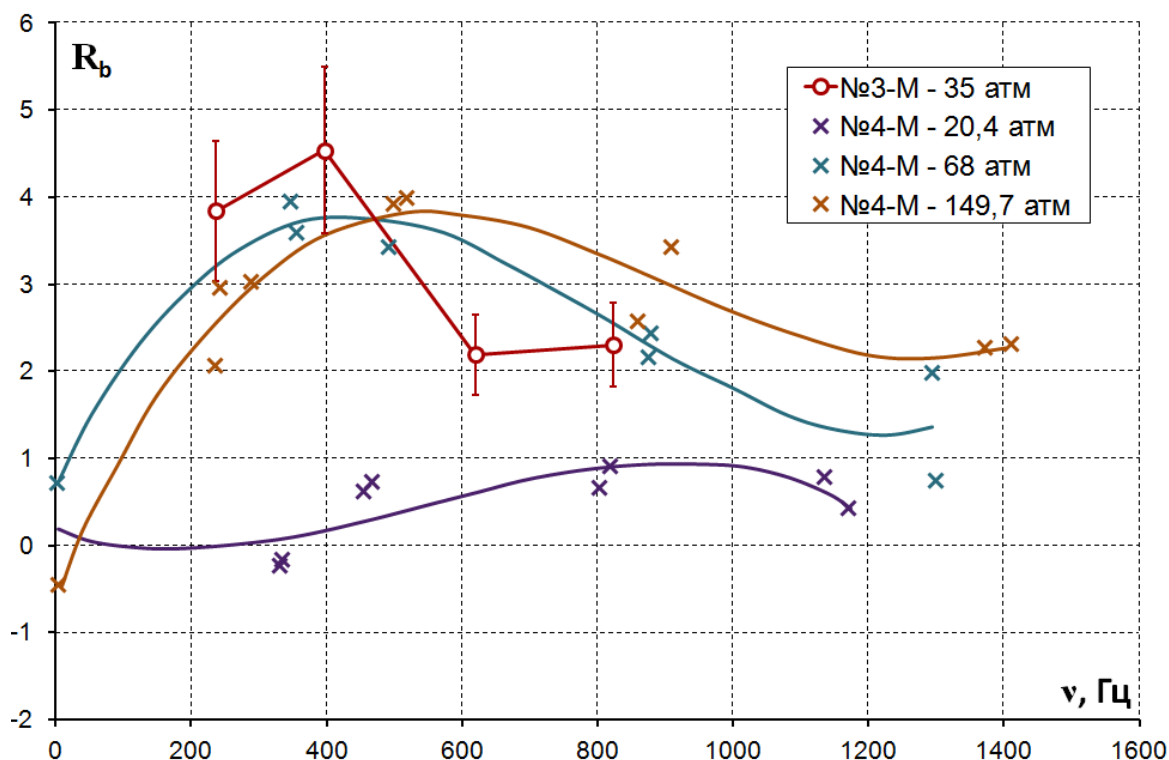


Рис. 12. Зависимость функции отклика зоны горения по давлению для металлизированных ТТ №3-М и №4-М от частоты малых возмущений давления в Т-камере.

Стоит обратить внимание (рис. 9, 10, 12, 13) на достаточно большую относительную погрешность определения акустической проводимости и функции отклика зоны горения по давлению как для безметального состава №1-Б, так и для металлизированного №3-М. В среднем относительная погрешность составляет 15-20%. Данное обстоятельство вызвано высокой чувствительностью A_b и R_b к точности определения коэффициентов затухания α_1 и α_2 . Ещё одним источником расхождений между полученными в эксперименте результатами и литературными данными, является разное рабочее давление в Т-камере.

Получены закономерности поведения акустической проводимости в рассматриваемом диапазоне частот для безметального и металлизированного составов. Для состава №1-Б наблюдается монотонное убывание A_b с увеличением частоты пульсаций давления, в то время как для металлизированного состава №3-М наблюдается максимум.

Выводы

Предложена схема импульсной Т-камеры для измерения акустической проводимости зоны горения безметальных и металлизированных ТТ в диапазоне частот 150 ... 850 Гц с температурой рабочей среды до 3200 К. Данный метод основан на генерации двух одиночных импульсов в середине и в конце работы Т-камеры с использованием вспомогательных устройств, оснащенных металлическими разрывными мембранами.

В результате проведённых исследований удалось получить и подтвердить основные закономерности поведения акустической проводимости в рассматриваемом диапазоне частот для рассматриваемых твердотопливных рецептур. Для безметального состава наблюдается монотонное убывание A_b с увеличением частоты пульсаций давления, в то время как для металлизированного наблюдается максимум. Значительная относительная погрешность определения акустической проводимости и функции отклика по давлению для безметального и металлизированного составов (15-20%), вызванная сильной чувствительностью A_b и R_b к точности определения коэффициентов затухания $\{\alpha_1, \alpha_2\}$, требует более пристального внимания к способу формирования импульса давления в Т-камере.

Полученные значения акустической проводимости зоны горения могут быть использованы в качестве граничных условий для расчета акустической устойчивости энергетических установок твердого топлива ТТ с использованием методик [17 - 22].

Библиографический список

1. Horton M.D. Use of the one-dimensional T-burner to study oscillatory combustion // AIAA Journal, 1964, vol. 2, no. 6, pp. 1112 - 1118.
2. Coates R.L., Horton M.D., Ryan N.W. T-Burner Method of Determining the Acoustic Admittance of Burning Propellants // AIAA Journal, 1964, vol. 2, no. 6, pp 1119 - 1122.
3. Culick F.E.C., Perry E.H. T-burner data and combustion instability in solid propellant rockets // AIAA Journal, 1969, vol. 7, no. 6, pp. 1204 - 1205.
4. Perry E.H. Investigations of the T-burner and its role in combustion instability problem: Ph. dis., Pasadena, California, 1970, 145 p.
5. Lovine R.L. High frequency propellant response measurements // AIAA Paper 1977-976, 13th Joint Propulsion Conference, 1977, pp. 1 - 9.
6. Lin A., Wang S. Investigation of aluminized solid propellant combustion instability by means of a T-burner // AIAA Paper 95-0606, 1995, pp. 1 - 8.
7. Foner S.N., Hudson R.L., Nall B.H. Admittance measurements of solid propellants by an acoustic oscillator technique // AIAA Journal, 1964, vol. 2, no. 6, pp. 1123 - 1129.

8. Oberg, C.L., Ryan N.W., Bear A.D. A pulsed t-burner technique // AIAA Journal, 1968, vol. 6, no. 5, pp. 920 - 921.
9. Culick F.E.C. T-burner testing of metalized solid propellants: report, California, Institute of Technology, AFRPL-TR-74-28, 1974, 274 p.
10. Price E.W., Mathes H.B., Madden O.H. Pulsed T-burner testing of combustion dynamics of aluminized solid propellants // AIAA Paper 71-634, 1974, pp. 1 -9.
11. Su W., Wang N., Li J., Zhao Y., Yan M. Improved method of measuring pressure coupled response for composite solid propellants // Journal of Sound and Vibration, 2013, vol. 333, issue 8, pp. 2226 - 2240.
12. Song A., Li J., Yan M., Sun B., Wang N. Propagation of pressure wave in a pulsed T-burner // AIAA Paper 2017-4951, 2017, pp. 1 - 10.
13. Архипов В.А., Волков С.А., Ревягин Л.Н. Экспериментальное исследование акустической проводимости горячей поверхности смесевых твёрдых топлив // Физика горения и взрыва. 2011. Т. 47. № 2. С. 74 - 80.
14. Leibovitz Z., Gany A. Investigation of solid propellant combustion instability by means of a T-burner // Acta Astronautica, 1984, vol. 11, no. 9, pp. 603 - 606.
15. Beckstead M.W., Culick F.E.C. Investigations of novel energetic materials to stabilize rocket motors: final report, California Institute of Technology, N00014-95-1-1338, 2000, 275 p.
16. Beckstead M.W., Meredith K.V., Blomshield F.S. Examples of unsteady combustion in non-metalized propellants // AIAA Papers 2000-3696, 2000, pp. 1 - 18.

17. Flandro G.A., Majdalani J. Aeroacoustic instability in rockets // AIAA Journal, 2003, vol. 41, no. 2, pp. 485 – 497.
18. Radenac E., Fluctuating energy balance method for postprocessing multiphase flow computations // Journal of Propulsion and Power, 2013, vol. 29, no. 3, pp. 699 - 708.
19. Culick F.E.C. Acoustic oscillations in solid propellant rocket chambers // Acta Astronautica, 1966, vol. 12, no. 2, pp. 113 - 126.
20. Куроедов А.А., Борисов Д.М. Влияние способа усреднения рабочих параметров энергетических установок на твердом топливе на значение коэффициента затухания акустических колебаний // Труды МАИ. 2017. № 94. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=80915>
21. Куроедов А.А., Лаптев И.В., Борисов Д.М. Влияние конденсированной фазы на акустическую неустойчивость в энергетических установках на твердом топливе // Труды МАИ. 2016. № 90. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=74715>
22. Кашина И.А., Сальников А.Ф. Методы определения собственных частот элементов системы ракетного двигателя твердого топлива // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35947>