

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**

## **FACULTAD DE CIENCIAS**

Sección de Post – Grado y 2da. Especialización Profesional



**INVESTIGACIÓN DE LOS TIPOS Y CONSTRUCCIONES DE  
LOS DISPOSITIVOS INFLAMADORES Y OPTIMIZACION DE  
LOS MODELOS FISICOS Y MATEMÁTICOS DE LOS  
PROCESOS DE INFLAMACIÓN PARA GARANTIZAR LA  
ENTRADA DEL MOTOR DEL COHETE DE COMBUSTIBLE  
SÓLIDO AL REGIMEN DE FUNCIONAMIENTO  
ESTACIONARIO**

**TESIS**

**Para Optar el Grado de:**

**MAESTRO EN INGENIERÍA AERONAUTICA  
MENCION: VEHÍCULOS NO TRIPULADOS**

**PRESENTADO POR:**

**Carlos IGLESIAS FLORES  
MAY FAP**

**ASESORADO POR:**

**Dr. Víctor PANAMARCHUCK**

**Lima, Perú  
2001**

## **DEDICATORIA**

**A YULIET A QUIEN AMO POR  
SU SUPERMANENTE Y  
DECIDIDO APOYO PARA MI  
SUPERACION PROFESIONAL**

**A MIS PADRES QUIENES  
ME DIERON LA VIDA Y LA  
GRAN OPORTUNIDAD DE  
DESARROLLARME COMO  
PROFESIONAL, A QUIENES  
AMO Y AMARE POR  
SIEMPRE**

## **RECONOCIMIENTO**

**A LA FUERZA AEREA DEL PERU POR  
DARME LA OPORTUNIDAD DE  
SUPERARME Y DE ESTA MANERA  
CONTRIBUIR EN EL DESARROLLO  
DE PROYECTOS DE INTERES PARA  
LA INSTITUCION**

**A LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE  
INGENIERIA POR PERFECCIONARME  
EN SUS AULAS Y A SUS PROFESORES  
POR PROPORCIONARME LOS  
CONOCIMIENTOS NECESARIOS PARA  
CONTRIBUIR CON EL DESARROLLO  
DE PROYECTOS DE INTERES PARA LA  
DEFENSA NACIONAL**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
COMITÉ DE POSTGRADO**

**INSCRIPCION DE TEMA DE TESIS**

**MAESTRIA EN INGENIERIA AERONAUTICA**

**MENCION : Vehículos No Tripulados (Mísiles y Cohetes)**

**Nombre del Participante : MAY FAP CARLOS IGLESIAS FLORES**

**Título de Tesis : Investigación de los Tipos y Construcciones de los Dispositivos Inflamadores y Optimización de los Modelos físicos y matemáticos de los procesos de inflamación para garantizar la entrada del Motor Cohete de Combustible Sólido al régimen estacionario**

**Resumen del Tema de tesis :**

Investigación de los Tipos y Construcciones de los Dispositivos Inflamadores y Optimización de los Modelos físicos y matemáticos de los procesos de inflamación para garantizar la entrada del Motor Cohete de Combustible Sólido al régimen estacionario, es una tesis que plantea que los problemas de la complejidad que aparecen durante la creación del MCCS, es el diseño y la puesta a punto del Sistema de Inflamación, que incluye la elección de la composición inflamadora y la construcción del inflamador, que garantice un conjunto optimo de las características de trabajo en el periodo de entrada del Motor de Cohetes de Combustible Sólido al régimen estacionario

La complejidad del problema consiste además en que estas características deberán conseguirse para unas limitaciones como son la inflamabilidad y la combustión de la carga del combustible sólido, las características constructivas dadas de la carga del combustible sólido y de la cámara de combustión, esto se ha conseguido optimizando el modelo físico del proceso de inflamación del combustible sólido con la finalidad de conseguir la temperatura critica de la superficie del combustible, asimismo optimizando el modelo físico del proceso de inflamación de la carga en la cámara de combustión con la finalidad de reducir el tiempo de retardo del encendido del inflamador ( $t_{3g}$ ) y en base al análisis de las descripciones matemáticas del proceso de inflamación y de entrada del motor al régimen estacionario, se han llevado las relaciones matemáticas existentes en un sistema único de ecuaciones, teniendo como resultado el método de ingeniería del calculo del proceso de inflamación que permite calcular las variaciones en el tiempo de las principales características balísticas internas del motor con el inflamador seleccionado en la cabeza, en el periodo de inflamación de la carga y de entrada al régimen estacionario de trabajo.

De estos procesos depende el régimen de lanzamiento del misil desde la rampa de lanzamiento concluyendo con la metodología para la selección optima de los compuestos inflamadores y el uso de modelos matemático que nos permitan calcular la masa y peso del compuesto inflamador.

Lima , 30 de Mayo del 2001

<b>AUTOR DE LA TESIS</b> ----- Carlos Iglesias Flores MAY FAP	<b>VºBº ASESOR DE TESIS</b> -----	<b>VºBº ENCARGADO DEL COMITÉ DE POSTGRADO</b>
------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------	---------------------------------------------------

## INDICE

	Pág.
Portada	i
Dedicatoria	ii
Reconocimiento	iii
Indice	iv
Introducción	1
Simbología	5
Capítulo I	9
DISPOSITIVOS INFLAMADORES	
1.1 Principales requisitos de los dispositivos inflamadores	9
1.2 Tipos de dispositivos inflamadores	12
1.3 Compuestos pirotécnicos	13
1.4 Construcción de los dispositivos inflamadores	14
Capitulo II	33
MODELO FISICO DEL PROCESO DE INFLAMACIÓN	
2.1 Mecanismo de encendido de los combustibles sólidos y condiciones de la inflamación	33
2.2 Modelo físico del proceso de inflamación de la carga en la cámara de combustión	45
2.2.1 Fase previa al proceso de inflamación	47
2.2.2 Primera fase del proceso de inflamación	49
2.2.3 Segunda fase del proceso de inflamación	52
2.2.4 Tercera fase del proceso de inflamación	54
2.2.5 Cuarta fase del proceso de inflamación	57

2.3 Principales principios y suposiciones utilizados durante la construcción del modelo matemático del proceso de inflamación	59
Capitulo III	70
OPTIMIZACION DE LA DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DEL PROCESO DE INFLAMACIÓN Y DE ENTRADA AL RÉGIMEN ESTACIONARIO DEL MOTOR	
3.1 Ecuación de la ley de conservación de la masa de los productos de la combustión en el volumen libre de la cámara	70
3.2 Ecuación de la ley de conservación de la energía de los productos que llenan o cubren el volumen libre de la cámara	72
3.3 Ecuación de ingreso de los productos de la combustión desde los inflamadores	73
3.4 Ecuaciones que describen el ingreso de los productos de la combustión desde la carga de combustible sólido.	76
3.5 Ecuación del gasto del caudal de los productos descargados de la cámara	78
3.6 Ecuación del estado	79
3.7 Método de ingeniería para el calculo de inflamación en el motor por una carga que arde desde el canal y con un inflamador en la parte de la cabeza	81
3.8 Calculo de la masa requerida y de las medidas iniciales de los granos de la composición inflamatoria	97
Capitulo IV	106
RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES	
4.1 Investigación en la cámara experimental	106
4.2 Resultados	110
Conclusiones	118
Recomendaciones	120
Bibliografía	121

## INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas mas complejos que aparecen durante la creación de los Motores de Cohetes de Combustible Sólido, es el diseño y la puesta a punto del sistema de inflamación, que incluye la elección de la composición inflamadora y la construcción del inflamador que garanticen un conjunto optimo de las características de trabajo en el periodo de entrada del Motor del Cohete de Combustible Sólido al régimen estacionario

la complejidad del problema consiste además en que estas características deberán conseguirse para unas limitaciones como son, la inflamabilidad y la combustión de la carga de combustible sólido, las características constructivas dadas de la carga del combustible sólido y de la cámara de combustión, las condiciones del medio externo etc.

El proceso de inflamación de la carga de combustible sólido y de entrada del motor al régimen de funcionamiento estacionario es él mas complicado según los procesos que se producen en la cámara de combustión en el periodo de trabajo del Motor Cohete de Combustible Sólido

En la cámara de combustión se producen una serie de procesos no estacionarios tales como:

- La combustión del inflamador
- El calentamiento y la inflamación de la carga del combustible sólido
- La formación y el movimiento del frente de inflamación por el canal de la carga
- La combustión conjunta de la composición inflamadora y de la carga del combustible sólido.

Todos estos procesos influyen sobre el carácter y los parámetros de entrada del motor al régimen de funcionamiento estacionario. De estos parámetros depende el régimen de lanzamiento del misil desde el depósito de lanzamiento, el proceso de separación de las etapas del misil, las cargas límite que actúan sobre los elementos del misil y sobre todo en la carga de combustible sólido.

En el inicio del periodo de desarrollo de los motores que emplean combustible sólido, para los cohetes no tripulados, el proceso de inflamación se elaboraba básicamente experimentalmente. Esto está justificado debido que los motores tenían pequeños tamaños y los costos al inicio no eran altos. Los diseñadores del motor en el mejor caso, utilizaban para determinar la masa del inflamador funciones empíricas y semi empíricas, que daban resultados satisfactorios solamente para aquellas condiciones para las cuales habían sido obtenidas.

Con el diseño de los misiles controlados, sobre todo los misiles estratégicos, las medidas y el costo de los motores bruscamente aumentaron

Esto requirió investigaciones teóricas y experimentales profundas y el desarrollo de los modelos físicos y matemáticos de los procesos que se producían en la entrada del motor al régimen estacionario

El mayor aporte a estas investigaciones lo hicieron:

- En Rusia V.I. Vilianov, B.I. Yerojin, A.G. Mershanov, B.A. Raizberg, R.E. Sorkin y otros



- En Europa F. Chanut, Ramond Jean, Sinclair J.E.
- En Estados Unidos Summerfield, German, F.Williams, Ryan, Beer, Kiro y Andersen y otros.

Todos estos científicos contribuyeron con sus experimentos, sobresaliendo uno de ellos Raizberg, quien en la década de los 60 efectuó mas de cien trabajos sobre la teoría multifase de inflamación, en la actualidad sé ha acumulado una gran experiencia en el diseño y calculo de los inflamadores, en el desarrollo de los compuestos inflamadores, en la investigación de su combustión, en la elaboración de los modelos matemáticos y físicos.

En base a los datos bibliográficos estudiados sobre los dispositivos inflamadores de los motores de cohetes de combustible sólido y la entrada de este ultimo al régimen estacionario, en el trabajo de tesis se han planteado las siguientes problemas:

- Analizar los tipos existentes de dispositivos inflamadores con la finalidad de determinar la variante optima.
- De la variedad de construcciones de los dispositivos inflamadores, y del lugar de su ubicación en el MCCS, fundamentar la efectividad de la construcción seleccionada y su lugar de ubicación.
- Optimizar el modelo fisico del proceso de inflamación del combustible sólido con la finalidad de conseguir la temperatura critica de la superficie del combustible.
- Optimizar el modelo fisico del proceso de inflamación de la carga en la cámara de combustión con la finalidad de reducir el tiempo de retardo del encendido del inflamador ( $t_{3g}$ )
- En base al análisis de las descripciones matemáticas del proceso de inflamación y de entrada del motor al régimen estacionario, llevar las relaciones matemáticas existentes en un sistema único de ecuaciones.
- Optimizar el método de ingeniería del calculo del proceso de inflamación que permita calcular aproximadamente las variaciones en el tiempo de las principales características balísticas internas del motor con el inflamador seleccionado en la cabeza, en el periodo de inflamación de la carga y de entrada al régimen estacionario de trabajo.

En la presente tesis se incluye los siguientes capítulos:

- En el Capítulo 1: “Dispositivos Inflamadores” se dan los principales requisitos de los dispositivos inflamadores, se describe los tipos de dispositivos inflamadores, se muestran las principales construcciones de los dispositivos inflamadores y su lugar de ubicación.
- En el Capítulo 2: “Modelo físico del proceso de inflamación” se describe los principales mecanismos de encendido de los combustibles sólidos, las condiciones de inflamación y el modelo multifase del proceso de inflamación de la carga
- En el Capítulo 3: “Descripción Matemática del proceso de inflamación y entrada del motor al régimen estacionario” se muestran las ecuaciones que describen las principales leyes relacionadas con la variación de los parámetros balísticas internos del proceso de entrada al régimen estacionario, se da el método y algunos ejemplos del calculo de la masa necesaria o requerida y de las medidas iniciales del grano del compuesto inflamador.
- En el Capítulo 4: “Algunos resultados de las investigaciones experimentales” se describen el equipo experimental, los principales resultados obtenidos en él y se da una comparación de los resultados del calculo y los experimentales.

## SIMBOLOGIA

$\phi$	Gradiente de Temperatura
$\phi^*$	Valor critico del gradiente de temperatura
$\rho_T$	Densidad del combustible sólido
$C_{pr}$	Calor especifico de los productos de la combustión
$R$	Constante especifica del gas
$T_r$	Temperatura en la cámara de combustión
$u(\theta)$	Constante de la velocidad que depende de la temperatura critica
$\eta_T$	Coefficiente de llenado volumétrico con combustible
$E_a$	Energía de activación
$e$	Distancia recorrida por el frente de llama
$Y^*$	Espesor de la capa caliente
$t^*$	Duración del calentamiento
$W^*$	Calor necesario
$\theta$	Temperatura
$\theta^*$	Temperatura característica
$X_T$	Coefficiente de la conductividad térmica
$q$	Magnitud del flujo térmico específico
$U$	Efecto térmico (intensidad de desprendimiento de calor que incluye en si al multiplicador exponencial
$\theta_H$	Temperatura de combustión de la carga a una $T^0$ normal en °K

$\lambda_T$	Coeficiente de conductividad de calor
$\theta_0$	Temperatura de la superficie del combustible
$q_r$	Es la velocidad de la generación del calor
$q_n$	Es el flujo térmico de la capa gaseosa
$M_r$	Masa del gas
$M_q$	Masa de las partículas en el volumen
$\rho$	Densidad local
$\rho_r$	Densidad de los gases en la cámara
$P_r$	Presión de los productos de la combustión
$g_q$	Es el porcentaje del peso de las partículas
$G_{kp}$	Gasto o caudal a través de la tobera
$k$	Es el exponente isoentrópico
$F_{kp}$	Area de la sección crítica de la tobera
$T_0$	Temperatura inicial de la carga
$u$	Velocidad media condicional del medio continuo
$V_r$	Velocidad masica del gas
$V_q$	Velocidad media masica de las partículas
$V$	Velocidad del medio condicional continuo
$q_k$	Es el flujo térmico convectivo
$\alpha_k$	Coeficiente de irradiación de calor
$\eta$	Coeficiente de llenado volumétrico

<b><math>l</math></b>	La longitud de la distancia
<b><math>Re</math></b>	Numero de Reynolds
$m$	Es el porcentaje masico de la fase condensada
<b><math>d</math></b>	Diámetro del canal
<b><math>\mu</math></b>	Es el coeficiente del gasto de la tobera
<b><math>V_i</math></b>	Volumen libre
<b><math>Q_{Bi}</math></b>	Es el ingreso masico de los productos de la combustión del compuesto inflamador
<b><math>Q_{Ti}</math></b>	Es el ingreso masico de los productos de la combustión en el volumen libre
<b><math>G_i</math></b>	Es el caudal o gasto masico de los productos del volumen libre debido a la descarga
<b><math>V_k</math></b>	Es la variación del volumen libre
<b><math>P_B</math></b>	Presión a que se produce la combustión de la composición inflamadora
<b><math>A_B</math></b>	Coefficiente de descarga de los productos de la combustión
<b><math>F_B</math></b>	Area de descarga
<b><math>S_B</math></b>	Función de variación de la superficie de combustión
<b><math>e_B</math></b>	Espesor actual de la bóveda que se quema de la composición inflamadora
<b><math>e_{BH}</math></b>	Espesor inicial de la bóveda que se quema de la composición inflamadora
<b><math>W_{BH}</math></b>	Es la masa inicial de la composición inflamatoria
<b><math>Z</math></b>	Es la variación del espesor relativo de la bóveda que se quema de la composición inflamatoria
<b><math>u_B</math></b>	Es la velocidad de combustión de la carga

<b><math>t_{II}</math></b>	Es el tiempo característico de propagación de la llama por la superficie de la composición inflamatoria
<b><math>S_T</math></b>	Es la magnitud actual de la superficie de la carga que esta incluida en la carga de combustible
<b><math>t_T</math></b>	Es el momento de la inflamación de la carga
<b><math>P_3</math></b>	Es una función Unitaria
<b><math>u_T</math></b>	Es la velocidad de combustión de la inflamación.
<b><math>V_a</math></b>	Es el volumen ocupado por el aire atmosférico que se bota de la cámara
<b><math>V_B</math></b>	Es el volumen ocupado por los productos de la combustión de la composición inflamatoria
<b><math>V_{CM}</math></b>	Es el volumen ocupado por los productos de la combustión del inflamador y del combustible.

## CAPITULO I

### DISPOSITIVOS INFLAMADORES

#### 1.1 Principales requisitos de los dispositivos inflamadores

El periodo de encendido de la composición inflamatoria de la carga del combustible sólido, al igual que la entrada del motor al régimen de funcionamiento estable es muy compleja según su naturaleza gasodinámica y físico-química y es un conjunto de procesos consecutivos.

Después del envío del impulso eléctrico se produce el encendido de la composición inflamatoria y luego el intermedio, este ultimo enciende la composición inflamatoria principal, como resultado del proceso de quema de la composición de inflamación en la cámara de combustión se produce el desprendimiento de calor que se acompaña con un aumento de la presión.

El diseño y el desarrollo del sistema de inflamación (Fig. 1), que incluye la elección del tipo de la composición de encendido, su masa, medidas (desde la pólvora pequeña dispersada y los gránulos hasta las pastillas, las cargas y los bloques de una forma dada) y de la construcción del dispositivo de inflamación (ignición) se deberá realizar de tal manera, que garantice un empleo optimo de los parámetros del proceso de trabajo y de las características para el periodo de inflamación no estacionario.

La complejidad del problema consiste además en que estas características deberán garantizar unas limitaciones como la inflamabilidad y combustión de la carga del combustible sólido, las características constructivas de la carga del combustible sólido y de la cámara de combustión, las condiciones del medio externo y otros.

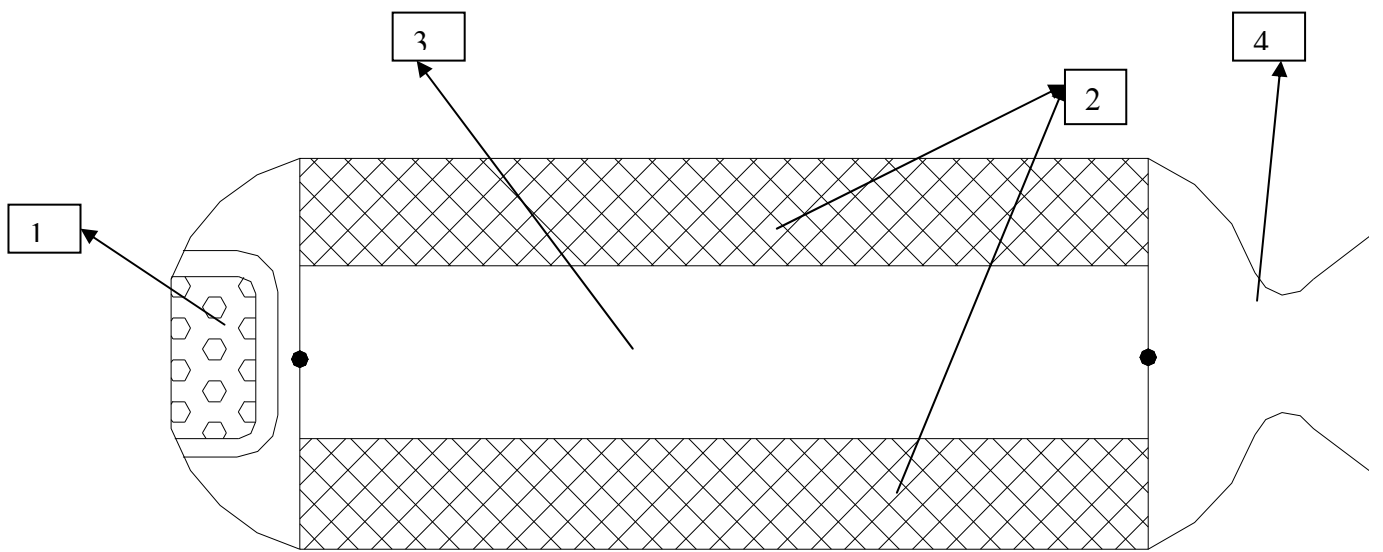


Figura 1 MOTOR DE COHETES DE COMBUSTIBLE SOLIDO

1. DISPOSITIVO INFLAMADOR
2. COMBUSTIBLE SOLIDO
3. CAMARA DE COMBUSTIÓN
4. TOBERA DE SALIDA



Los dispositivos Inflamadores (sistemas de encendido) sirven para la inflamación y para asegurar un proceso estable de quema de la carga del combustible sólido en la cámara de combustión; Como inflamación se entiende a aquel proceso durante el cual gracias a las reacciones exotérmicas se produce un desprendimiento local del calor en una cantidad suficiente como para que el desprendimiento de calor supere a las pérdidas de calor.

La cantidad de calor desprendido en un determinado intervalo de tiempo en el proceso de quema de la composición de inflamación deberá ser suficiente para aumentar la temperatura de la superficie de la carga del combustible sólido hasta un valor en el cual comienza el proceso de descomposición estable, la gasificación y su encendido con la formación de la zona de combustión.

La estabilidad del proceso de inflamación depende de:

- La densidad del flujo de calor
- La presión
- La composición de los productos de la combustión
- La velocidad del flujo
- La superficie de la carga del combustible sólido.

Las características de su construcción y lugar de ubicación del dispositivo de inflamación se determinan por:

- El área de la superficie de combustión,
- La forma y las medidas de la carga y la cámara de combustión
- la presión inicial en la cámara de combustión (condiciones de altitud de arranque).

Los dispositivos inflamadores deberán para una masa y medidas dimensionales mínimas garantizar:

- Una alta confiabilidad y fiabilidad de inflamación de la superficie de la carga del combustible sólido,
- Una seguridad durante la operación y almacenamiento en las condiciones dadas,
- Un almacenamiento prolongado sin una variación sustancial de las características balísticas,
- Una insensibilidad a la acción de las corrientes de inducción que aparecen en los sistemas de abordo y de tierra.

Los componentes de las mezclas pirotécnicas deberán inflamarse fácilmente y garantizar una reacción exotérmica auto mantenida.

La elección de los componentes para el sistema de inflamación en gran medida depende de la función cumplida por el, ósea de donde se utiliza el componente en la carga intermedia o principal.

Sobre el carácter de inflamación de la carga del combustible sólido influyen:

- La forma y las medidas de los elementos utilizados en el dispositivo inflamador en formas diferentes (desde los polvos finamente dispersados hasta los bloques de forma dada)
- Las propiedades de los productos de la combustión.
- El contenido de las fases gaseosa y condensada.
- La temperatura de combustión y la velocidad de combustión.

## **1.2 Tipos de dispositivos inflamadores**

En la actualidad se utilizan los dispositivos de inflamación :

- Con pólvora de humo, utilizados en los motores de cohetes de combustible sólido en un diámetro externo de hasta un metro. Las principales ventajas de estos inflamadores son la sencillez de la construcción y la fiabilidad de funcionamiento, mientras que las desventajas son la corta duración de la acción del impulso térmico sobre la carga de combustible sólido, la presencia

de factores de carga de impacto considerables sobre el combustible sólido y la temperatura relativamente baja de la combustión.

- Con composiciones pirotécnicas que son mezclas de los oxidantes no orgánicos con polvos de metales.

Las composiciones pirotécnicas para la carga de los inflamadores pueden pensarse en cargas con un diámetro de 5 a 15 mm. o en pequeñas pastillas con una masa de algunos cuantos decimos de gramos. Los dispositivos inflamadores examinados, ampliamente se usan en los motores de cohetes de combustible sólido con un diámetro externo de hasta 2 m.; estos motores de cohetes de combustible sólido equipado con combustible del principal (motores de cohetes de combustible sólido inflamador), son utilizados como regla general, en los motores de cohetes de combustible sólido potentes de grandes dimensiones y en las variantes ligeras de motores de cohetes de combustible sólido inflamador, los ligeros pueden establecerse en el fondo delantero del motor principal y los pesados desde el lado de la tobera.

- Del tipo combinado, que son diversas combinaciones hechas basándose en los diferentes principios analizados arriba de inflamación.

Equipado con fluidos auto inflamatorios. La inflamación de la carga con liquido auto inflamatorio se produce gracias al efecto de las reacciones exotérmicas entre el liquido y los componentes del combustible sobre la superficie de la carga del combustible sólido.

### **1.3 Compuestos Pirotécnicos.**

Los compuestos pirotécnicos inflamatorios se usan en forma de polvos, pastillas, mallas impregnadas con compuestos pirotécnicos.

Los polvos básicamente se utilizan en calidad de compuestos de transmisión, donde se requiere una alta velocidad de quema, mientras que para las composiciones de inflamación se utilizan elementos prensados en forma de pastillas, que poseen unas características balísticas más estables.

Existen diferentes formas de pastillas (Fig. 1.1) su altura y diámetro varían desde 1.25 hasta 25 mm. y más. Estas características como la forma de las pastillas, la densidad y la velocidad de quema ejercen influencia sustancial sobre la formación masica del gas.

En los dispositivos inflamadores del tipo “motor en un motor” en la cámara ignitora se utilizan cargas o bloques (Fig. 1.2). Durante esto los elementos hechos con un prensado ciego, condicionalmente se denominan bloques, mientras que los vaciados o compresados de peso se denominan carga. De las mezclas pirotécnicas en base a perclorato de potasio o aluminio compresado ciego bajo presión de hasta 560 Mpa se han obtenido bloques con diámetro de hasta 150 mm. y una longitud hasta 300mm. (Fig. 1.3). Los bloques de estas medidas pueden garantizar en los dispositivos inflamadores durante el arranque una presión de 15 hasta 17.5 Mpa. y en un tiempo de combustión de 30 ms hasta 2 seg.

En las cargas de los dispositivos inflamadores fuertemente fijadas con el cuerpo de la cámara, de las mezclas de los metales y de los oxidantes pueden fabricarse directamente un vaciado en el cuerpo con la solidificación posterior. Con este mismo método se fabrican las cargas de ignición de las composiciones que contienen zirconio, nitrato de potasio y aglutinante poli sulfuroso y también el aluminio, el boro y el perclorato de amonio con aglutinante fósforo carbonoso.

En calidad de composiciones inflamatorias el mayor empleo en los dispositivos inflamadores en forma de gránulos o pastillas la ha obtenido la pólvora de humo, que tiene la siguiente composición química (en porcentajes de masa) salitre de potasio-75%, carbón de leña-15%, azufre-10%. La pólvora de humo que posee una alta estabilidad química y una alta estabilidad fisico-química fácilmente se inflama desde el iniciador, pero posee una alta higroscopicidad y tiene un poder calorífico relativamente bajo y una temperatura de combustión  $T= 2400...2500^{\circ}K$ . La densidad de esta pólvora es 1,6.....1,7  $gr/cm^3$ , mientras que la densidad gravimetrica que depende de la medida de los granos varia en el rango de 0,9.....1,10<sup>5</sup>  $gr/cm^3$

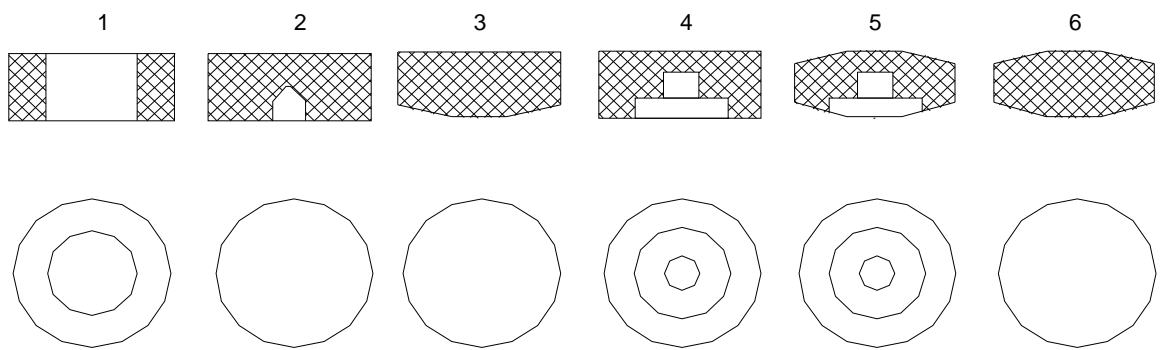


Figura 1.1 FORMA DE LAS PASTILLAS

- 1.- PLANO CON ORIFICIO
- 2.-PERFILADO
- 3.-PLANO CONVEXO
- 4.-PLANO CON INSERTO
- 5.-BICONVEXO CON INSERTO
- 6.-BICONVEXO

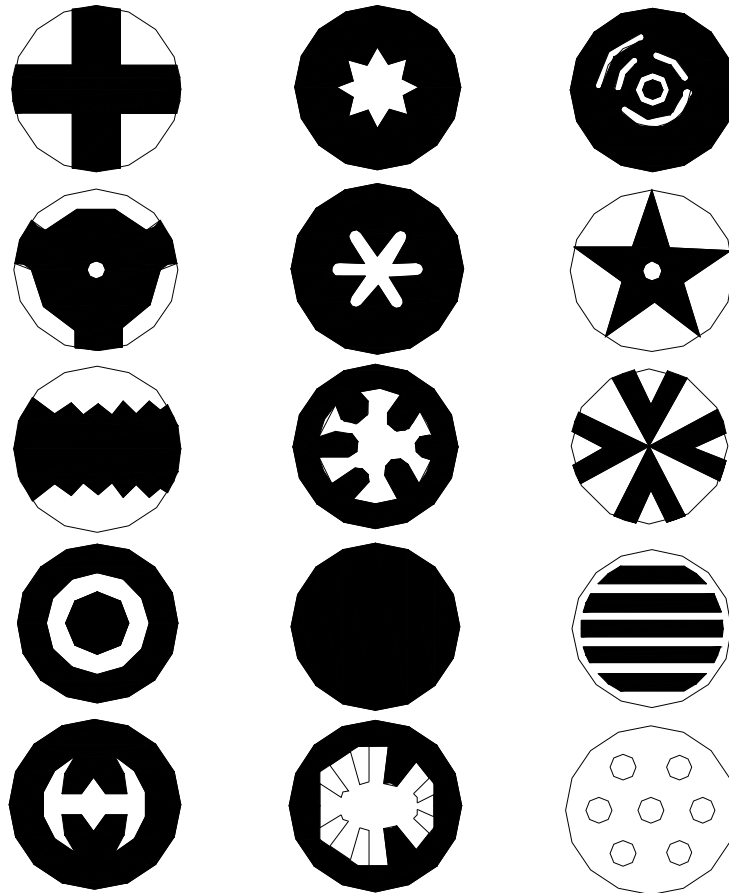


Figura 1.2 FORMAS DE LA SECCION TRANSVERSAL DE LAS CARGAS CILÍNDRICAS

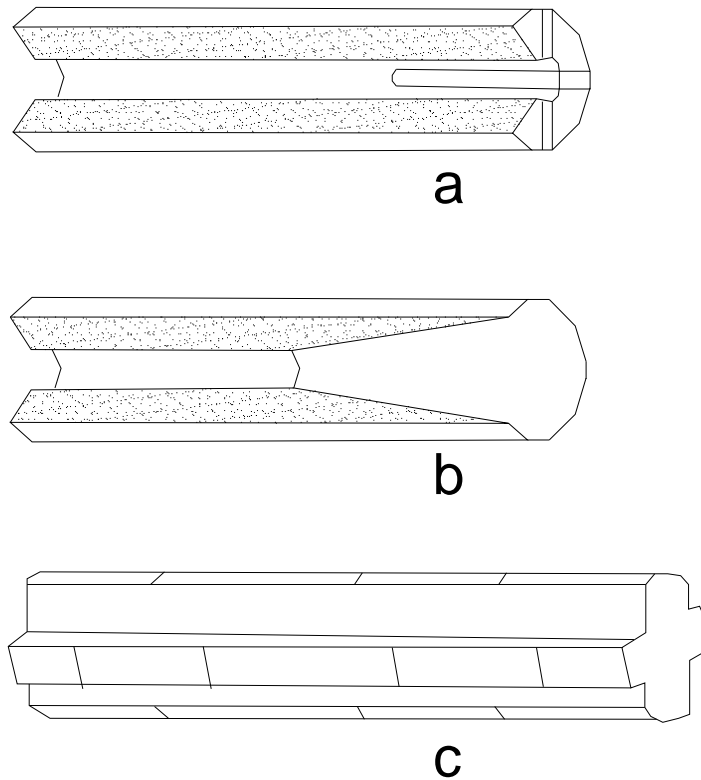


Figura 1.3 CARGAS DE LA COMPOSICIÓN INFLAMADORA DE FORMA CILÍNDRICA

- a) CARGA DE LA COMPOSICIÓN INFLAMADORA CON COMPENSADOR RANURADO
- b) CARGA DE LA COMPOSICIÓN INFLAMADORA CON CANAL CILINDRICO CON TRANSICIÓN A CONICO
- c) CARGA DE LA COMPOSICIÓN INFLAMADORA DE SECCION EN CRUZ CON BANDAS PEGADAS DEL RECUBRIMIENTO INHIBIDOR.

Las composiciones pirotécnicas incluyen en si al oxidante, carburante, aglutinante y también diferentes tipos de aditivos, que juegan el papel de aceleradores o desaceleradores del proceso de combustión o flematizadores.

En calidad de oxidantes pueden utilizarse el perclorato de potasio  $\text{KClO}_4$ , el nitrato de bario  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ , el nitrato de potasio  $\text{KNO}_3$ , el nitrato de sodio  $\text{NaNO}_3$ , el peroxido y el cromato de bario  $\text{BaO}_2$  ,  $\text{BaCrO}_4$  y otros.

En calidad de carburantes se usan los metales como el magnesio, el zirconio, el aluminio, el boro y el titanio, las aleaciones aluminio y magnesio, zirconio y níquel, los no metales como el fósforo, carbono, azufre, los componentes orgánicos, los hidrocarburos, los compuestos no orgánicos, los sulfuros, los fósforos, los silicios y otros.

Para garantizar la resistencia mecánica necesaria en las composiciones pirotécnicas se incluye a los aglutinantes (Cementadores), los polímeros orgánicos editol, cofinol, las resinas epoxicas, los cauchos, las etilcelulosas. En base a estos componentes se obtienen diferentes composiciones pirotécnicas.

Presentaremos las composiciones inflamatorias pirotécnicas más difundidas:

- La composición pirotécnica boro + nitrato de potasio se usa en forma de tabletas, esta fácilmente se enciende a bajas presiones de condiciones de altitud, la potencia calorífica de esta composición es mas que el doble que la potencia calorífica de la pólvora de humo. La velocidad de combustión es de 10 mm/s para una  $p = 0,1$  MPa.
- La composición inflamadora de polvo de aluminio y de perclorato de potasio se utiliza en forma de tabletas y bloques, y es una composición de alta energética. Esta composición se inflama mal a bajas presiones, mientras que la velocidad de su quema fuertemente depende de la presión y cuando la  $p=0,1$  MPa es igual a 10 mm/s.



- La composición pirotécnica  $Mg + NaNO_3 + KNO_3$  se utiliza en forma de polvo y tabletas. Cuando se añade a esta composición resinas en calidad de aglutinante, de ella se fabrican cargas pirotécnicas con un tiempo de trabajo relativamente grande. Debido a la presencia de partículas condensadas en los productos de la combustión mejora las condiciones de irradiación de calor, desde el flujo de doble base hacia la superficie de la carga del Combustible Sólido. El sistema posee una alta potencia calorífica, una velocidad de combustión de 4 mm/s cuando  $p = 0,1$  Mpa.
- La composición pirotécnica  $Zr+BaCrO_4$ , que se utiliza en forma de polvo o gránulos, durante la combustión de la cual se forma partículas condensadas de alta temperatura. Este sistema es uno de los sistemas más fáciles de inflamar, posee una baja potencia calorífica. La velocidad de combustión débilmente depende de la presión, para  $p=0,1$  Mpa es igual a 70mm/s.
- Para utilizar el dispositivo inflamador en condiciones de explosión nuclear puede usarse el sistema pirotécnico  $Al+CuO$ , que posee una resistencia a la sección de la radiación neutrónica y que se distingue por su estabilidad térmica y en pequeño desprendimiento de gas, cuando arde el sistema se forma partículas. La velocidad de combustión es de 40 mm/s cuando  $p = 0,1$  Mpa.

#### 1.4 Construcción de los dispositivos inflamadores

El sistema de inflamación mas difundida en los Motores de Cohetes de Combustible Sólido es el pirotécnico que contiene a las composiciones iniciadoras, de transmisión y principal. La composición de iniciación sirve para crear el impulso inicial de la llama, que prende a la composición de transmisión, mientras que la combustión de la composición de transmisión garantiza la inflamación de la composición pirotécnica principal. La composición pirotécnica, que es una mezcla del carburante y el oxidante, durante la quema genera la parte principal del calor, necesaria para la inflamación de la carga del Combustible Sólido.

En calidad de dispositivos iniciadores el mayor empleo hallan los dispositivos iniciadores eléctricos, los encendedores eléctricos o los piró patrones eléctricos.

El esquema típico de la bujía eléctrica compuesta de los elementos del circuito eléctrico, del piró patrón y de la bujía pirotécnica se muestra en la Fig. 1.4.

En función de la forma y de las medidas de la carga del Combustible Sólido y de la cámara de combustión pueden utilizarse diferentes construcciones de los dispositivos inflamadores.

Los dispositivos inflamadores pueden ubicarse del lado del fondo delantero, de la parte de tobera del canal de la carga combustible sólido y del extremo de la carga del combustible sólido (para las cargas desde la superficie lateral de la combustión). El lugar de ubicación del dispositivo inflamador al igual que la construcción de la carga del combustible sólido en mucho determina la secuencia de encendido de la superficie de la carga de combustible sólido a la combustión

En la Fig. 1.5 se muestra el esquema del dispositivo inflamador que se encuentra en el fondo delantero. En este esquema de ubicación del dispositivo inflamador se crean las condiciones más favorables de inflamación de la carga del combustible sólido, ya que los productos de la composición inflamatoria antes de abandonar la cámara de combustión interactúa con toda la superficie de combustión de la carga del combustible sólido. Principalmente partiendo de estas consideraciones, el esquema de inflamación con la ubicación del dispositivo inflamador de la parte delantera han obtenido el mayor empleo del motor cohete de combustible sólido de diferente finalidad.

Cuando se inflama la carga del combustible sólido desde el lado de la tobera el dispositivo inflamador puede fijarse ya sea en el fondo posterior o en la tapa de la tobera. En él ultimo caso el dispositivo inflamador junto con la tapa de la tobera es un conjunto único. (Fig. 1.6)

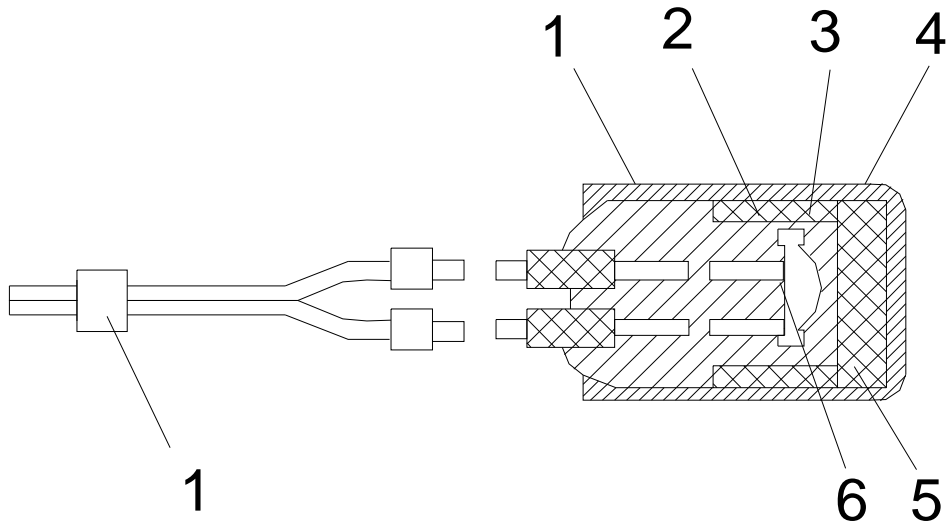


Figura 1.4 ESQUEMA TÍPICO DE LA BUJÍA ELÉCTRICA

1.-CUERPO

2.-BOCINA DE FIJACIÓN

3.-MEZCLA INCENDIARIA

4.-COMPUESTO DE TRANSMISION

5.-COMPUESTO PRINCIPAL DEL DISPOSITIVO

6.-FUENTE INCANDESCENTE

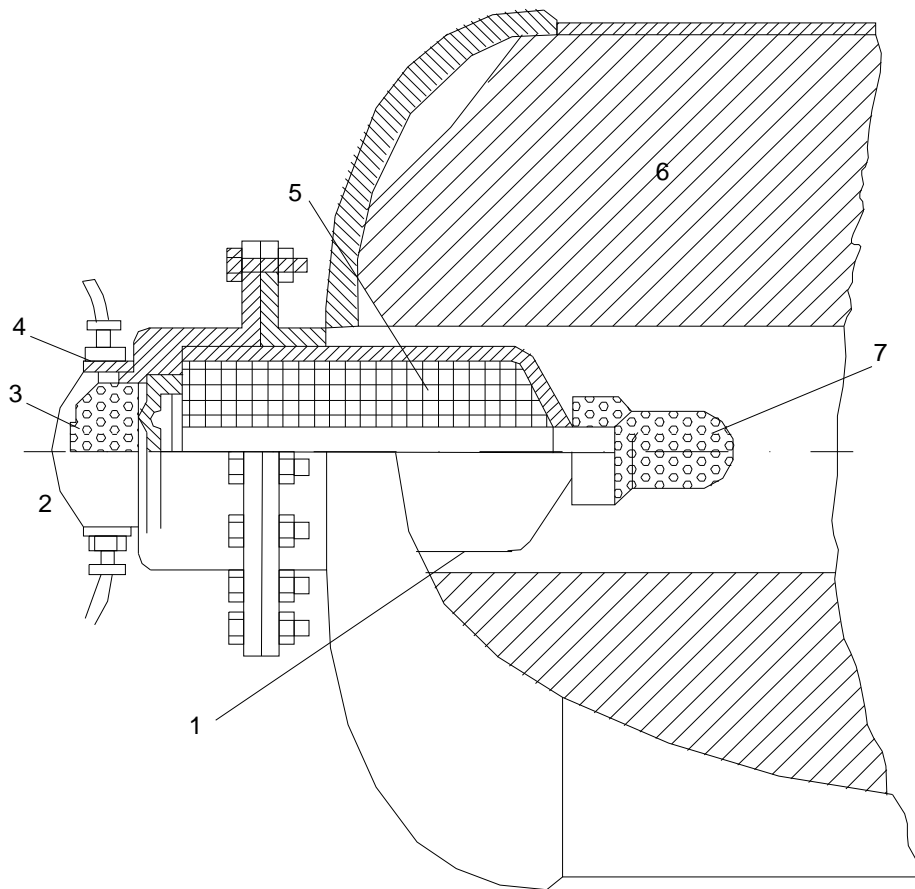


Figura 1.5 DISPOSITIVO INFLAMADOR TIPO MOTOR EN MOTOR

- 1.-CUERPO
- 2.-DIAFRAGMA DE ROTURA
- 3.-CARGA PIROTÉCNICA COMPUESTA DE PASTILLAS
- 4.-PIROENCENDEDOR
- 5.-CARGA DEL COMBUSTIBLE SÓLIDO
- 6.-CARGA DEL COMBUSTIBLE SÓLIDO DEL MOTOR PRINCIPAL
- 7.-TOBERA DE ESCAPE

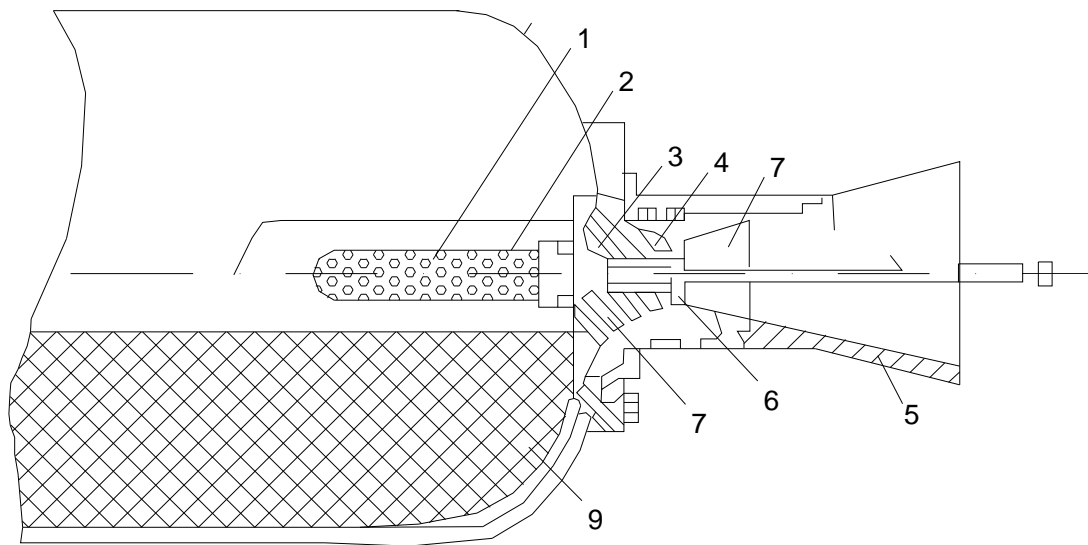


Figura 1.6 DISPOSITIVO INFLAMADOR UBICADO EN EL LADO DEL FONDO DE LA TOBERA

- 1.-TUBO PERFORADO
- 2.-CARGA DE LA C.I. COMPUESTO DE PASTILLAS
- 3.-CUERPO
- 4.-INICIADOR
- 5.-TOBERA
- 6.-DISPOSITIVO SELLANTE
- 7.-TAPON DE TOBERA
- 8.-CUERPO DEL MOTOR
- 9.-CARGA DE COMBUSTIBLE SOLIDO

Para inflamar las cargas de los combustibles sólidos de los motores cohete de combustible sólido potentes, se utilizan en las etapas primeras o cero de los cohetes booster, dispositivos inflamadores de medidas y masa relativamente grandes, por esta razón es conveniente fijarlos de manera directa en la instalación de despegue (Fig. 1.7)

Este método de ubicación del dispositivo inflamador conlleva a la disminución de la masa pasiva del motor. Este sistema de arranque es una cámara de combustión de encendido de un tamaño determinado con una tobera. Dentro de la cámara de combustión se ubica la carga del combustible sólido, durante esto la presión en ella puede alcanzar 17 Mpa.

En la Fig. 1.8 se muestran los esquemas de los dispositivos inflamadores, ubicados en el canal de la carga y utilizados para inflamar las superficies desde el lado del canal. La parte principal de este dispositivo es un tubo perforado hecho ya sea de plástico o de papel prensado dentro del cual se ubica la composición pirotécnica; para proteger la composición pirotécnica el tubo se envuelve en una cinta plástica.

En caso de inflamación de la carga desde la superficie lateral de combustión el dispositivo inflamador puede fijarse a la carga, a la tapa de tobera o al fondo posterior

En la Fig. 1.9 se muestra el esquema del dispositivo inflamador para una inflamación múltiple de la carga de combustible sólido en los motores de encendido múltiple.

El más simple desde el punto de vista constructivo es el dispositivo inflamador del tipo casquete, que es una bolsa con pólvora negra y piró bujía.

Un poco más complejo es el dispositivo inflamador del tipo caja, que es un cuerpo relativamente ligero metálico o plástico, dentro del cual se ubica la bujía eléctrica y la carga de la pólvora negra o la composición pirotécnica en pastillas (Fig. 1.9a). La principal desventaja de estos dispositivos inflamadores es la reproductividad baja de la entrada del motor al régimen estacionario.

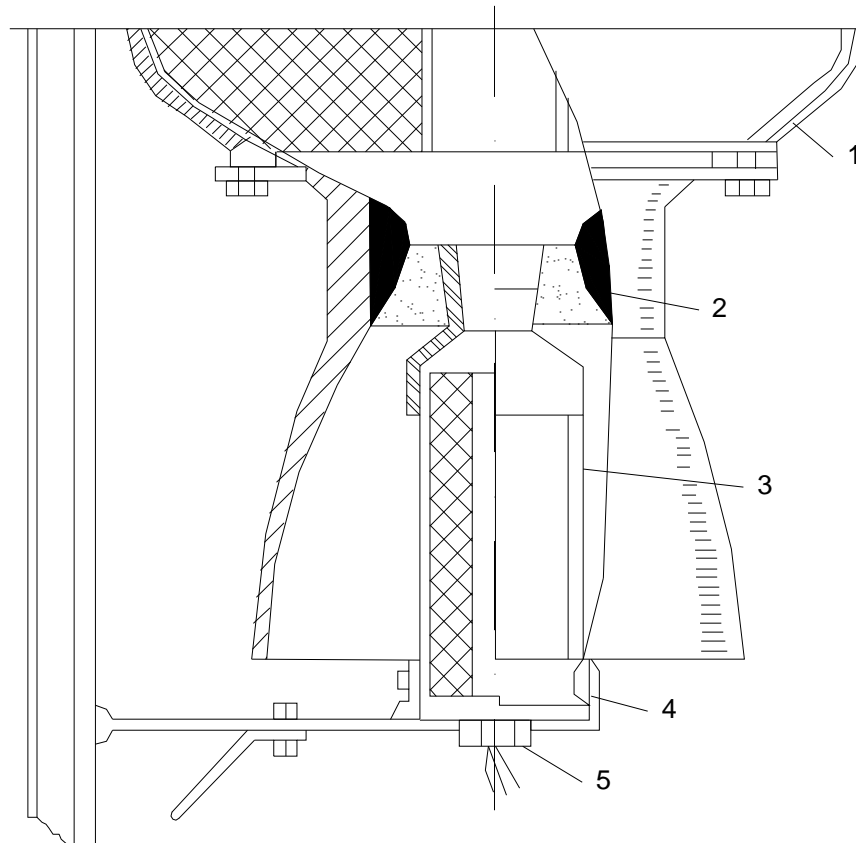


Figura 1.7 SISTEMA DE ENCENDIDO DEL MOTOR DESDE EL LADO DE LA TOBERA

- 1.-MCCS
- 2.-TAPA DE TOBERA
- 3.-DISPOSITIVO INFLAMADOR
- 4.-BASE
- 5.-PIROCARTUCHO

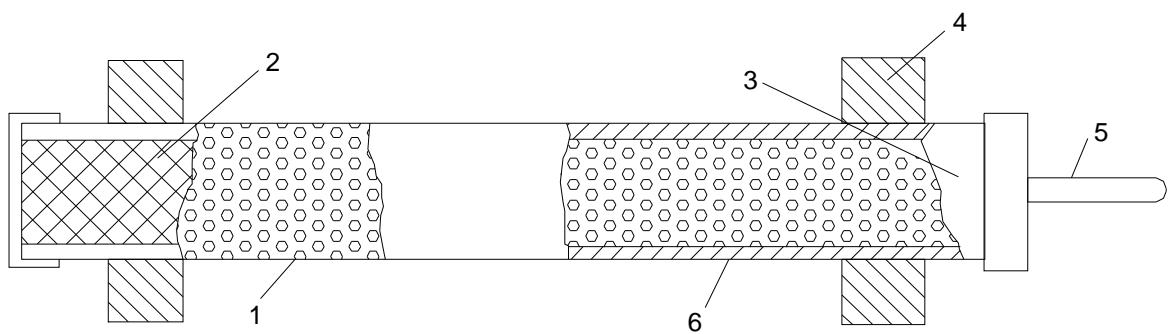


Figura 1.8 DISPOSITIVO INFLAMADOR UBICADO EN EL CANAL DE LA CARGA DEL COMBUSTIBLE SÓLIDO

1.-TUBO PERFORADO

2.-RECUBRIMIENTO SELLANTE

3.-INICIADOR

4.-APOYO DE JEBE POROSO

5.-CABLE ELECTRICO

6.-CARGA DEL COMPUESTO INFLAMADOR DE PASTILLAS PIROTECNICAS



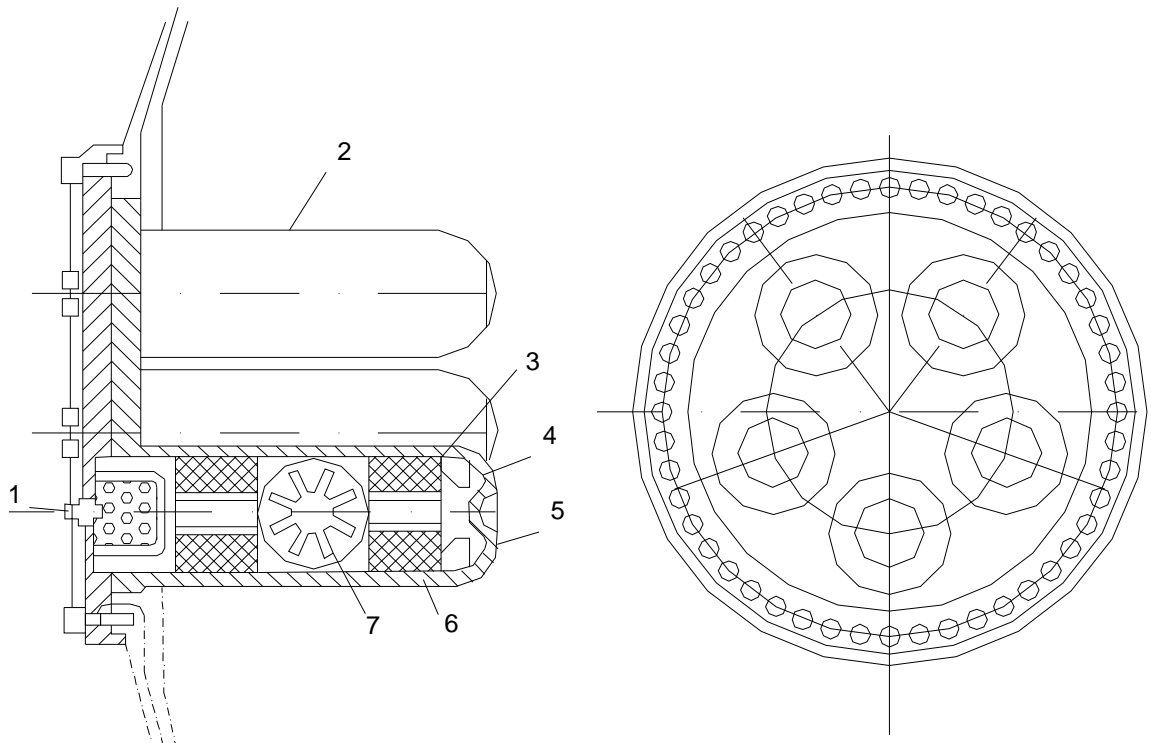


Figura 1.9 BLOQUE DE LOS DISPOSITIVOS INFLAMADORES PARA UN ENCENDIDO QUINTUPLE

- 1.-PIROCARTUCHO
- 2.-CUERPO
- 3.-CUERPO DE MATERIAL COMPUESTO
- 4.-TOBERA
- 5.-MENBRANA DE ROTURA DOBLE
- 6.-CARGA DEL COMBUSTIBLE SÓLIDO
- 7.-SECCION DEL CANAL DE LA CARGA DEL CS

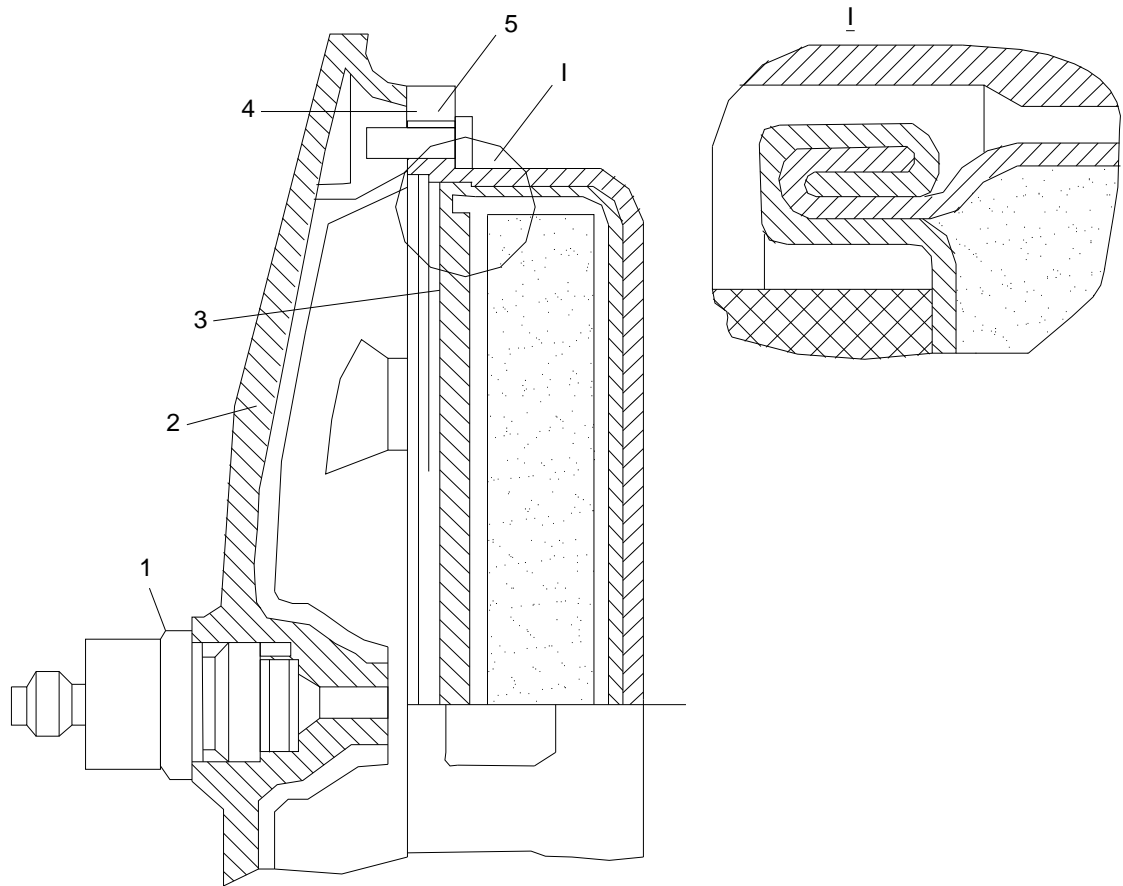


Figura 1.9 a DISPOSITIVO INFLAMADOR

1.-PIROCARTUCHO

2.-FONDO DELANTERO DEL MCCS

3.-CUERPO DEL INFLAMADOR

4.-ENVOLTURA

5.-TORNILLO DE FIJACIÓN DEL INFLAMADOR

El dispositivo inflamador tipo rollo (Fig.1.10) es una malla de la composición pirotécnica envuelta sobre el tubo perforado o sobre el molde central, dentro del cual se encuentra la bujía eléctrica. La fijación del dispositivo inflamador se efectúa con ayuda de los sellantes laterales. Este dispositivo inflamador posee una pequeña masa pasiva y como regla general se fija desde el lado de la tobera.

En la Fig. 1.11 se representa el esquema del dispositivo inflamador del tipo canastilla, en el cual el proceso de combustión se produce en un volumen semi cerrado a una determinada presión. Esta construcción del dispositivo inflamador garantiza una reproductividad relativamente alta de los parámetros del proceso de trabajo para el periodo de inflamación. Los inflamadores “canastilla” se fabrican de una carcasa de alambre, vidrio plástico o de lamina metálica perforada. Gracias a la variación de la cantidad de orificios y de sus medidas para este tipo de construcción del dispositivo inflamador se puede en cierto grado regular el nivel y la velocidad de variación de la presión en la cámara de combustión.

El Dispositivo Inflamador de este tipo permite también aumentar el tiempo de acción de los productos de la combustión de la Cara Inflamatoria sobre la superficie de la carga del Combustible Sólido.

Existen Dispositivos Inflamadores que combinan los elementos pirotécnicos con la técnica de los esquemas de impresión (Fig. 1.12). Estos dispositivos son franjas de material inductor eléctrico y de elementos pirotécnicos que forman una red sobre la superficie de combustión de la carga y están unidos en un circuito cerrado de fuego. La inflamación se produce cuando se alimenta de corriente al circuito. En la composición de la mezcla pirotécnica generalmente entran el oxidante cristalino (perclorato de potasio), el comburente (boro), el material conductor de electricidad (plata) y el aglutinante polimérico. Para disminuir la sensibilidad del inflamador a las acciones mecánicas se utiliza una capa protectora de papel aluminio.

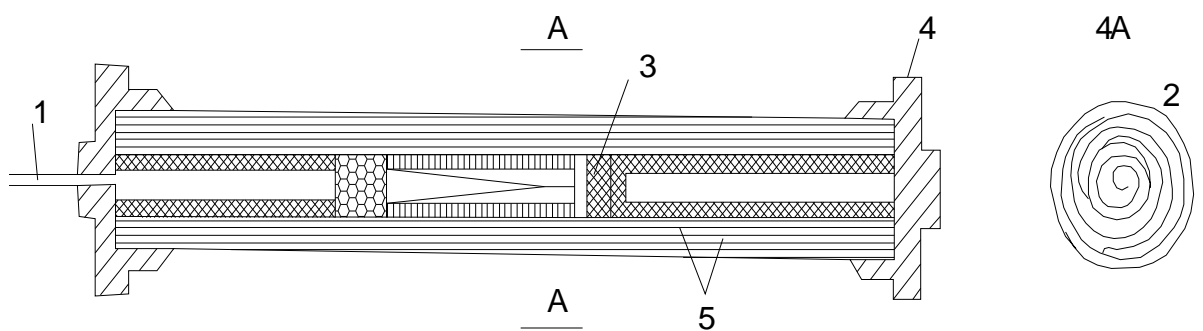


Figura 1.10 DISPOSITIVO INFLAMADOR TIPO ROLLO

1.-CONDUCTOR ELECTRICO

2.-MALLA DE MATERIAL PIROTÉCNICO ENVUELTO EN EL  
MOLDE

3.-INICIADOR

4.-BASE DEL DISPOSITIVO INFLAMADOR DE JEBE

5.-TELA EMPAPADA CON COMPUESTO PIROTECNICO

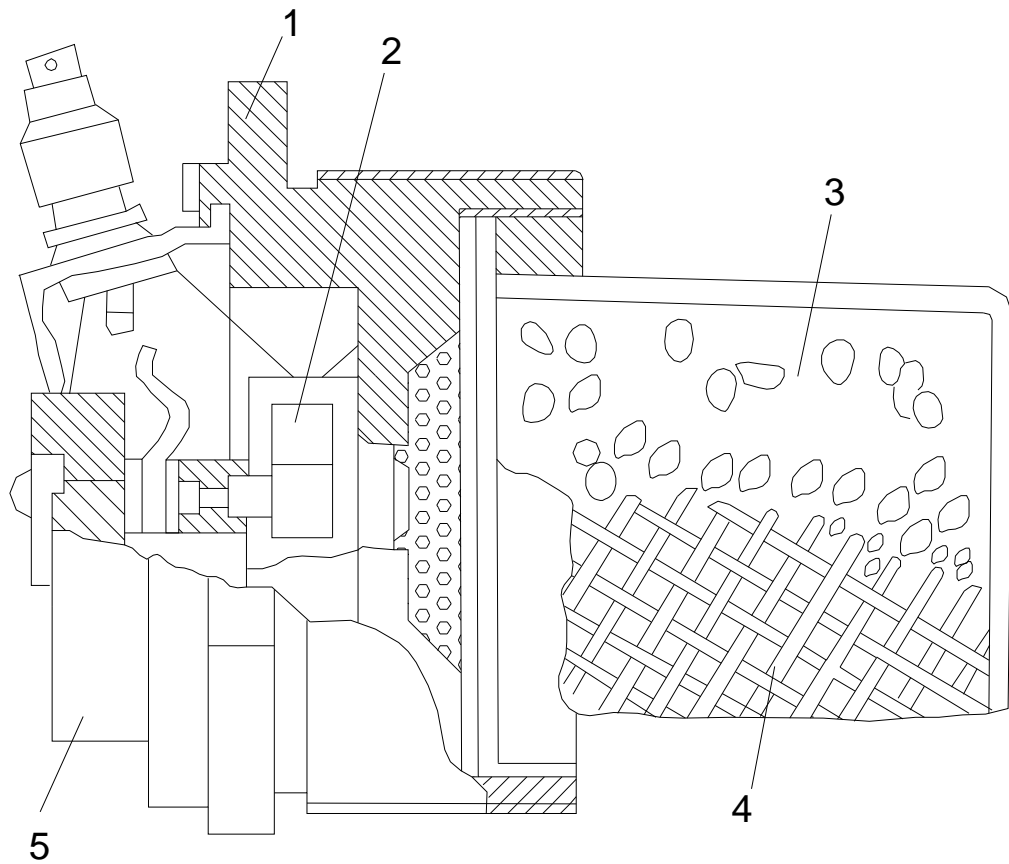


Figura 1.11 CONSTRUCCION TIPICA DEL DISPOSITIVO INFLAMADOR DE CANASTILLA

1.-BASE

2.-INICIADOR

3.-CARGA DEL COMPUESTO INFLAMADOR COMPUESTO POR PASTILLAS

4.-CANASTILLA

5.-UNION

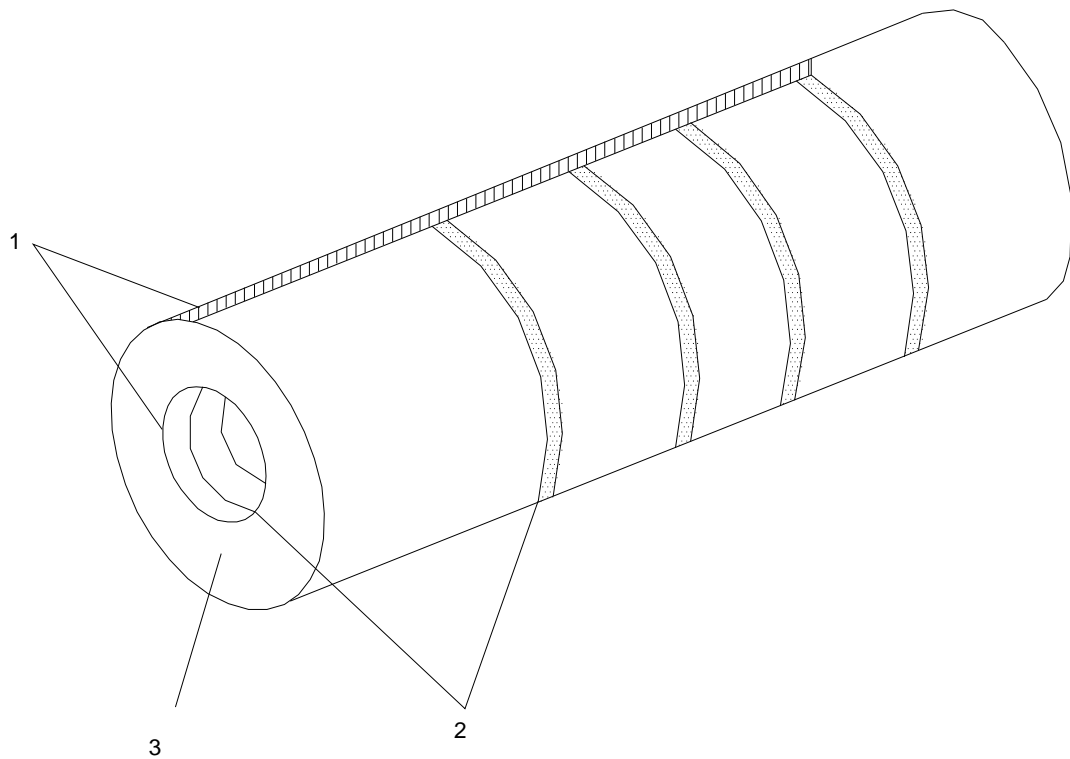


Figura 1.12 DISPOSITIVO INFLAMADOR DE PELÍCULA CONDUCTORA DE ELECTRICIDAD APLICABLE SOBRE LA SUPERFICIE DE COMBUSTIBLE DE LA CARGA DEL COMBUSTIBLE SÓLIDO

1.-CONDUCTORES

2.-PELICULA CONDUCTIVA DE ELECTRICIDAD CON MEZCLA PIROTÉCNICA

3.-CARGA DEL COMBUSTIBLE SOLIDO

## CAPITULO II

### MODELO FÍSICO DEL PROCESO DE INFLAMACIÓN

#### 2.1 Mecanismos de Encendido de los Combustibles Sólidos y condiciones de la Inflamación

El proceso de inflamación en los Motores de Cohetes de Combustible Sólido incluye en si a un conjunto de fenómenos gasodinámicos y físico-químicos que se desarrollan en un volumen libre de la cámara llena de productos gaseosos y en la capa superficial de la carga en el periodo de su encendido.

Hablando exactamente todo el proceso de encendido debe examinarse como único, sin embargo con la finalidad de aliviar las investigaciones de este proceso es conveniente resaltar y estudiar por separado, de un lado el círculo de fenómenos que caracterizan la propia inflamación del combustible sólido y por otro lado los fenómenos físicos que caracterizan la variación del estado del medio que llena el volumen libre de la cámara.

Cuando se estudian los procesos físico-químicos en la capa superficial del combustible inflamador y en la capa próxima de los productos de la combustión, denominado mecanismo de encendido, la acción gasodinámica y térmica sobre la carga desde el lado de los productos inflamables se limita mediante la implantación de condiciones límites simplificadas.

El modelo matemático de los procesos físicos en el volumen libre de la cámara de combustión en el periodo de la inflamación se construye generalmente suponiendo el encendido del elemento de la superficie de la carga ósea la aparición del frente de llama sobre la superficie y su entrada en el proceso de combustión produciéndose instantáneamente después de alcanzar ciertas condiciones críticas, por ejemplo, cierta temperatura de la superficie como en adelante se utiliza. Básicamente en el sugerido enfoque a nosotros nos va a interesar las leyes principales y las características del proceso de encendido y las

así denominadas condiciones críticas de encendido, que se entienden como la relación entre los parámetros del sistema, que divide a los regímenes de presencia y ausencia del encendido. Entre los parámetros del sistema se incluyen a las condiciones de calentamiento y a las características termofísicas del combustible.

Pasamos a examinar el tema propio del presente capítulo con un rápido recuento de los conceptos existentes sobre los fundamentos físicos del proceso de encendido y las condiciones críticas de encendido.

Los fundadores de la Escuela de inflamación térmica fueron N.N. Siemienov. [3], Y.B. Zeldovich, K.K. Andreev y otros.

El desarrollo de la teoría del encendido comienza desde los trabajos clásicos de Y.B. Sielovich [4–5] que formuló las condiciones de inflamación de la pólvora:

- Alcanzar la temperatura crítica de la superficie  $\theta_*$ , durante el cual comienza la descomposición intensa de la pólvora con la formación de productos gaseosos.
- Creación de una capa caliente lo suficientemente profunda, la existencia de llama en la superficie. El máximo valor de la gradiente de la temperatura  $\varphi$  en la superficie de la pólvora no deberá superar el valor crítico  $\varphi_*$ , determinado por la relación

$$\varphi_* = \frac{\rho_T c_{pr}}{\eta_T} \frac{2RT_r^2}{E_a} \frac{u(\theta_*)}{e} \quad (2.1)$$

- Donde:  $\Phi$       Gradiente de Temperatura
- $\Phi_*$       Valor crítico del gradiente de temperatura
- $\rho_T$       Densidad del combustible sólido
- $C_{pr}$       Calor específico de los productos de la combustión
- $R$       Constante específica del gas



$T_r$  Temperatura en la cámara de combustión

$u(\theta)$  Constante de la velocidad que depende de la temperatura crítica

$\eta_T$  Coeficiente de viscosidad

$E_a$  Energía de activación

$e$  Distancia recorrida por el frente de llama

Si es que  $\varphi > \varphi_*$  la reserva de calor en la capa caliente es insuficiente para mantener la combustión.

- Adición de una cantidad adicional de calor, necesario para el encendido de los vapores de pólvora que se forman en la superficie.

Como señala Y.B. Sielovich, la cantidad de calor necesario para el encendido de los productos de la combustión es muy pequeño en comparación al gasto de calor para el calentamiento de la fase condensada (capa caliente), por esta razón la tercera condición se puede no tomar en cuenta y suponer que la pólvora se inflama en el momento cuando se cumplan las dos primeras condiciones.

En el trabajo [4] simultáneamente se da una evaluación de los valores mínimos del espesor de la capa caliente  $Y_*$ , de la duración del calentamiento  $t_*$ , y del calor necesario  $W_*$  (en el cálculo por unidad de área de la superficie), requerido para alcanzar las condiciones de inflamación. Estas magnitudes son iguales correspondiente a:

$$y_* = \frac{\theta_* - \theta_H}{\varphi_*} \quad t_* = \frac{y_*^2}{x_r}$$
$$W_* = \rho_T c_T (\theta_* - \theta_H) y_* \quad (2.2)$$

Donde:  $Y_*$  Espesor de la capa caliente

$t_*$	Duración del calentamiento
$W_*$	Calor necesario
$\theta_*$	Temperatura característica
$X_T$	Coefficiente de la conductividad térmica
$\theta_H$	Temperatura de combustión de la carga a una $T^\circ$ normal en $^\circ K$
$\theta_0$	Temperatura de la superficie del combustible
$C_T$	Calor específico del combustible sólido
$\rho_T$	Densidad del combustible sólido

Estas ideas fueron desarrolladas en el trabajo [7], donde se examinó la inflamación de las pólvoras por un flujo de gases calientes en el cono, cuando la gasificación de la sustancia condensada se produce por completo debido a la adición de calor desde los productos gaseosos. Durante esto en función a la intensidad de adición de calor a la superficie de la pólvora, medida por la magnitud del flujo térmico específico ( $q$ ) desde los productos de la combustión a la carga de la pólvora, se distinguen del régimen de inflamación.

- El régimen de adición débil de calor, durante  $q < \eta_T \varphi_*$ , cuando el gradiente de temperatura es menor al crítico y se alcanza antes que la temperatura crítica de la superficie. En este caso la capa superficial al inicio acumula la cantidad necesaria de calor y luego una vez que la temperatura de la superficie llegue a ser igual a la temperatura de gasificación la pólvora se inflama.
- El régimen de fuerte adición de calor, durante  $q > \eta_T \varphi_*$ , cuando la temperatura de descomposición en la superficie del combustible se alcanza antes que el gradiente crítico de temperatura en la superficie. Después de alcanzar la temperatura crítica de la superficie la adición posterior del calor provoca una gasificación forzada de la capa superficial, hacia la cual se va parte del calor

adicionado, además el flujo térmico hacia la superficie se va a debilitar por los gases que la recorren. Como resultado el gradiente de temperatura en la cámara comienza a caer y cuando alcanza el valor crítico se produce la inflamación estable.

En el régimen de fuerte adición el inicio de la inflamación condicionalmente también se puede considerar cuando se alcanza la temperatura crítica de la superficie, ya que comenzando desde este momento se produce la gasificación del combustible.

Este es aproximadamente el cuadro físico de inflamación de la pólvora, que se deduce de la teoría de combustión no estacionaria, desarrollado por Y B Sieldovich. Concepciones similares sobre la esencia del proceso inflamador fue expresadas por K. K. Andreer [8].

Los trabajos señalados se basan en el modelo valido básicamente para las sustancias volátiles que no se descomponen en la fase condensada. Aparte de esto, este modelo no prevee las condiciones de inflamación en los productos gaseosos.

Por lo visto la consideración de las reacciones químicas en la fase condensada es el elemento necesario en la teoría de encendido de los combustibles sólidos de cohete.

El intento de considerar las reacciones exotérmicas que se desarrollan en la fase condensada durante la inflamación han hallado su expresión en el modelo térmico de D. Dreiser y B Heaks [9]. Ellos estudiaron el proceso de inflamación de una lamina semi infinita de combustible sólido, hacia la cual desde el lado de la superficie plana se adicionaba un flujo calorífico (térmico) (Fig. 2.1)

En la suposición de desarrollo en el combustible de las reacciones exotérmicas de orden cero con un efecto térmico  $U$  y de la preparación del calor en la masa combustible de acuerdo con la ecuación de conductividad de calor.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = x_r \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{U}{c_T p} e^{-\frac{E_a}{R\theta}} \quad (2.3)$$

Donde :  $\frac{\partial \theta}{\partial t}$  Es la conductividad de calor  
 U Es el efecto térmico

(La magnitud U incluye el así denominado multiplicador pre exponencial)

Las condiciones limites para la ecuación (2.3) tiene la forma

$$- \eta_r \frac{\partial \theta}{\partial y} = q_o = \alpha(T - \theta_o) \text{..cuando..} y = 0, t > 0,$$

$$- \eta_r \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0 \quad \text{cuando..} y \longrightarrow \infty, t \geq 0.$$

Como el segundo sumando en la parte derecha de (2.3) depende no linealmente de la temperatura  $\theta$ , obtener una solución analítica de carácter específico de esta función permite desarrollar métodos simplificados de solución.

Señalaremos la particularidad de la solución determinado por una relación exponencial entre la intensidad de la generación del calor debido a las reacciones exotérmicas y a la temperatura  $\theta$ . Después de alcanzar la temperatura característica  $\theta^*$  la generación del calor crece tan fuerte que el aumento posterior de la temperatura de la superficie del combustible hasta la temperatura de combustión se produce casi instantáneamente ósea prácticamente no requieren una adición suplementaria de calor desde una fuente externa, de tal manera que el proceso de inflamación se produce como si fuera espontáneo. Hasta alcanzar la temperatura característica  $\theta^*$ , la generación de calor interna es tan poco efectiva que se puede despreciar, reemplazando la solución (2.3) por la solución de la ecuación de la conductividad de calor sin considerar las reacciones exotérmicas en la fase condensada.

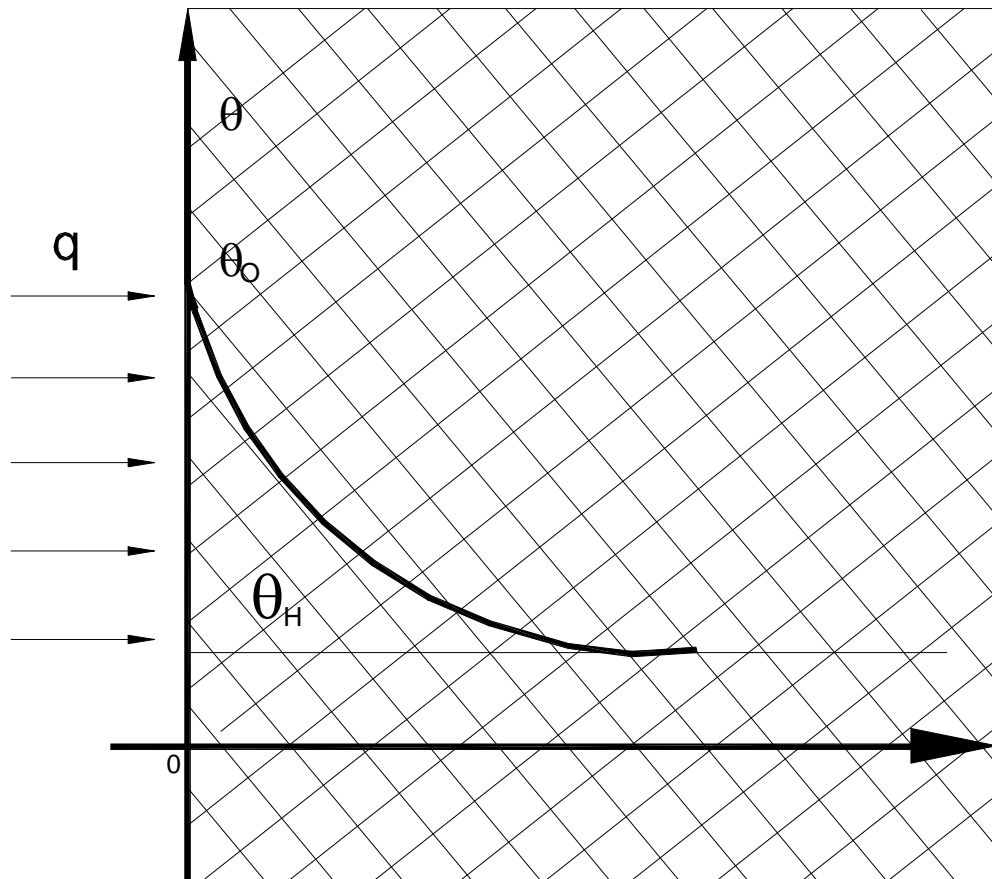


Figura 2.1 PROCESO DE INFLAMACIÓN DE UNA LAMINA SEMI INFINITA DE COMBUSTIBLE SÓLIDO, HACIA LA CUAL DESDE EL LADO DE LA SUPERFICIE PLANA SE ADICIONA UN FLUJO CALORÍFICO

Como temperatura característica  $\theta^*$  condicionalmente se entiende a aquella temperatura durante la cual la generación (desprendimiento) de calor debido a las reacciones químicas en la fase condensada comienza a ser un porcentaje lo suficientemente susceptible de la cantidad de calor transmitido desde la fuente externa o el extraído de la zona de reacción

$$\theta^* > 0,05Ea/R.$$

De esta manera desde la posición de la teoría térmica de la inflamación se debe considerar, que la inflamación se produce cuando se alcance la temperatura característica de la superficie del combustible, que garantiza la obtención de la velocidad crítica de generación de calor en la fase condensada. Correspondientemente la condición de inflamación es el calentamiento de combustible hasta la temperatura crítica respectiva.

La temperatura crítica  $\theta^*$ , puede ser hallada teóricamente como el punto en el cual se observa una divergencia notable de las curvas de la función de la temperatura de la superficie del combustible  $\theta_0$ , respecto al tiempo construido mediante la solución de la ecuación (2.3) considerando y sin considerar el desprendimiento del calor en la fase condensada.

Nos detendremos brevemente al desarrollo de los elementos del modelo físico de la teoría de encendido basado en el desprendimiento del calor en la fase gaseosa. La teoría habla sobre la inflamación del combustible en base a los procesos de intercambio de calor y reacciones químicas en la capa de los gases adyacentes a la superficie del combustible. Como resultado del calentamiento de la superficie de la carga, los productos de la descomposición del combustible que se evaporizan desde la superficie ingresan al medio gaseoso de los alrededores. Generalmente el componente comburente tiene una velocidad más alta de descomposición que los cristales del oxidante, por esta razón el comburente rápidamente pasa a un estado gaseoso. Los vapores del combustible que se forman en la superficie, son ricos en componentes comburentes, entran en reacción entre sí y también con el oxígeno que se encuentra en el medio de los alrededores. Cuando la cantidad de calor generada químicamente llega a ser igual a las pérdidas de calor como resultado

de la conductividad de calor al medio de los alrededores, se produce la inflamación de combustible.

El criterio de inflamación, utilizado en la teoría de encendido en la fase gaseosa de acuerdo con el modelo descrito arriba tiene la forma.

$$q_r = q_n ; \quad \left( q_n = -\eta_r \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (2.4)$$

Donde  $q_r$  -es la velocidad de la generación de calor debido a las reacciones en la capa gaseosa a la superficie de la carga.

$q_n$  -es el flujo calorífico de la capa gaseosa al medio externo.

$T$  ,  $\eta_r$  -son la temperatura y la conductividad de calor del gas en el medio adyacente a la superficie.

El empleo practico del criterio (2.4) en el proceso de inflamación de la carga en las configuraciones que se utilizan ampliamente de los motores, provoca grandes dificultades debido a la no claridad de que manera calcular las magnitudes  $q_r$  y  $d^2T/dy^2$  considerando el recorrido de la superficie inflamada por el flujo de gas.

En los últimos tiempos se ha propagado la tal denominada teoría de encendido heterogéneo. En base a esta teoría se encuentra la hipótesis, sobre el rol principal en el proceso de encendido de los combustibles sólidos híbridos que juegan las reacciones heterogéneas entre oxidante gaseoso y los aglutinantes condensados, que se desarrollan directamente en la superficie inflamada, o en la capa superficial en el limite de separación de los granos del oxidante y del comburente. Las reacciones heterogéneas tienen lugar durante la así denominada inflamación hipergolica (autoinflamación) de los combustibles sólidos mediante el contacto con el oxidante liquido o gaseoso químicamente activo.

En el caso cuando la inflamación se consigue mediante el calentamiento de la superficie del combustible con los productos de la combustión del inflamador, de acuerdo a la teoría heterogénea de encendido inicialmente se produce la

sublimación del oxidante, cuyos productos luego entran en reacción con el aglutinante. Durante una inflamación normal de desprendimiento de calor debido a esta reacción heterogénea exotérmica supera las pérdidas de calor lo que provoca el crecimiento de la temperatura de la superficie hasta el valor crítico, durante el cual de forma espontánea aparecen las reacciones auto sostenidas lo que en sí se considera como encendido del combustible.

El estado de la combustión estacionaria se consigue más adelante sin la adición de energía desde el inflamador.

Los resultados publicados de la investigación experimental del mecanismo de encendido está de cierta manera limitado y permiten obtener determinados conceptos sobre la naturaleza de los procesos estudiados solamente aplicable al modelo térmico.

Señalaremos que ninguna de las teorías de encendido no entran en el marco de heterogeneidad, factor que para los combustibles híbridos juega un papel importante, ya que la zona de calentamiento durante una adición intensa de calor puede ser menor a las medidas de las partículas, lo que inevitablemente debe influir en el carácter de desarrollo de los procesos de encendido.

A pesar de la ausencia de concepciones únicas sobre el mecanismo de encendido del combustible sólido se puede resaltar las siguientes posiciones que encierra u otras medidas que son genéricas y reflejan los conocimientos acumulados y la experiencia. La inflamación del combustible sólido se produce como resultado de formación sobre su superficie de productos de la gasificación que calentándose, reaccionan entre sí y con la superficie del combustible, como resultado del cual aparece la llama. De esta manera, en todos los casos para la inflamación del combustible sólido es necesario el calentamiento previo de su superficie hasta una temperatura, durante la cual comienza la formación intensa de los productos de la gasificación o se excitan las reacciones exotérmicas.

Para las composiciones balísticas la formación de la llama sobre la superficie no es condición suficiente de una inflamación estable; se requiere todavía calentar la capa superficial de la carga en una determinada profundidad para que la cantidad



de calor acumulada, calculada por unidad de superficie de la carga sea comparable con el calor que se encuentra en la capa caliente del combustible que arde estacionariamente para las condiciones dadas.

Por consiguiente las principales condiciones de encendido estable del combustible balístico pueden ser presentadas de la siguiente forma:

- Calentamiento de la superficie del combustible hasta la temperatura de descomposición o desarrollo de las reacciones exotérmicas en la capa caliente, haciendo notar que la magnitud de esta última depende de la velocidad de calentamiento y del mecanismo de encendido.
- Transferencia de determinada cantidad de calor a la carga calculada por unidad de superficie (creación del gradiente crítico de temperatura de la fase condensada en la superficie).

Para los sistemas con una reacción en la fase condensada la última condición puede ser no sustancial.

La duración de la inflamación del elemento de la superficie se determina por el tiempo de calentamiento de la capa superficial, ya que el tiempo de inflamación de los productos gaseosos de la sublimación es despreciablemente pequeño en comparación con el tiempo de calentamiento.

La inflamación de los combustibles híbridos es en gran medida un resultado de los procesos que se desarrollan en la fase gaseosa y en las superficies de división de los granos del oxidante y del comburente.

La principal condición de la inflamación estable es la pirolisis de determinado espesor de la capa superficial con la formación de los productos gaseosos de descomposición del aglutinante y del oxidante (si es que el medio de los alrededores no hay oxígeno).

De esta manera para el combustible híbrido la inflamación estable puede ser alcanzada cuando se caliente la superficie del combustible hasta la temperatura de pirolisis con la posterior adición de calor en una cantidad, insuficiente como para la sublimación de la capa superficial.

Tanto para los híbridos como para los compuestos balísticos la condición necesaria para la inflamación es alcanzar la temperatura crítica de la superficie del combustible y la suficiencia de la condición se predetermina por la transferencia de

una cantidad determinada de calor a través de la unidad de área de la superficie del combustible.

La diferencia consiste solamente en que para los combustibles híbridos este calor se gaste básicamente en la gasificación del aglutinante y del oxidante mientras que para los balísticos en el calentamiento de la capa superficial.

La temperatura crítica de la superficie y la cantidad crítica de calor dependen de la presión y de la temperatura inicial de la carga, de las características termofísicas del combustible, de la velocidad y del método de adición de calor, del estado de la superficie del combustible y de algunos factores secundarios. La forma general de estas ecuaciones hasta la fecha no se ha establecido. El valor de la cantidad de calor  $W_*$  en un cálculo por unidad de área y superficie de la capa calentada puede ser considerada igual a la cantidad de calor correspondiente en la capa calentada de combustible que arde estacionariamente. En este caso, optando la distribución de Michelson de la temperatura en la capa caliente, fácilmente se obtiene:

$$W_* = \int_0^{\infty} c_T p_T [\theta(y) - \theta_H] dy = \int_0^{\infty} c_T p_T (\theta_* - \theta_H) e^{-\frac{u}{x_T} y} dy = \frac{\eta_T (\theta_* - \theta_H)}{u}. \quad (2.5)$$

La cantidad de calor depende de la presión disminuyendo con su aumento

**Donde:**  $W_*$  Calor necesario

$\theta_*$  Temperatura característica

$\theta_H$  Temperatura de combustión de la carga a una  $T^\circ$  normal en  $^\circ K$

$u$  Velocidad media condicional del medio continuo

$\eta_T$  Coeficiente de llenado volumétrico del combustible

$C_T$  Calor específico

De acuerdo a la formula (2.5), la cantidad critica del calor  $W^*$  depende de la presión, disminuyendo con su aumento. Por lo visto, el uso de la función (2.5) para determinar las condiciones criticas de la inflamación esta fundamentado solo para las composiciones balísticas.

## **2.2 Modelo físico del proceso de inflamación de la carga en la cámara de combustión**

Para un enfoque simplificado que hace tiempo ha sido adoptado en la práctica de los cálculos balísticos que es el proceso de inflamación en la cámara de combustión de los Motores Cohete de Combustible Sólido se puede considerar como instantáneo. Ósea el tiempo entre el momento de iniciación de la inflamación y el momento de que se cubra totalmente la carga con llama no se toma en cuenta. La curva de la presión en la cámara de combustión en este caso se calcula comenzando desde cierto nivel condicional, denominado presión de inflamación, que se determina por ejemplo, como la presión desarrollada por el dispositivo inflamador durante la combustión cuando arde en el volumen cerrado de la cámara. El enfoque excluye la necesidad de examinar el proceso de combustión del inflamador y del encendido de la carga.

El desarrollo de los Motores de Cohetes de Combustible Sólido de grandes dimensiones requiere un estudio mas profundo del proceso inflamatorio.

Un impedimento considerable en el camino de construcción del modelo físico del proceso de inflamación de la carga del combustible sólido en la cámara ha sido la ausencia de comprobación experimental sobre las nociones de carácter de comportamiento del proceso investigado.

Examinaremos el modelo físico no estacionario hipotético en cierta medida de los procesos de inflamación en la cámara del motor que tienen lugar en el periodo de inflamación y entrada del motor en el régimen, cuya descripción de cierta manera critica las nociones acumuladas y refleja las particularidades específicas del proceso [1]

Cogeremos la configuración más común del motor cargado con una carga que arde por el canal y con un inflamador A en el fondo delantero Fig. 2.2

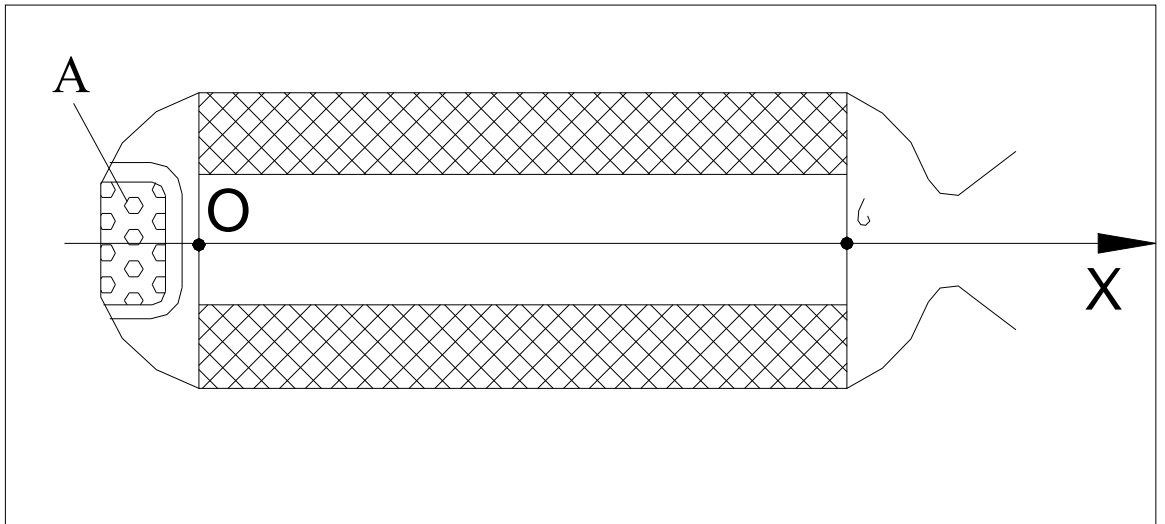


Figura 2.2 CONFIGURACIÓN MÁS COMÚN DEL MOTOR CARGADO CON UNA CARGA QUE ARDE POR EL CANAL Y CON UN INFLAMADOR “A” EN EL FONDO DELANTERO

### 2.2.1 FASE PREVIA AL PROCESO DE INFLAMACION

Generalmente la inflamación se produce mediante el envío de un impulso eléctrico al pirócartucho que dirige la fuerza de la llama a la composición inflamatoria. Señalaremos que el ingreso de los productos de la combustión de la piro composición a la cámara del motor puede provocar la aparición de un salto de la presión en la cámara, como esto se ve por ejemplo, de la curva característica de variación de la presión en la parte inicial de trabajo del motor mostrado en la Fig. 2.3

La fuerza de la llama del pirócartucho calienta al componente inflamador y gradualmente lo enciende.

El propio proceso de encendido del componente inflamador se desarrolla en el tiempo:

- Al inicio se encienden los granos de la carga del compuesto inflamador, sobre los cuales de manera directa actúa la fuerza del pirócartucho.
- Después del cual la llama se propaga a los granos vecinos de la carga del compuesto inflamador.
- Los productos de la combustión del compuesto inflamador a través de la envoltura protectora del cuerpo del inflamador ingresan a la cámara de combustión del motor.

Comenzando desde este momento, la presión en la cámara de combustión se incrementa, lo que propiamente se considera el inicio del periodo de inflamación.

El tiempo  $t_{3g}$  desde el envío del impulso de la corriente al pirócartucho (o fuente de incandescencia) hasta el inicio del proceso estable de crecimiento de la presión en el motor lo vamos a llamar “tiempo de retardo del encendido” del compuesto inflamador.

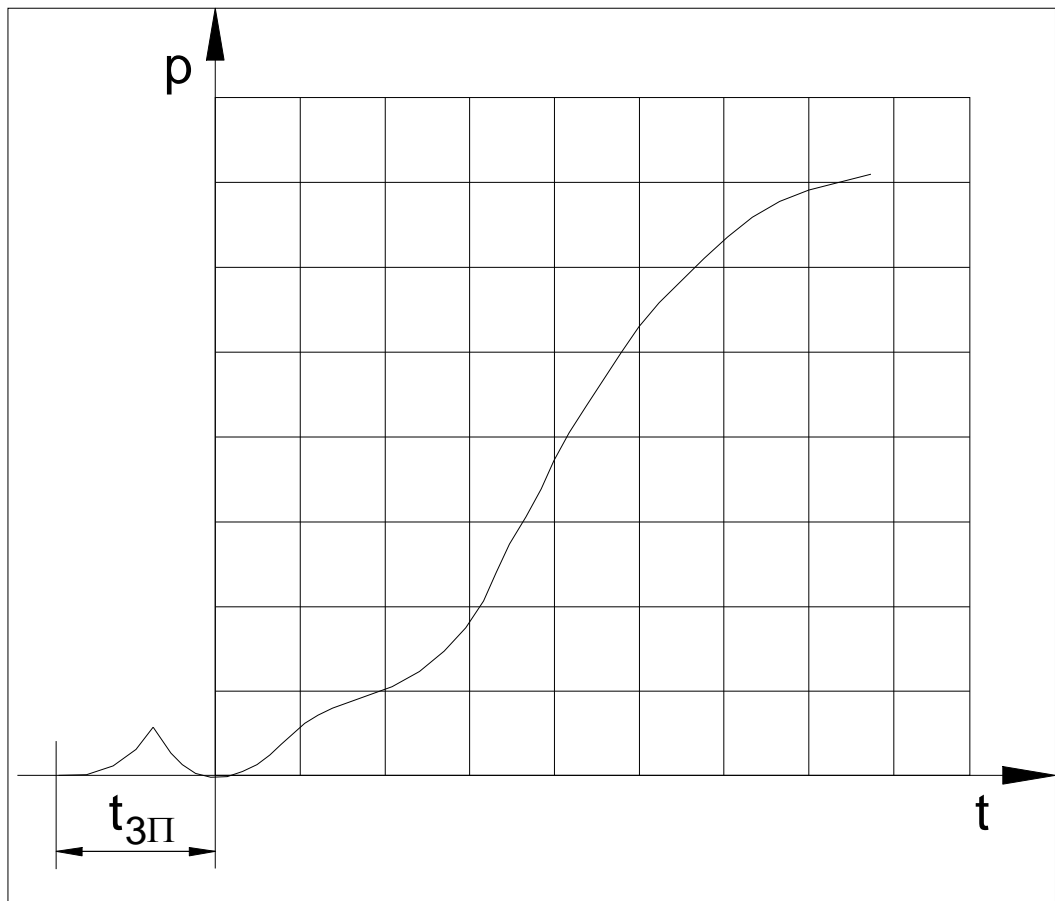


Figura 2.3 CURVA CARACTERÍSTICA DE VARIACIÓN DE LA PRESIÓN EN LA PARTE INICIAL DE TRABAJO DEL MOTOR

## 2.2.2 PRIMERA FASE DEL PROCESO DE INFLAMACIÓN

### **Propagación del frente de llama de los productos de la combustión por el canal de la carga del Combustible Sólido.**

Después de la inflamación la combustión de los elementos de la carga de Compuesto Inflamador, se produce ya sea en el volumen libre de la cámara (en caso de utilizar un cuerpo no destructible), o en el propio cuerpo del inflamador, desde el cual los productos de la combustión ingresan a la cámara de combustión del motor a través de los orificios del caudal.

Los productos de la combustión (2) del Compuesto Inflamador (1) llenan el volumen libre en el fondo delantero y desplaza al aire (4) del canal de la carga. Durante esto el frente de los gases calientes del Compuesto Inflamador, generalmente concebido en forma de una superficie plana (3), que divide los productos de la combustión del Compuesto Inflamador y el aire, se desplaza a lo largo del canal, ver Fig. 2.4

Al mismo tiempo la onda de la presión, cuya velocidad en condiciones normales es superior a la velocidad del frente señalado, también se propaga por el canal, provocando el aumento de la presión del aire en el canal y en el volumen antes de la tobera de la cámara de combustión. Mas adelante la onda de la presión reflejándose del fondo posterior, se propaga en dirección contraria e interactúa con la división de contacto; en este periodo en el volumen libre de la cámara de combustión tiene lugar un cuadro complicado de interacción de las ondas. En determinadas condiciones la onda de presión, propagándose en el medio de aire puede degenerar en una onda de choque. El aumento de la presión del aire en el volumen antes de la tobera provoca la destrucción del tapón de tobera sellante, después del cual comienza el proceso de descarga del aire, que dura hasta que la división de contacto no alcance la sección de salida del canal y los productos de la combustión del Compuesto Inflamador no cubra por completo el volumen libre del motor.

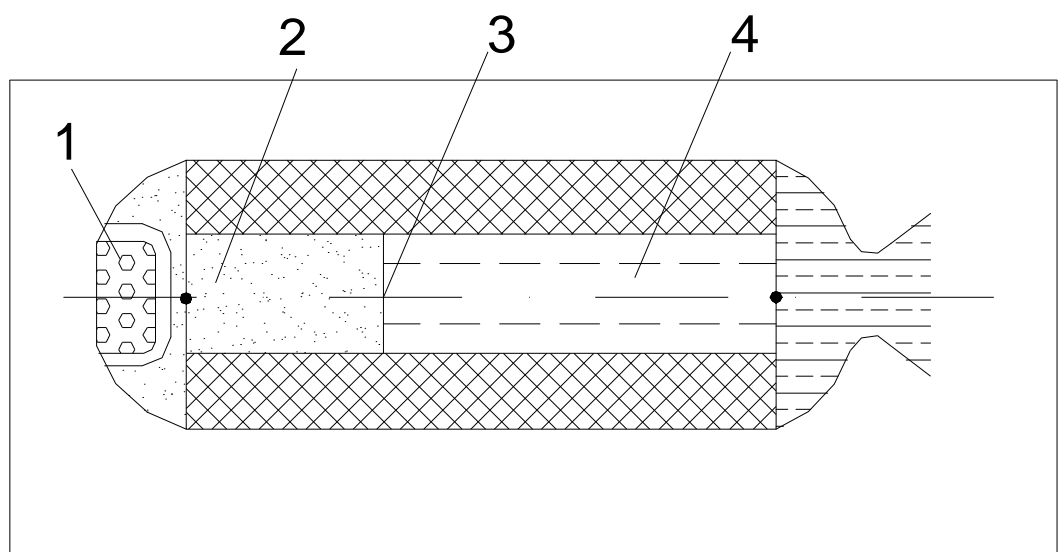


Figura 2.4 **PRIMERA FASE DEL PROCESO PROPAGACIÓN DEL FRENTE DE LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN DEL INFLAMADOR POR EL CANAL**

1. Combustión del compuesto inflamador
2. Llenado del volumen libre en el fondo delantero y desplazamiento del aire del canal de la carga
3. Frente de los gases calientes del compuesto inflamador
4. Productos de la combustión del compuesto inflamador y el aire, se desplaza a lo largo del canal



La destrucción del tapón provoca la aparición de la onda de depresión, que se propaga por el volumen libre de la cámara de combustión. Si el inflamador está ubicado en la parte de tobera de la cámara, entonces en el transcurso de la primera fase los productos de la combustión del Compuesto Inflamador desplazan el aire del canal al volumen libre en el fondo delantero, simultáneamente parte de los productos después de la destrucción del tapón sale a través de la tobera.

En la primera fase se produce un calentamiento parcial de la superficie de la carga. Se puede suponer que el elemento de la superficie comienza a calentarse después de que por él haya pasado el frente de los gases del Compuesto Inflamador y despreciar el efecto insignificante del aumento de la temperatura del aire desplazado debido a la compresión y la acción de los flujos radiacionales a través del medio aéreo.

De este modo ya en el primer periodo se han dado las condiciones del calentamiento no equivalente de las diferentes zonas de la superficie de la carga, lo que condiciona el inicio desigual de la inflamación de estas zonas. Se debe señalar que la fuerza de la llama del pirócartucho en una serie de casos puede propagarse a una considerable profundidad en el canal y provocar el movimiento del aire que parcialmente se mezcla con los productos de la combustión del Compuesto Inflamador, por esta razón la noción sobre la presencia de un límite claro que dividen los gases de del Compuesto Inflamador y el aire, en cierta medida es condicional.

### **2.2.3 SEGUNDA FASE DEL PROCESO**

#### **Combustión del compuesto inflamador y calentamiento de la superficie de la carga del combustible sólido**

Durante la segunda fase se produce la combustión solamente del Compuesto Inflamador, cuyos productos de la combustión cubren la superficie de la carga y salen a través de la tobera, ver Fig. 2.5

Se produce el calentamiento de toda la superficie de la carga por convección, por radiación y por el contacto directo de las partículas ardientes del compuesto inflamador, que son llevados por el flujo y que se precipitan sobre la superficie. Durante el segundo periodo los diferentes elementos de la superficie de la carga también se encuentran en condiciones equivalentes de calentamiento debido a la variación de los parámetros de flujo sobre todo de la velocidad condicionado por la variación y no estacionaridad de la estructura de la capa limite y que varia a lo largo del canal.

La segunda fase se prolonga hasta que las condiciones en cierta parte de la superficie de la carga principal, que esta sometida a un calentamiento más intenso no alcanzan las condiciones críticas de inflamación. Como se mostró antes los conocimientos modernos sobre el mecanismo de encendido de los combustibles sólidos no permiten establecer con una suficiente determinación las condiciones de encendido, por esta razón con la finalidad de concretizar estas condiciones mas adelante vamos hablar sobre el alcance de la temperatura critica de inflamación.

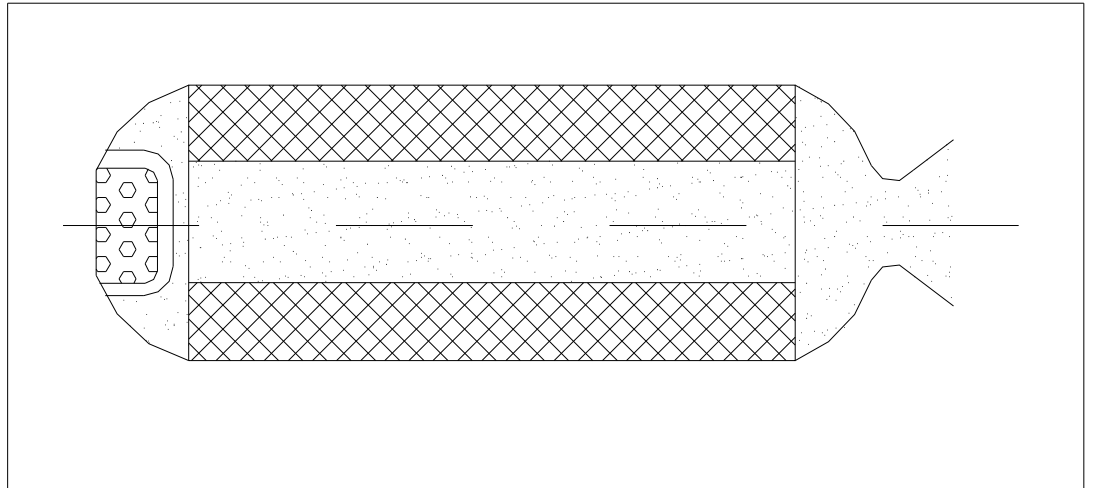


Figura 2.5 **SEGUNDA FASE DEL PROCESO COMBUSTIÓN DEL INFLAMADOR Y EL CALENTAMIENTO DE LA SUPERFICIE DE LA CARGA**

## 2.2.4 TERCERA FASE DEL PROCESO

### **Propagación de la llama por la superficie de la carga del combustible sólido**

Después de la inflamación de una parte de la carga principal del combustible sólido, los productos gaseosos de la combustión que se forman en el proceso de combustión mezclándose con los productos del compuesto inflamador continuaran calentando la parte restante de la pólvora, como resultado de dicho proceso, la zona en la cual se alcanzan las condiciones críticas de inflamación se propaga por la superficie de la carga (por el canal) en forma de un frente de llama (ver Fig. 2.6)

En este periodo se produce una variación sustancial de las condiciones del flujo y del calentamiento de la carga a lo largo del canal, condicionado por los siguientes factores.

1. El desplazamiento del frente de llama conlleva a la variación de la estructura de la capa limite en la zona inflamada de la superficie de la carga; esta perturbación provoca una deformación de la capa limite que se propaga con la velocidad del sonido, este ultimo deberá provocar la variación de las condiciones del calentamiento, ya que la velocidad del sonido, evidentemente sustancialmente supera la velocidad de propagación del frente de llama.
2. Los productos de la combustión de la parte inflamada de la carga ingresan al canal y se mezclan con el flujo principal. El frente de estos productos se mueve por el canal con la velocidad del flujo. Es natural suponer, que la velocidad del flujo supera a la velocidad de propagación del frente de llama por el canal. En este caso el flujo mezclado de los productos de la combustión del Compuesto Inflamador y del combustible se adelanta al frente de llama y cubre la superficie

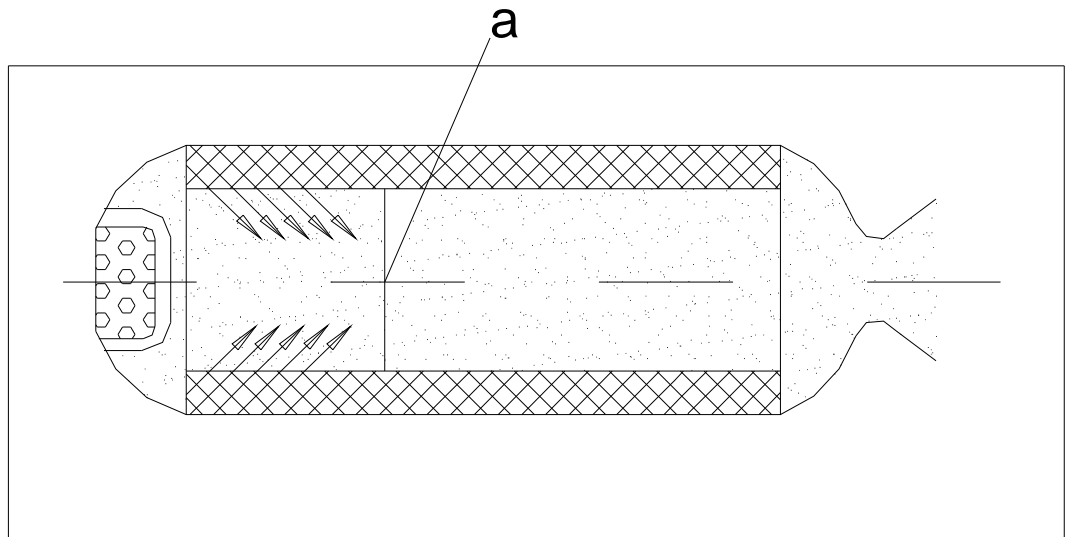


Figura 2.6 **TERCERA FASE DEL PROCESO PROPAGACIÓN DE LA LLAMA POR LA SUPERFICIE DE LA CARGA.**

todavía no inflamada, lo que provoca un calentamiento mas fuerte de la superficie del canal.

3. Un ingreso adicional de los productos de la combustión de la parte inflamada del combustible al canal provoca la propagación en el flujo de ondas de presión que se desplazan con la velocidad del sonido, que continuamente varia los parámetros del flujo en el canal.

Para el caso cuando el inflamador esta ubicado en la parte de tobera el cuadro se complica aun más ya que el flujo en la cámara no tiene una dirección, parte de los productos salen a través de la tobera y parte llena el volumen libre de la cámara.

Hay que señalar que el cuadro de desplazamiento de una dirección del frente de llama de por sí solo es hipotético. El uso de compuestos inflamadores pirotécnicos, que tienen un considerable contenido de partículas condensadas en los productos de la combustión, puede provocar una inflamación local de fuego de las zonas de la superficie sometidas al calentamiento por las partículas que llegan a estar en la superficie por acción de la gravedad, de las pulsaciones turbulentas en el flujo o debido a la presencia del componente transversal inicial de la velocidad.

La propagación de la llama por la superficie del combustible en este caso tiene un carácter de unión de las fases de inflamación, y el concepto de velocidad de propagación del frente de llama tiene un carácter condicional debido a la ausencia de un frente único.

Esta fase del proceso culmina en el momento, cuando toda la superficie de la carga esta cubierta de llama.

## 2.2.5 CUARTA FASE DEL PROCESO

### **Combustión conjunta de la carga principal y de los residuos del compuesto inflamador. Entrada del motor al régimen estacionario de trabajo.**

En el momento de la inflamación total de la carga en la cámara de combustión, puede quedarse parte del compuesto inflamador, que termina de quemarse en el periodo cuando la carga principal completamente ya participa en el proceso de combustión (ver Fig.2.7). Los productos de la combustión de la carga principal y de los residuos del Compuesto Inflamador parcialmente salen del motor y parcialmente se van al llenado del volumen libre de la cámara. Este ultimo esta condicionado por el hecho de que la superficie de la carga se cubre de llama a presiones relativamente bajas, generalmente muy inferior que la presión estacionaria en la cámara, por esta razón el ingreso de los productos de la combustión supera al gasto y la presión en la cámara se incrementa.

Mas adelante a medida que se incrementa la presión se produce la igualación del ingreso y del gasto; los residuos de las composiciones inflamatorias completamente arden y el motor entra al régimen estacionario de trabajo. En el motor con el inflamador en el fondo de tobera la cuarta fase del proceso se desarrolla de manera similar.

Esto es en líneas generales el modelo físico del proceso de inflamación de la carga del combustible sólido en la cámara de combustión, la descomposición mostrada en el cuadro general del proceso y la división del proceso en fases seguramente limitadas en cierta forma es condicional, debido a las particularidades impuestas por las condiciones concretas.

El desarrollo del proceso puede cambiar en forma. Así por ejemplo, el inicio de la inflamación de la carga puede comenzar antes de que se bote

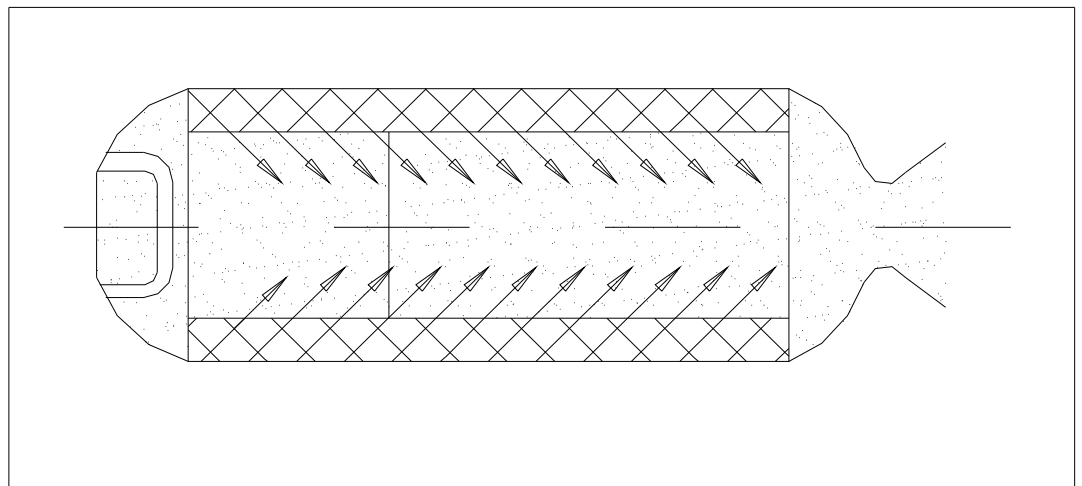


Figura 2.7 **CUARTA FASE DEL PROCESO COMBUSTIÓN CONJUNTA DE LA CARGA PRINCIPAL Y DE LOS RESIDUOS DE LA COMPOSICIÓN INFLAMATORIA. LA ENTRADA DEL MOTOR AL REGIMEN ESTACIONARIO,**



completamente el aire de la cámara de combustión, en este caso la segunda fase se junta con la primera.

La combustión de la composición inflamatoria puede finalizar antes de la inflamación completa de la carga lo que varía el carácter del desarrollo de la tercera y cuarta fase. Simultáneamente a pesar de las particularidades específicas predeterminadas por unas u otras condiciones particulares, las leyes generales de los fenómenos se propagan a todos los casos individuales.

### **2.3 Principales principios y suposiciones utilizados durante la construcción del modelo matemático del proceso de inflamación**

La principal base para construir el modelo matemático del proceso inflamatorio en la cámara de combustión del Motor Cohetes Combustible Sólido es el aparato de la teoría de los flujos unidimensionales en el canal de la carga, las relaciones que se deducen de las leyes de conservación de la masa y de la energía, las ecuaciones de intercambio de calor entre los productos de la combustión y de la carga y una serie de funciones especiales.

Antes de pasar a describir matemáticamente el proceso inflamatorio que se producen en el motor, cargado en una carga que arde desde el canal (ver Fig. 2.2), nos detendremos a analizar los principales principios en que se fundamenta el modelo matemático de la inflamación.

Son posibles los siguientes enfoques principales para construir el modelo matemático

- La descripción matemática del proceso de inflamación con la ayuda de ecuaciones en derivadas parciales, que permiten tomar en cuenta la

variabilidad de las magnitudes físicas en el espacio del volumen libre de la cámara y en el tiempo.

- La descripción matemática del proceso de inflamación con ayuda de un sistema de ecuaciones diferenciales comunes mediante la promediación de las magnitudes físicas en todo volumen libre de la cámara.
- El empleo del método de promediación de las magnitudes físicas por los volúmenes de las zonas típicas para describir el proceso de inflamación con ayuda de ecuaciones diferenciales comunes.

Caracterizaremos la esencia de cada uno de estos enfoques.

La descripción del proceso de inflamación con ayuda de ecuaciones en diferenciales parciales se basa en la teoría de flujos no estacionarios en el canal de la carga y en la cámara de combustión.

En la supervisión de un carácter unidimensional del movimiento de los productos de la combustión de la composición inflamadora y del combustible en calidad inicial se puede utilizar el sistema de ecuaciones de un flujo unidimensional no estacionario en el canal con un ingreso de gas distribuido, si es que los productos de la cámara de combustión se consideran como un gas ideal homogéneo, o si es que se considera un flujo de doble fase condicionado por la presencia en los productos de la combustión de partículas condensadas. A las relaciones gasodinámicas señaladas se deberá añadir el sistema de ecuaciones en derivadas parciales, que describe el proceso no estacionario de transferencia de calor y de la masa en la capa superficial de la carga del combustible sólido, esta solución permite registrar el momento de inicio de la inflamación de cada parte de la superficie a lo largo de la carga (en un caso simple se considera una ecuación de la conductividad de calor no estacionario).

Las condiciones iniciales y límites para el sistema de ecuaciones obtenido en derivadas parciales se formulan considerando lo específicos de cada motor y

aplicable al modelo físico adoptado del proceso. La descripción de las condiciones límite varia cuando se pasa de una fase del proceso a otro (rigurosamente hablando, varia un poco y la propia estructura de las ecuaciones: así los términos que caracterizan el ingreso de gas adicional desde la superficie lateral del canal deberán considerarse solamente después de la inflamación de la superficie.

Examinaremos mas adelante el segundo método de construcción del modelo matemático del proceso de inflamación, en cuya base se fundamenta el principio de promediación total de la presión, de la densidad y de la temperatura de los productos que llenan la cámara de combustión en su volumen libre.

Las ecuaciones diferenciales que describen la variación de las magnitudes promedios en el tiempo se construyen mediante el uso de la ley de conservación de la sustancia y de la energía en toda la masa de los productos que llenan el volumen libre. El método de promediación total en el volumen libre, puede considerarse como una aproximación cero de un modelo más general, que toma en cuenta la variación de las magnitudes física no solamente en el tiempo, sino en el espacio del volumen libre.

El empleo de la teoría de dimensión cero para describir el proceso de inflamación permite sustancialmente simplificar el aparato matemático que se presente en este caso como un sistema de ecuación diferenciales comunes.

La principal desventaja de este enfoque consiste en la necesidad de simplificar sustancialmente e inclusive la distorsión del cuadro físico del proceso, ya que la promediación de las características físicas en todo el volumen libre no permite tomar en cuenta las particularidades gasodinamicas de interacción de los productos heterogéneos, la variación de la presión de la densidad, de la temperatura y de la característica termodinámica de los productos a lo largo de la cámara y la dinámica de propagación del frente de llama por la superficie de la carga.

Con la finalidad de corregir aunque sea parcialmente las desventajas señaladas conservando el modelo matemático, del sistema presentado de ecuaciones diferenciales comunes, se puede proponer el principio de promediación de las magnitudes físicas en volumen separado de la zona típica.

El empleo de este principio no supone una total exclusión de la consideración de la variabilidad de las magnitudes físicas a lo largo de la cámara de combustión, ya que mediante la división de la cámara en volúmenes típicos y el empleo de las leyes de conservación de los productos, que llenan estos volúmenes, se consigue en cierta medida considerar la variación de ciertas magnitudes no solamente en el tiempo sino a lo largo de la longitud. Semejante método que es en esencia la teoría de dimensión cero modificado, es la base de la descripción matemática mostrada mas abajo del proceso de inflamación.

Antes de pasar a describir la materia propia de este subcapitulo debemos examinar y fundamentar ciertas simplificaciones principales, que se utilizan durante la descripción matemática del proceso de inflamación.

Vamos a suponer, que los productos de la combustión del inflamador y su mezcla con los productos de la combustión del combustible son un medio homogéneo continuo en forma de una gas ideal no viscoso, aunque para la mayoría de las composiciones inflamatorias y para los combustibles metalizados los productos de la combustión son una mezcla de productos gaseosos que arden en partículas oxidadas y también en residuos sólidos arrastrados por el flujo; el porcentaje en peso de las partículas en los productos de la combustión puede ser durante estos muy pequeños algunas décimas.

De esta manera los productos que llenan la cámara de combustión durante el periodo inflamatorio se pueden considerar solamente como un medio continuo, en forma hipotética. Vamos a diseminar el concepto de la presión, la densidad, la temperatura y de las características termodinámicas del modelo del mismo.

La densidad masica de las condiciones del medio continuo lo determinaremos de la relación,

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{M_r + M}{\Delta V} \quad (2.6)$$

Donde  $M_r$  y  $M_q$  son las masas del gas y de las partículas en el volumen.

La magnitud  $\rho$  es la densidad local, que tendría el medio durante una solución uniforme de partículas condensadas en ella.

La presión del medio continuo hipotético va a igualar con la presión en la fase gaseosa. Suponiendo que la temperatura de las partículas es igual a la temperatura de la fase gaseosa vamos a llegar a una magnitud determinada de la temperatura del medio examinado. Si la temperatura del gas sustancialmente se diferencia de la temperatura de las partículas, consideraremos en calidad de temperatura condicional del medio determinados de la igualdad de las energías internas de las unidades del volumen del medio continuo y de doble fase.

La constante de gas del medio condicional continuo lo determinaremos de tal manera que para el medio se cumpla la condición del estado del gas ideal. Con esta finalidad previamente transformaremos la ecuación 2.6.

Como las partículas condensadas debido a su alta densidad ocupan una parte pequeña del volumen gaseoso, la densidad del medio continuo hipotético puede ser expresado en la forma de la ecuación

$$\rho = \rho_r(1 + g_q) \quad (2.7)$$

donde  $g_q$  es el porcentaje de peso de las partículas en la mezcla de doble fase, o la relación de las masas de las partículas entre la masa por unidad de volumen.

Suponiendo que la fase gaseosa es un gas ideal, tenemos

$$p = \rho_r R_r T_r = \rho_r R_r T$$

Donde:

**P** Presión de los productos de la combustión

**R<sub>r</sub>** Constante específica del gas

**T<sub>r</sub>** Temperatura en la cámara de combustión

**ρ<sub>r</sub>** Densidad de los gases en la cámara

De donde se deduce que

$$p = \rho \frac{R_r}{1 + g} T = \rho \frac{R_r}{1 + g} T \quad (2.8)$$

Suponiendo que la fase gaseosa es un gas ideal tenemos que la ecuación 2.8 se ve que el medio continuo modelo puede considerarse como gas ideal cuya constante de gas específica se expresa a través de la constante específica del gas R de la fase gaseosa a través de la relación

$$R = \frac{R_r}{1 + g} \quad (2.9)$$

De esta manera introduciendo hasta cierto punto algunos conceptos condicionales de la densidad de la temperatura y de la constante específica del gas y del medio modelo se consigue igualarlo con un gas ideal.

Simultáneamente para el medio continuo condicionado adoptado puede ser utilizando la expresión conocida para el caudal o gasto a través de la tobera

$$G_{kp} = \varphi_2 \Gamma(k) \frac{p F_{kp}}{\sqrt{RT}} \quad (2.10)$$

Donde: **G<sub>kp</sub>** Gasto o caudal a través de la tobera

**R** Constante específica del gas

**T<sub>r</sub>** Temperatura en la cámara de combustión

- k** Es el exponente isoentrópico
- F<sub>kp</sub>** Area de la sección crítica de la tobera
- φ<sub>2</sub>** Gradiente de Temperatura
- P** Presión de los productos de la combustión

La magnitud del exponente isoentrópico  $k$  en la ecuación 2.10 también es reducida; ella se calcula de tal manera que la presión y la densidad del medio continuo en la cámara (el volumen pre tobera) y en la sección crítica de la tobera se relaciona entre sí por una función isoentrópica.

Hablando rigurosamente la función para el caudal en la formula 2.10 es valida solamente durante un equilibrio dinámico de las partes en la sección crítica de las toberas. El retardo de las partículas condensadas y su influencia sobre el caudal puede ser tomada en cuenta mediante la variación del coeficiente del caudal y de gastos  $\phi_2$ , que aplicable al caso de la descarga del chorro del medio de doble espacio a través de la tobera puede tomar valores superiores.

Se debe especificar también el concepto de la velocidad del medio continuo modelo durante un desequilibrio dinámico de las fases. Con esta finalidad introduciremos la velocidad media condicional del medio continuo en la sección del canal “u” para el cual el caudal del medio a través de una sección dada es igual a la suma de los caudales básicos de las fases condensada y gaseosa. Escribiendo la última condición en la forma de la siguiente ecuación

$$P_v = \rho_r V_r + g_q V_q$$

Donde  $V_r$  y  $V_q$  son las velocidades medias masicas del gas y de las partículas en la sección dada.

De aquí se deduce la velocidad del medio condicional continuo

$$v = \frac{v_r + g_4 \bar{v}_4}{1 + g_4} \quad (2.11)$$

- Donde:
- V** Velocidad del medio condicional continuo
  - V<sub>r</sub>** Velocidad masica del gas
  - V<sub>q</sub>** Velocidad media masica de las partículas
  - g<sub>q</sub>** Es el porcentaje del peso de las partículas

Suponga más adelante, que la parte de la superficie de la carga se inflama instantáneamente después de alcanzar cierta temperatura crítica  $\theta_*$ . De esta manera se excluye del análisis los problemas complicados del mecanismo del encendido y ciertos aspectos que se desarrollo en el sub-capítulo 2.1. Para el cálculo de la temperatura de la superficie de la carga inflamada se debe conocer las magnitudes de los flujos térmicos ó caloríficos desde los productos de la combustión de la composición inflamatoria y de su mezcla con los productos de la combustión del combustible hacia la parte no inflamada de la carga. Los principales tipos de transferencia de calor a la superficie de la carga son la convección obligada, la radiación y la transferencia de calor por contacto durante la precipitación y la introducción de partículas al rojo vivo a la capa superficial.

Más adelante el flujo calorífico total desde los productos inflamados hacia la superficie del canal de la carga vamos a calcularlo en la forma de una función simplificada para el intercambio de calor por convección

$$q_k = \alpha_k (T - \theta_0) = b_k \frac{\eta}{l} (\text{Re})^m (T - \theta_0). \quad (2.12)$$



Resaltando justamente la forma por convección de transferencia del calor de esta manera consideramos determinante más aún que nosotros no podemos determinar de manera fundamentada aquella parte de la cantidad de calor que se transfiere a la carga mediante la irradiación y la precipitación de partículas condensadas sobre la superficie. Naturalmente, que el coeficiente de irradiación de calor  $\alpha_k$  puede sustancialmente superar el correspondiente valor para el flujo de convección propiamente dicho.

El coeficiente  $\alpha_k$  lo determinaremos de manera similar a la transferencia de calor por convección en un tubo largo o cuando recorre una placa plana. En el primer caso en calidad de medida característica “ $l$ ” es lógico utilizar el diámetro equivalente del canal “ $d$ ”, mientras que el número de Reynolds “ $Re$ ” lo determinará según la función

$$Re = \frac{vd\rho}{\mu}$$

Donde:  $\mu$  Es el coeficiente del gasto de la tobera

Como el canal de la carga del combustible sólido no se puede relacionar como algo muy largo y tomando en cuenta, que el calculo de los flujos caloríficos que debe realizar para las secciones que se encuentran próximos a la entrada tenemos que considerar la disminución del coeficiente  $d_k$  a lo largo del canal, aunque sea en base a los datos obtenidos para el intercambio de calor en los tubos, sin embargo se tiene que tomar en cuenta, ellos se relacionan al paso del flujo de un gas homogéneo. Como los productos de la combustión de la composición inflamatoria es una mezcla de doble fase mientras el flujo calorífico de combustión se considera como condicionado el efecto total de las diferentes formas de interacción térmica o calorífica entre los productos de la combustión y la carga entonces los coeficientes  $d_k$  deberán ser aumentados respectivamente.

Si el coeficiente  $d_k$  determina sobre la base de la teoría de una capa limite laminado que fluye en forma de capas, entonces en calidad de medidas características típicas  $l$  y la función 2.12 es conveniente utilizar a la distancia a lo

largo del cese del canal desde la entrada hasta la sección dada. Aunque este enfoque parecería artificial este permite, en cierta medida tomar en cuenta la variación de la estructura de la capa límite condicionado por efectos del soplado (ver fig. 2.7)

Si es que en calidad de longitud típica se utiliza la distancia desde el punto de formación de la capa límite hasta la sección dada, el coeficiente  $d_k$  naturalmente se considera constante. Una de las dificultades durante semejante determinación del coeficiente de variación de calor  $\alpha_k$  es aquella situación cuando “ $l$ ” tiende a cero el valor  $\alpha_k$  crece ilimitadamente, ya que el exponente  $m < 1$  ( $m \approx 0.8$ ).

Como se deduce de lo descrito, el coeficiente de irradiación de calor y por consiguiente, el flujo calorífico desde los productos de la composición inflamatoria hacia la superficie no inflamada del combustible sólido puede ser calculado solamente según funciones muy simplificadas y aproximadas lo que predetermina el carácter aproximado de la descripción matemática del proceso inflamatorio.

La siguiente principal suposición consiste en que los límites de los volúmenes ocupados por los productos homogéneos (los productos de la combustión del inflamador, los productos de la combustión del combustible y su mezcla, el aire en la cámara de combustión), suponemos que la densidad, la temperatura y las propiedades termodinámicas de los productos son iguales. Consideramos que los volúmenes, ocupados por los productos homogéneos, están separados uno con respecto a otros por las superficies de la  $vi$  dirección de contacto. Esta suposición refleja la esencia del principio de la promediación parcial por zonas.

La presión en la cámara de combustión la promediamos (iguales) en todo el volumen libre de la cámara de combustión. Esta suposición se fundamenta en que prácticamente para los Motores Cohete de Combustible Sólido de todos tamaños el tiempo de propagación de las perturbaciones por el volumen libre de la cámara es pequeño en comparación con el tiempo del proceso transito de la inflamación y

de entrada al régimen y la caídas de las presiones relacionadas con la variación de la velocidad del flujo a lo largo de la longitud del cañón y por las resistencias hidráulicas es relativamente pequeño.

Suponemos que cada uno de los productos de la combustión se encuentra en un estado de equilibrio químico y termodinámico y que el contacto y el desplazamiento de los productos de la combustión entre sí y también con los residuos de aire en la cámara de combustión no provocan la aparición de reacciones químicas. Consideramos que la temperatura de la cámara de los productos de la combustión de la composición inflamadora y del combustible que ingresan al volumen libre de la cámara es constante e igual a la temperatura de la combustión de las sustancias correspondientes a una presión constante. Los efectos de la combustión incompleta y de las pérdidas caloríficas se toman en cuenta en forma de una reducción artificial de la temperatura de la combustión mediante la multiplicación por el coeficiente constante de pérdidas caloríficas ó térmicas. Despreciamos la variación del volumen libre de la cámara y de la superficie total que arde después de su inflamación debido a que el proceso estudiado es de muy corta duración en comparación con el tiempo total de trabajo del motor.

El proceso de descarga de los productos que se encuentran en la cámara a través de la tobera lo consideramos súper crítico y casi estacionario. Suponemos, que la descarga comienza después de la abertura instantánea del tapón que tiene lugar cuando se alcanza la presión crítica en la cámara de combustión. La variación del coeficiente del caudal o de gasto de la tobera en el tiempo lo va a despreciar. Las simplificaciones descritas aunque contiene en ciertas medidas elementos de un enfoque intuitivo, caracterizan en su totalidad la esencia de las simplificaciones, introducidas con la finalidad de construir un modelo matemático relativamente simple del proceso de inflamación. Con esto sin embargo no desaparecen todas las suposiciones bases de las cuales contienen un carácter más parcial lo vamos a hablar directamente en el transcurso de la reducción de las relaciones que buscamos.

## CAPITULO III

### OPTIMIZACION DE LA DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DEL PROCESO DE INFLAMACIÓN Y DE ENTRADA AL REGIMEN ESTACIONARIO DEL MOTOR.

Fundamentándonos en los principios arriba descritos y en las suposiciones obtenemos las relaciones matemáticas generales que describen el conjunto de los procesos que se producen en la cámara del motor en el periodo de inflamación [1]

En el periodo de inflamación en la cámara del motor se encuentran diferentes productos heterogéneos:

- Los productos de la combustión de la composición inflamatoria,
- Los productos de la combustión del combustible y del aire
- También la mezcla de los productos de la combustión.

De acuerdo con el principio adoptado de promediación por zonas van a dividir el volumen libre de la cámara en N elementos en cada uno de los cuales se encuentran productos homogéneos, suponemos que el elemento individual esta separado del vecino por la vi dirección de contacto.

En el transcurso de la descripción siguiente las ecuaciones de la balística interna del periodo inflamatorio lo vamos a dividir de acuerdo a la ley fisica o proceso fisico al cual pertenece y que representa dicha ecuación.

#### 3.1 ECUACIÓN DE LA LEY DE CONSERVACIÓN DE LA MASA DE LOS PRODUCTOS DE LA ECUACIÓN LIBRE DE LA CÁMARA

Las condiciones de conservación de la masa de los productos en cada uno de los elementos con un volumen  $V_i$  se puede escribir en forma de un sistema de N ecuaciones.

$$\frac{d}{dt}(\rho_i V_i) = Q_{Bi} + Q_{Ti} - G_i \quad (3.1)$$

$(i = 1, 2, \dots, n),$

Donde  $Q_{Bi}$  ,  $Q_{Ti}$  - Es el ingreso masico de los productos de la combustión de la composición inflamatoria y del combustible en el volumen libre  $V_i$ ;

$G_i$  -Es el caudal o gasto masico de los productos desde el volumen libre del elemento debido a la descarga (generalmente la descarga tiene lugar solamente para el elemento N para los demás  $G_i$  es = 0)

En la practica de los cálculos de ingeniería he adoptado el reemplazo del sistema de N ecuaciones del tipo 3.1 empleando una ecuación genérica de conservación de la masa que se puede obtener mediante la suma de las ecuaciones parciales. Sumando las partes de la derecha y de la izquierda de las ecuaciones 3.1 obtenemos

$$\frac{d}{dt} \sum_{i=1}^n \rho_i V_i = \sum_{i=1}^n Q_{Bi} + \sum_{i=1}^n Q_{Ti} - \sum_{i=1}^n G_i = Q_B + Q_T - G_{kp} \quad (3.2)$$

Introduciremos la densidad promedio de la combustión “ $\rho$ ” en todo el volumen de la cámara, determinado por la relación

$$\rho = \frac{1}{V_k} \sum_{i=1}^n \rho_i V_i \quad (3.3)$$

Despreciando la variación del volumen libre  $V_k$  en el tiempo obtenemos la ecuación de conservación de la masa de los productos en el volumen libre de las cámaras,

$$\boxed{V_k \frac{d\rho}{dt} = Q_B + Q_T - G_{kp}} \quad (3.4)$$

### 3.2 ECUACIÓN DE LA LEY DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA DE LOS PRODUCTOS QUE LLENAN O CUBREN EL VOLUMEN LIBRE DE LA CÁMARA

La condición de la conservación de la energía en cualquier zona “i” lo vamos a representar de la siguiente forma

$$\frac{d}{dt}(c_{vi}\rho_i V_i T_i) + A p_i \frac{dV_i}{dt} = Q_{Bi} c_{PB} x T_{rB} + Q_{Ti} c_{pT} x T_{rT} - G_i c_{pi} T_i = 0;$$

$$(i = 1, 2, \dots, n). \quad (3.5)$$

Donde:  $V_i$  Volumen libre

$Q_{Bi}$  Es el ingreso masico de los productos de la combustión del compuesto inflamador

$Q_{Ti}$  Es el ingreso masico de los productos de la combustión en el volumen libre

$G_i$  Es el caudal o gasto masico de los productos del volumen libre

Suponiendo que cada uno de los productos gaseosos que se encuentran en los volúmenes separados  $V_i$  incluyendo a las mezclas de doble fase se pueden aplicar a la ecuación del estado del gas ideal  $p_i = \rho_i R_i T_i$  y utilizando la relación de Mayer  $C_{pi} - C_{vi} = AR_i$  transformaremos la ecuación 3.5 de la siguiente manera.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{p_i V_i}{k_i - 1} \right) + p \frac{dV_i}{dt} = \frac{k_B}{k - 1} Q_{Bi} x R_{rB} T_{rB} + \frac{k_T}{k_T - 1} Q_{Ti} x R_{rT} T_{rT} - \frac{k_i}{k_i - 1} G_i R_i T_i$$

$$(i = 1, 2, \dots, n). \quad (3.6)$$

Vamos a obtener el reemplazo del sistema de “n” ecuaciones, una ecuación general reducida de conservación de la energía. Sumando las partes de la izquierda y de la derecha de la ecuación 3.6, utilizando la condición de que es

constante la presión, el volumen libre y considerando que la diferencial respecto al tiempo de la suma de  $i = 1$  hasta  $n$  de los volúmenes

$$\frac{d}{dt} \sum_{i=1}^n V_i = dV_k / dt \approx 0,$$

(se puede decir que es igual a cero el trabajo de expansión cuando se aumenta el trabajo libre de la cámara) obtenemos

$$\frac{d}{dt} \left( p \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{k_i - 1} \right) = \frac{k_B}{k_B - 1} Q_B X R_B T_{r,B} + \frac{k_T}{k_T - 1} Q_T X R_T T_{r,T} - \frac{k}{k - 1} G_{kp} R_c T_c \quad (3.7)$$

Introduciremos el exponente y su isoentrópico  $k$  promedio en todo el volumen y que se determina según la igualdad

$$k = 1 + \frac{V_k}{\sum_{i=1}^n \frac{V_i}{k_i - 1}} \quad (3.8)$$

Considerando la igualdad 3.8 la ecuación de la energía para las magnitudes promedios en todo el volumen de la cámara la vamos a representar en la forma

$$V_k \frac{d}{dt} \left( \frac{p}{k - 1} \right) = \frac{k_B}{k_B - 1} Q_B X R_B T_{r,B} + \frac{k_T}{k_T - 1} Q_T X R_T T_{r,T} - \frac{k_c}{k_c - 1} G_{kp} R_c T_c \quad (3.9)$$

### 3.3 ECUACIONES DE INGRESO DE PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN DESDE LOS INFLAMADORES

El ingreso masico de los productos de la combustión de la composición inflamatoria al volumen libre de la cámara del motor puede ser expresado de manera simple por la función

$$Q_B = \rho_B S_B u_B \quad (3.10)$$

Esta función es válida, cuando la composición inflamatoria arde directamente en el volumen libre de la cámara. Si es que la composición inflamatoria se encuentra y arde en un cuerpo no destructible aislado, desde el cual los productos de la combustión salen a la cámara del motor, entonces la fórmula 3.10 también es válida bajo la condición de la igualdad del ingreso y del caudal de los productos de la combustión en el cuerpo del inflamador. En este último caso la combustión de la composición inflamatoria se produce a una presión  $p_B$ , que es diferente a la presión  $p$  en la cámara del motor y entre las funciones que describen el proceso se deben incluir relaciones adicionales, que expresen la condición de igualdad del ingreso y del caudal o gasto de los productos de la combustión en el cuerpo del inflamador:

$$\rho_B S_B u_B = A_B p_B F_B, \quad (3.11)$$

donde el coeficiente de descarga  $A_B$  de los productos de la combustión a través de los orificios de gasto con un área  $F_B$  se determina por las relaciones conocidas para el régimen súper crítico y sub crítico de descarga:

$$A_B = \varphi_2 \sqrt{K_B} \left( \frac{2}{k_B - 1} \right)^{\frac{K_B + 1}{2(K_B - 1)}} \frac{1}{\sqrt{X_B R_B T_B}} \quad \text{cuando} \quad \frac{p}{p_B} \leq \left( \frac{2}{k_B + 1} \right)^{\left( \frac{k_B}{k_B - 1} \right)};$$

$$A_B = \varphi_2 \sqrt{K_B} \sqrt{\frac{2}{X_B R_B T_{r.B}} \left[ \left( \frac{p}{p_B} \right)^{\frac{2}{K_B}} - \left( \frac{p}{p_B} \right)^{\frac{K_B + 1}{K_B}} \right]} \quad \text{cuando} \quad \frac{p}{p_B} > \left( \frac{2}{k_B + 1} \right)^{\frac{k_B}{k_B - 1}}$$

La función de variación de superficie de combustión  $S_B$  de la composición inflamatoria en el tiempo depende de la forma del grano en particular si es que la composición está compuesta de granos iguales que tienen la forma de un cubo o



una esfera, entonces como se deduce de las relaciones geométricas y masicas simples:

$$S_B = S_{B.H} \left( 1 - \frac{e_B}{e_{B.H}} \right)^2 = S_{B.H} (1 - z)^2;$$

$$\rho_B S_B = \frac{3\omega_{B.H}}{e_{B.H}} \left( 1 - \frac{e_B}{e_{B.H}} \right)^2 = \frac{3\omega_{B.H}}{e_{B.H}} (1 - z)^2; \quad (3.12)$$

donde:  $e_B$ ,  $e_{B.H}$  -son los espesores actual e inicial de la bóveda que se quema de la composición inflamatoria respectivamente;

$\omega_{B.H}$  -es la masa inicial de la composición inflamatoria

La variación del espesor relativo  $z$  de la bóveda que se quema del grano de la composición inflamatoria en el tiempo se produce de acuerdo con la ecuación,

$$\frac{dz}{dt} = \frac{u_B}{e_{B.H}} \quad (3.13)$$

Donde:  $u_B$  - Es la velocidad de la combustión

Para reflejar el hecho en una gradualidad del encendido de la composición inflamatoria en la ultima ecuación se puede artificialmente introducir un multiplicador especial y presentar esta ecuación en la forma:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{u_B}{e_{B.H}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{t_{\pi i}}\right) \right] \quad (3.14)$$

Donde  $t_{\pi i}$  .es el tiempo característico de propagación de la llama por la superficie de la composición inflamatoria.

Las relaciones arriba mostradas debemos relacionarla a la función de la velocidad de la combustión de la composición inflamatoria respecto a la presión. Para la

función exponencial de combustión que más ampliamente se utiliza esta función tiene la forma:

$$u_B = u_{1B} \left( \frac{p_B}{p_{aTM}} \right)^{V_B} \quad (3.15)$$

Más flexible para la aproximación de los datos experimentales de la función analítica es la función generalizada de la combustión de la forma:

$$u_B = u_{1B} \frac{p_B}{p_{aTM}} \frac{1}{1 + u_{2B} (p_B / p_{aTM})^n} \quad (3.16)$$

El conjunto de las relaciones presentadas desde el 3.10 hasta el 3.16 puede ser utilizado para la descripción matemática del ingreso de los productos de la combustión del inflamador.

### 3.4 ECUACIONES QUE DESCRIBEN EL INGRESO DE LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN DESDE LA CARGA DE COMBUSTIBLE SÓLIDO

El ingreso de los productos de la combustión condicionados por la combustión de la carga del combustible sólido, se expresa por la masa de los productos que ingresan al volumen libre de la cámara del motor en una unidad de tiempo y puede ser presentada en la forma:

$$Q_r = \rho_T S_T(t) u_T l(t_r), \quad (3.17)$$

donde  $S_T$  - es la magnitud actual de la superficie de la carga que esta incluida en la carga de la combustión.

$$l(t_r) = \begin{cases} 1 & \text{cuando } t \geq t_r \\ 0 & \text{cuando } t < t_r \end{cases} \quad \text{- función unitaria}$$

$t_T$  - es el momento de la inflamación de la carga.

A pesar de la sencillez de la función 3.17 su utilización práctica tiene una serie de dificultades considerables.

La determinación del momento  $t_T$  es difícil debido a la indeterminación del criterio de encendido y de la complejidad del cálculo del régimen técnico de la carga en el periodo de inflamación. Debido a estas dificultades el tiempo de retardo de la inflamación  $t_T$  debemos determinar partiendo de un planteamiento muy significativo del problema.

La determinación de la función de la magnitud de la superficie que se quema  $S_T$  respecto al tiempo es un problema individual de alta dificultad, ya que la velocidad de propagación del frente de llama por la superficie de la carga para el nivel actual de conocimiento de la naturaleza de la inflamación de los combustibles sólidos y de los procesos termo gasodinámicos, que se producen en el motor en el periodo inicial de su trabajo, puede ser calculada teóricamente muy aproximadamente. Anotaremos, que justamente la complejidad de la construcción o elaboración de la función  $S_T(t)$  obliga el uso de ciertos casos de simplificaciones sobre la instantaneidad de la inflamación de toda la superficie de la carga.

La velocidad de combustión del combustible  $u_B$ , como ya se señaló, deberá determinarse hablando rigurosamente tomando en cuenta los efectos no estacionarios, sobre todo en la fase inicial del proceso de inflamación de la carga. Sin embargo aquí debemos señalar, que debido a la insuficiencia de la teoría desarrollada de la combustión no estacionaria debemos basarnos en funciones simples de la velocidad de la combustión respecto a la presión.

Las dificultades señaladas conllevan a la necesidad de separar los problemas sobre la determinación del tiempo de retardo de la inflamación  $t_T$  y relacionar las funciones de la superficie inflamada respecto al tiempo  $S_T(t)$  a la categoría de difíciles o especial. Por esta razón vamos a limitarnos a las observaciones generales hechas y los métodos simplificados de solución de estos problemas los

vamos a analizar mas adelante durante, el transcurso de descripción de los métodos de ingeniería de cálculo del proceso de inflamación.

La expresión para la velocidad de la combustión del combustible lo vamos a considerar en forma de funciones conocidas de la teoría estacionaria, construidas sin considerar el efecto de la combustión turbulenta

$$\left. \begin{aligned} u_T &= u_{1T} (p/p_{aTM})^{V_T} \quad \text{Función exponencial} \\ u_t &= \frac{u_{1t} (p/p_{aTM})}{1 + u_{2t} (p/p_{aTM})^{V_T}} \quad \text{Función generalizada} \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

### 3.5 ECUACION DEL GASTO DEL CAUDAL DE LOS PRODUCTOS DESCARGADOS DE LA CAMARA

Mas adelante vamos a utilizar la suposición que el régimen de descarga de los productos, que se encuentran en la cámara del motor, a través de la tobera durante todo el periodo de inflamación es casi estacionario y súper critico. Correspondientemente a la expresión para el gasto o caudal masico de los productos de descarga tiene la forma:

$$G_{KP} = \varphi_2 \sqrt{k_c} \left( \frac{2}{k_c + 1} \right)^{\frac{k_c + 1}{2(k_c - 1)}} \frac{p F_{kp}}{\sqrt{R_c T_c}} 1(p_3) \quad (3.19)$$

La función unitaria  $1(p_3)$  es igual a 1 cuando  $t \geq t_c$  y es igual a 0 cuando  $t \leq t_c$ , esta función unitaria se introduce con la finalidad de reflejar aquella situación, de que la descarga a través de la tobera comience en el momento  $t_c$ , cuando se rompe el tapón, que inicialmente cerraba la tobera. La condición de rotura del tapón vamos a considerar cuando se alcanza la magnitud crítica de la presión  $p_3$  en la cámara del motor, que se determina con cálculos o experimentalmente.

### 3.6 ECUACIÓN DEL ESTADO

Partiendo de la división del volumen de la carga en  $n$  elementos, en cada uno de los cuales se encuentra un producto homogéneo en composición, vamos a suponer, que a cada uno de estos productos en el volumen elemental se aplica la ecuación del estado del gas ideal en la forma:

$$p_i = \rho_i R_i T_i \quad (3.20)$$

De la ecuación 3.20 se deduce, que

$$\sum_{i=1}^n p_i V_i = \sum_{i=1}^n \rho_i R_i T_i V_i$$

suponiendo que la presión es igual en todo el volumen libre  $V_K$  obtenemos

$$p V_K = \sum_{i=1}^n \rho_i R_i T_i V_i \quad (3.21)$$

Vamos a determinar la magnitud media de  $RT$  en todo el volumen libre  $V_K$  de la relación

$$RT = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i R_i T_i V_i}{\sum_{i=1}^n \rho_i V_i} = \frac{V_K}{\sum_{i=1}^n \frac{V_i}{R_i T_i}} \quad (3.22)$$

(la segunda igualdad se deduce de la primera debido a que  $p_i = \rho_i R_i T_i$  y  $p_i = p$ ). Entonces de las relaciones 3.22 y 3.23 que determinan la densidad media o promedio  $\rho$  en el volumen  $V_K$  obtenemos la ecuación del estado para las magnitudes promediadas

$$p = \rho RT \quad (3.23)$$

Vamos a reducir las relaciones obtenidas en un sistema único de ecuaciones. En una forma generalizada este sistema puede ser presentado por relaciones, en las cuales las particularidades individuales de los diferentes tipos de los motores, de las cargas y de los dispositivos inflamadores van a realizar solamente que halla una pequeña distorsión. Al final obtenemos el siguiente sistema de ecuación, que describe la variación de las magnitudes medias o promedios de la presión de la densidad y de la temperatura y de otros parámetros físicos durante el periodo de inflamación en el volumen libre de la cámara de combustión

$$\begin{aligned}
 1.- & V_k \frac{d\rho}{dt} = Q_B + Q_T - G_{kp} \\
 2.- & V_k \frac{d}{dt} \left( \frac{p}{k-1} \right) = \frac{k_B}{k_B-1} Q_B X R_B T_{r.B} + \frac{k_T}{k_T-1} Q_T X R_r T_{r.T} - \frac{k_c}{k_c-1} G_{kp} R_c T_c \\
 3.- & p = \rho R T \\
 4.- & Q_B = \rho_B S_B u_B \\
 5.- & Q_T = \rho_T S_T(t) u_T 1(t_T) \\
 6.- & G_{KP} = \varphi_2 \Gamma \frac{p F_{kp}}{\sqrt{R_c T_c}} 1(p_3) \\
 7.- & u_B = u_B(p_B) = u_{1B} \left( \frac{p_B}{p_{aTM}} \right)^{V_B} \\
 8.- & u_T = u_T(p) = u_{1T} (p/p_{aTM})^{V_T} \\
 9.- & k = 1 + \frac{V_k}{\sum_{i=1}^n \frac{V_i}{k_i - 1}}
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

La descripción matemática del proceso de inflamación con ayuda del sistema (3.24) debido a su formula muy generalizada no refleja, naturalmente, las particularidades individuales del proceso, pre determinadas por las condiciones de un motor específico, correspondientemente este propio sistema de ecuaciones en un caso general es abierto.

Efectivamente, el sistema mostrado de ecuaciones refleja la interacción entre el conjunto de variables  $p$ ,  $\rho$ ,  $RT$ ,  $k$ ,  $Q_T$ ,  $Q_B$ ,  $G_{Kp}$ ,  $u_B$ ,  $u_T$ , y las demás variables, como son  $S_B$ ,  $S_T$ ,  $k_c$ ,  $R_c$ ,  $T_c$ ,  $p_B$ ,  $V_i$ , deberán estar relacionados con las relaciones adicionales primeras y se suponen conocidas en función del tiempo. De esta manera, el empleo del sistema 3.24 para el cálculo del proceso de inflamación y de entrada del motor al régimen en cada caso específico requiere la introducción de relaciones adicionales, que reflejen las particularidades específicas de la construcción examinada, del cuadro físico de los procesos y del método adoptado de división en volúmenes físicos o característicos, que contienen productos homogéneos. Los métodos de construcción del sistema cerrado de ecuaciones para el cálculo de proceso de inflamación se analizan más adelante aplicable a las configuraciones características de las plantas motrices o de poder y de los dispositivos inflamadores.

### **3.7 METODO DE INGENIERIA PARA EL CALCULO DE INFLAMACIÓN EN EL MOTOR POR UNA CARGA QUE ARDE DESDE EL CANAL Y CON UN INFLAMADOR EN LA PARTE DE LA CABEZA**

Examinaremos la configuración del motor equipado con una carga de un solo canal o de varios canales con un dispositivo inflamador ubicado del fondo delantero ver fig. 2.2

Antes de pasar a elaborar el sistema de ecuaciones para el cálculo del periodo inflamatorio, nos detendremos en forma corta sobre las particularidades del desarrollo del proceso de inflamación en un motor similar. Para este fin examinaremos la curva de la presión en la parte inicial de trabajo del motor resaltando los momentos más característicos Fig. 3.1

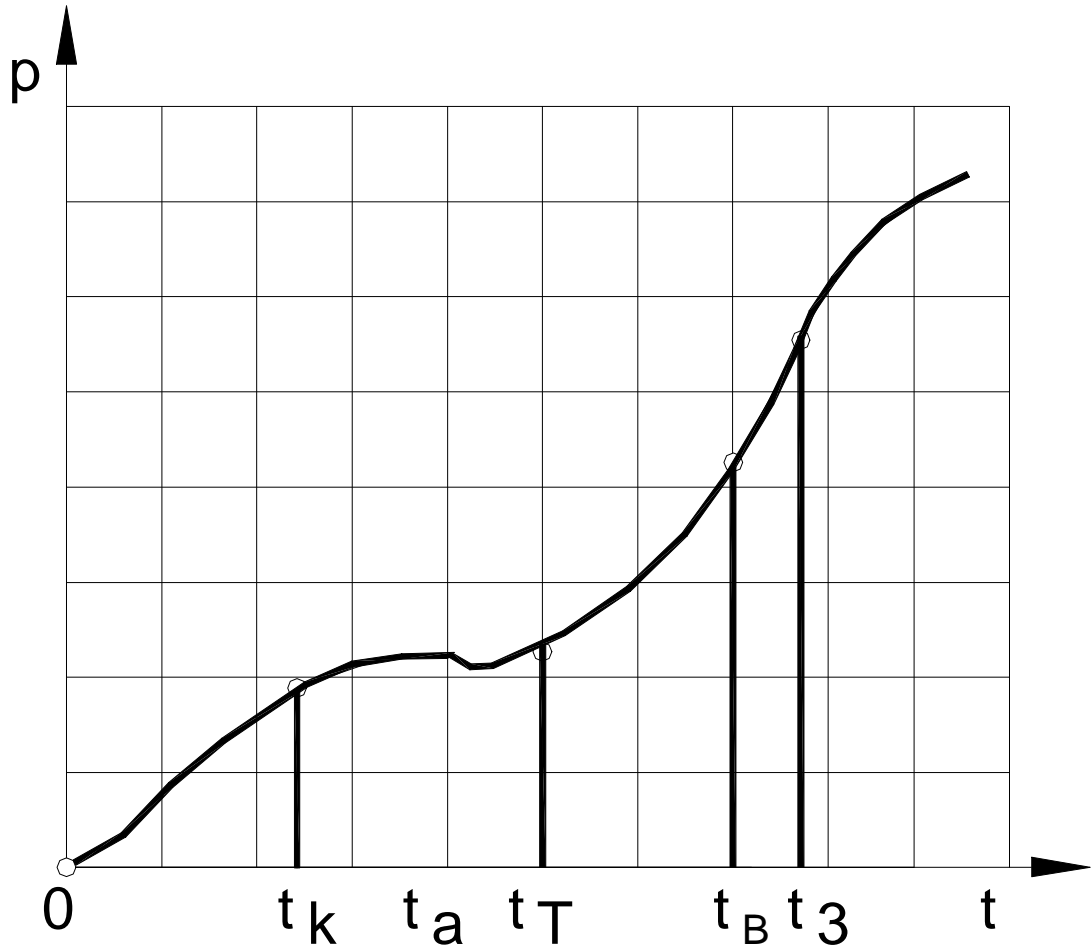


Figura 3.1 CURVA DE LA PRESIÓN EN LA PARTE INICIAL DE TRABAJO DEL MOTOR



El momento  $t = 0$  corresponde al inicio de ingreso de los productos de la combustión de la composición inflamadora al volumen libre de la cámara de combustión.

Desde el momento  $t = 0$  hasta el momento  $t = t_K$  se produce el llenado de la cámara por productos de la combustión del inflamador y la compresión del aire.

En el momento  $t = t_K$  para una presión igual  $p = p_3$  se rompe el tapón que cerraba la tobera y comienza la descarga del aire, que continua hasta el momento  $t = t_a$ .

En este momento de la cámara se bota todo el aire y comienza la descarga de los productos de la combustión del inflamador hacia la atmósfera.

El momento  $t = t_T$  le corresponde al inicio de inflamación de la carga, generalmente desde este momento se observa el aumento de la curvatura de crecimiento de la curva de la presión.

En el periodo desde  $t = t_T$  hasta  $t = t_B$  tiene lugar el empuje o botado desde la cámara de los productos de la combustión del compuesto inflamador, que se encontraba en la cámara en el momento  $t = t_T$ , cuanto  $t > t_B$  de la cámara comienza a descargarse la mezcla de los productos de la combustión del inflamador y del combustible.

El momento  $t_3$  le corresponde a la propagación del frente de llama en toda la superficie de la carga, ósea a la inflamación total, después del cual se produce el llenado de la cámara por los productos de la combustión del combustible y entrada del motor al régimen.

Obtendremos aplicable a la configuración examinada el conjunto de ecuaciones diferenciales y algebraicas, con cuyas soluciones numéricas o analíticas pueden ser halladas las funciones que buscamos respecto al tiempo de las magnitudes físicas, que caracterizan el proceso dentro de la cámara.

En calidad de sistema base de ecuaciones en cuya fundamentación se construye la metodología de calculo, adoptaremos el sistema de calculo 3.24. Añadiremos y transformaremos esta ecuación aplicable al problema examinado, formando un sistema cerrado relativamente simple.

Siguiendo la idea general del principio de la promediación parcial de las magnitudes físicas por los volúmenes de las zonas características, dividiremos el volumen libre de la cámara en tres volúmenes individuales Fig. 3.2

Adoptando esta configuración nosotros partimos del modelo físico antes descrito del proceso, de acuerdo al cual, de la cámara de combustión al inicio se bota aire y luego, los productos de la combustión de la composición inflamadora que se forma antes de la inflamación de la carga, y más adelante la mezcla de los productos de la combustión de la composición inflamadora y de la carga. En un caso general existen todos esos tres volúmenes; en determinados periodos del proceso uno u otro de estos volúmenes pueden no existir.

Obtendremos las expresiones para determinar los volúmenes libres de  $V_a$ ,  $V_B$  y  $V_{cM}$ . el valor del volumen libre  $V_a$ , ocupado por el aire se expresa por la función

$$V_a = \left(\frac{P_H}{P_a}\right)^{\frac{1}{K_a}} \left( V_k - \frac{1}{\rho_{aH}} \int_{t_k}^t G_{kp} dt \right) [1 - l(t_a)] \quad (3.25)$$

que se deduce de la condición de conservación de la masa del aire en la cámara y la suposición que el proceso de compresión del aire es isoentrópico debido al cual la ecuación

$$\rho_a = \rho_{aH} \left(\frac{p}{p_H}\right)^{\frac{1}{K_a}}$$

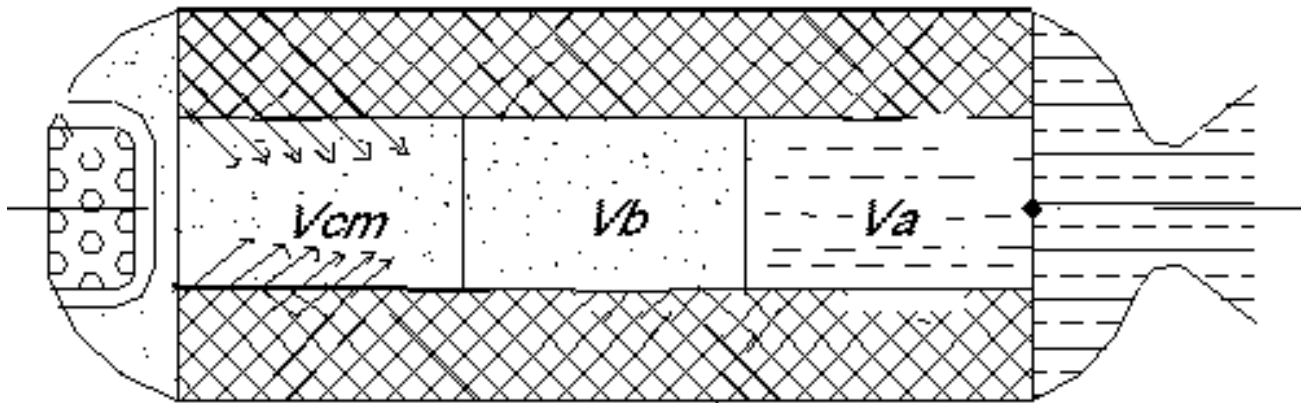


Figura 3.2 VOLUMEN LIBRE DE LA CÁMARA DIVIDIDO EN VOLÚMENES INDIVIDUALES

- a) VOLUMEN  $V_a$ .- ocupado por el aire atmosférico que se bota de la cámara
- b) VOLUMEN  $V_b$ .- ocupado por los productos de la combustión de la C.I.
- c) VOLUMEN  $V_{CM}$ .- ocupado por la mezcla de los productos de la combustión del inflamador y del combustible

La función unitaria  $1(t_a)$ , que fija la finalización de la descarga del aire se determina por la condición

$$1(t_a) = \begin{cases} 1..cuando...t \geq t_a \\ 0..cuando...t < t_a \end{cases} \quad (3.26)$$

El momento del tiempo  $t_a$  le corresponde al término de la descarga del aire se determina de la función

$$\int_{t_k}^{t_a} G_{kp} dt = \rho_{a.H} V_k \quad (3.27)$$

Más adelante determinaremos el valor del volumen libre, ocupado por los productos de la combustión de la composición inflamadora. Hasta el momento del tiempo  $t_T$ , que le corresponde al inicio de la inflamación del combustible, el volumen  $V_B$  se determina como la diferencia del volumen libre de la cámara  $V_K$  y del volumen libre  $V_a$ , ocupado por el aire.

Comenzando desde el momento  $t_T$ , a la cámara ingresan productos de la combustión del combustible, que (en la suposición, que al inicio se inflaman la parte de la carga en el fondo delantero) botan de la cámara los productos de la combustión de la composición inflamadora; en este periodo el volumen  $V_B$  se calcula como parcial de la división de la masa de los productos entre su densidad  $\rho_{r.B}$

$$V_B = (V_K - V_a)[1 - 1(t_T)] + \frac{1}{\rho_{r.B}} \left( \int_0^{t_T} Q_B dt - \int_{t_a}^t G_{kp} dt \right) 1(t_T)[1 - 1(t_B)] \quad (3.28)$$

Las funciones unitarias  $1(t_T)$  y  $1(t_B)$  que caracterizan el inicio de la inflamación de la carga y el término de descarga de los productos de la inflamación se determinan por las funciones

$$1(t_T) = \begin{cases} 1 & \text{cuando } t \geq t_T; \\ 0 & \text{cuando } t < t_T \end{cases} \quad 1(t_B) = \begin{cases} 1 & \text{cuando } t \geq t_B; \\ 0 & \text{cuando } t < t_B. \end{cases} \quad (3.29)$$

El momento  $t_B$  de finalización de descarga de los productos de la combustión de la composición inflamadora se determina por la fusión

$$\int_0^{t_T} Q_B dt = \int_{t_a}^{t_B} G_{kp} dt. \quad (3.30)$$

El volumen  $V_{CM}$  ocupada por la mezcla de los productos de la combustión del combustible y de la composición inflamadora se calcula según la formula ecuación 3.31

$$V_{CM} = V_k - V_a - V_B. \quad (3.31)$$

Pasamos mas adelante a determinar las características termodinámicas de los productos ocupados por los volúmenes libres  $V_a$   $V_B$   $V_{CM}$ .

Durante un enfoque riguroso las constantes termodinámicas  $C_p$ ,  $C_v$ ,  $k$ ,  $R$  de los productos deberán calcularse mediante el calculo termodinámico suponiendo el equilibrio y la temperatura de los productos se debe terminar partiendo de las relaciones diferenciales obtenidas mediante el empleo de la ley de la conservación de la energía a la masa de los productos que se encuentran en los volúmenes libres  $V_a$ ,  $V_B$  y  $V_{CM}$ .

Para excluir las dificultades del carácter matemático utilizaremos un enfoque aproximado que consiste en usar funciones mas aproximadas pero simples para describir las interacciones entre las características termo gasodinamicas de los productos.

Para el aire que ocupa el volumen  $V_a$ , suponiendo que el proceso de compresión es isentrópico durante su botado de la cámara obtenemos ecuación 3.32

$$(RT)_a = R_a T_{a.H} \left( \frac{P}{P_H} \right)^{\frac{ka-1}{ka}} \quad (3.32)$$

Respectivamente las constantes  $C_{pa}$ ,  $C_{va}$ ,  $k_a$ ,  $R_a$  del aire vamos a suponer que no varían en el tiempo.

Para los productos de la combustión de la composición inflamadora en el volumen  $V_B$  adoptaremos la ecuación 3.33

$$(RT)_B = x R_B T_{r.B.} \quad (3.33)$$

Respectivamente las constantes termodinámicas  $c_{pB}$ ,  $c_{vB}$ ,  $k_B$ ,  $R_B$  de los productos de la combustión de la composición inflamadora también vamos a suponer que no varían en el tiempo.

Un poco más complicado esta el hecho de que las características termo gasodinámicas de la mezcla de los productos de la combustión que llenan el volumen libre  $V_{CM}$  ya que inclusive en la suposición de una completa mezcla de los productos estas características se debe determinar partiendo de un sistema de ecuaciones que incluye ecuaciones diferenciales para determinar los porcentajes masicos  $g_B$  y  $g_T$  de los productos de la combustión de la composición inflamadora y del combustible en la mezcla.

Se puede suponer en forma menos rigurosa que un enfoque más simple de acuerdo al cual las magnitudes que se buscan se determinan de relaciones finales del tipo ecuación 3.34

$$\left. \begin{aligned} (RT)_{CM} &= g_B x R_B T_{r.B} + g_T x R_T T_{r.T}; \\ k_{CM} &= g_B k_B + g_T k_T; \\ g_B &= \frac{Q_B}{Q_B + Q_T}; g_T = \frac{Q_T}{Q_B + Q_T}. \end{aligned} \right\} \quad (3.34)$$

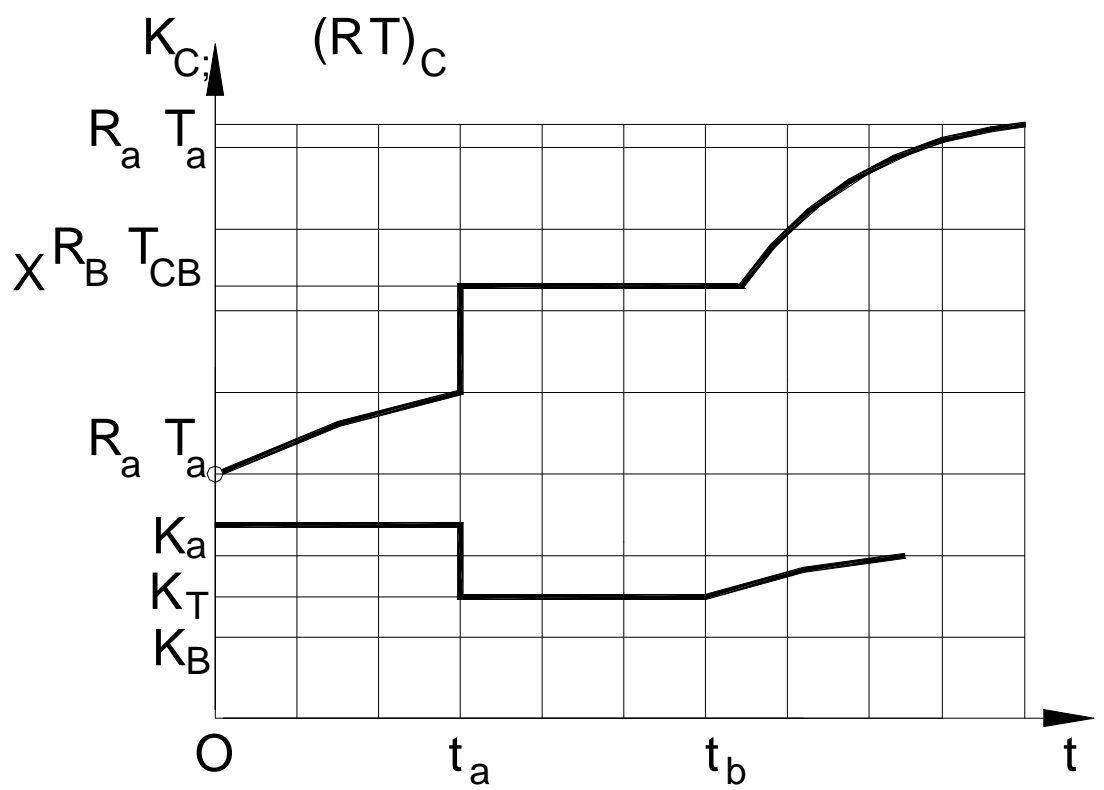


Figura 3.3 CURVA TÍPICA DE VARIACIÓN DE LA MAGNITUD  $(RT)_c$  y  $k_c$  EN EL TIEMPO

Para un enfoque aun más simple considerando que el porcentaje masico de los productos de la combustión del combustible tiende a 1, se puede considerar que  $g_T = 1$  y de esta manera obtenemos la ecuación

$$(RT)_{CM} = xR_t T_{r.T.}; k_{CM} = k_T \quad (3.35)$$

Pasaremos a elaborar o a construir las funciones para las características termo gasodinamicas de los productos que se descargan del motor. De acuerdo con el modelo físico del proceso y con las suposiciones físicas adoptadas

$$\left. \begin{aligned} (RT)_c &= R_a T_a; & k_c &= k_a \text{ cuando } t_k \leq t \leq t_a; \\ (RT)_c &= xR_B T_{r.B.} & k_c &= k_B \text{ cuando } t_a < t \leq t_B \\ (RT)_c &= (RT)_{CM}, & k_c &= k_{CM} \text{ cuando } t_B < t \end{aligned} \right\} \quad 3.3.6$$

Una curva típica de variación de la magnitud  $(RT)_c$  y  $k_c$  en el tiempo se muestra en la Fig. 3.3

La expresión 3.36 se puede generalizar, introduciendo funciones unitarias  $1(t_a)$ ,  $1(t_B)$  de las relaciones 3.26 y 3.29

$$\begin{aligned} (RT)_c &= (RT)_a [1 - 1(t_a)] + xR_B T_{r.B.} 1(t_a) [1 - 1(t_B)] + (RT)_{CM} 1(t_B); \\ k_c &= k_a [1 - 1(t_a)] + k_B 1(t_a) [1 - 1(t_B)] + k_{CM} 1(t_B) \end{aligned} \quad (3.37)$$

Pasaremos a examinar una de las preguntas mas complicadas la determinación de la función  $S_T(t)$  de la superficie que se inflama del combustible respecto al tiempo. Este problema se divide en dos:

- Primero la determinación del momento del tiempo  $t_T$  que corresponde al inicio de la inflamación de la carga (tiempo de retardo de la inflamación).
- Segundo la determinación del tipo de la función  $S_T(t)$ .



El tipo de retardo de la inflamación se debe determinar partiendo de un mecanismo determinado de inflamación y su correspondiente aparato matemático. En los límites del enfoque simplificado, utilizado al inicio de este sub capítulo, la expresión aproximada para el tiempo de retardo de la inflamación  $t_T$  lo obtenemos, considerando en calidad de condición de inflamación, que la temperatura de la superficie alcanza el valor  $\theta_0$  igual a la temperatura crítica  $\theta_*$

La variación de la temperatura de la superficie del combustible en el tiempo lo vamos a determinar mediante la solución de la ecuación de conductividad de calor no estacionaria para la carga del combustible sólido, examinado en forma de un cuerpo inerte homogéneo semi limitado con características termo físicas constantes.

Cuando el coeficiente de irradiación de calor  $\alpha$  es constante desde los productos de la combustión de la composición inflamadora hacia el combustible y una distribución uniforme en el periodo inicial la solución de la ecuación de la conductividad del calor, se caracteriza la distribución estacionaria de la temperatura en la profundidad de la carga, debe ser expresada por la función

$$\frac{\theta(y,t) - \theta_h}{T_{r.B} - \theta_h} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{y}{2\sqrt{x_{rt}}}\right) - \exp\left(\frac{X_r y}{\eta_r} + \frac{\alpha^2 x_{rt}}{\eta_r^2}\right) \left[ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{y}{2\sqrt{x_{rt}}} + \frac{\alpha}{\eta_r} \sqrt{x_{rt}}\right) \right] \quad (3.38)$$

Donde  $X_r = \frac{\eta_r}{C_T \rho_T}$  es la conductividad térmica del combustible.

$$1 - \operatorname{erf}z = \operatorname{erfc}z = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-u^2} du$$

la temperatura  $\theta_0$  de la superficie de la carga como se deduce (3.38) cuando  $y = 0$  se determina por la relación

$$\frac{\theta_0 - \theta_{0H}}{T_{r.B} - \theta_{0H}} = 1 = (1 - \text{erf}Ti) \exp Ti^2, \quad (3.39)$$

Donde  $Ti = \frac{a\sqrt{t}}{\sqrt{n_T c_T \rho_T}}$  es el criterio Tijonov.

Cuando  $Ti \ll 1$  la relación 3.39 se puede reemplazar por una función más simple

$$\frac{\theta_0 - \theta_{0H}}{T_{r.B} - \theta_{0H}} = \frac{2a}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{t}{c_T \rho_T n_T}}. \quad (3.40)$$

Como la condición de inflamación tiene la forma  $\theta_0 = \theta_*$  de las funciones 3.40 obtenemos la expresión para el tiempo de retardo de la inflamación que estábamos buscando:

$$t_T = \frac{\pi}{4} \frac{n_T c_T \rho_T}{a^2} \left( \frac{\theta_* - \theta_{0H}}{T_{r.B} - \theta_{0H}} \right)^2 \quad (3.41)$$

Para calcular  $t_T$  se necesita conocer la magnitud del coeficiente de irradiación de calor  $\alpha$ . En calidad de este último vamos a considerar el calor medio del coeficiente  $\alpha$  en el tiempo para la inflamación, que se encuentra en la entrada del canal. Expresando  $\alpha$  por una función que se deduce de la expresión 2.12 y considerando en calidad de medida típica o característica el diámetro  $d_0$  de canal después de ciertas transformaciones no complicadas obtenemos la ecuación

$$\alpha_{cp} = b_{ko} \frac{\eta_{r.B}}{d_0} \frac{1}{t} \int_0^t \left( \frac{\rho_o v_o d_o}{\mu_{r.B}} \right)^m dt = b_{ko} \frac{\eta_{r.B}}{d_o} \frac{1}{t} \int_0^t \left( \frac{Q_B d_o}{\mu_{r.B} F_O} \right)^m dt. \quad (3.42)$$

donde se ha utilizado la igualdad aproximada

$$Q_B = \rho_o F_o v_o$$

Colocando la expresión 3.42 el valor medio del coeficiente de irradiación de calor  $\alpha$ , obtenemos la ecuación para calcular el tiempo de retardo de la inflamación  $t_T$ :

$$\frac{\theta_0 - \theta_H}{T_{r.B} - \theta_H} = \frac{2b_{k0}\eta_{r.B}}{\sqrt{\pi d_0 t_T}} \sqrt{\frac{t_T}{c_T \rho_T n_T}} \int_0^{t_T} \left( \frac{Q_B d_o}{\mu_{r.B} F_O} \right)^m dt. \quad (3.43)$$

la parte de la izquierda de esta igualdad para las suposiciones adoptadas es constante.

El valor buscado  $t_T$  le corresponde al tiempo, durante el cual la parte derecha de la ecuación 3.43 llega a igualarse a la izquierda. Naturalmente, que para calcular el tiempo de retardo de la inflamación  $t_T$  se necesita conocer la variación en el tiempo del ingreso masico  $Q_B$  de los productos de la combustión de la composición inflamadora, ósea que la determinación de  $t_T$  sé efectúa en el transcurso del cálculo de todo el proceso. Si es que la magnitud  $Q_B$  en el periodo hasta la inflamación de la carga principal se puede considerar constante, entonces de la ecuación 3.43 obtenemos la expresión final para el tiempo  $t_T$ :

$$t_T = \frac{\pi \eta_T c_T \rho_T d_0^2}{4 b_{k0}^2 \eta_{r.B}^2} \left( \frac{F_0 \mu_{r.B}}{Q_B d_0} \right)^{2m} \left( \frac{\theta_* - \theta_H}{T_{r.B} - \theta_H} \right)^2 \quad (3.44)$$

El tiempo de retardo de la inflamación se determina aun más simple si en calidad de criterio de inflamación adoptamos la acumulación de la cantidad critica del calor  $W_*$  en él calculo en la unidad de área de la superficie de la carga. En este caso la condición de inflamación tiene la forma:

$$W_* = \int_0^{t_T} \alpha (T_{r.B} - \theta_o) dt,$$

De donde, colocando el valor  $\alpha$  y suponiendo que  $\theta_0 \approx \theta_H$ , vamos a llegar a la ecuación, de la cual se puede determinar la magnitud  $t_T$  :

$$W_* \cong \frac{b_{ko} \eta_{r,B}}{d_o} (T_{r,B} - \theta_H) \int_0^{t_T} \left( \frac{Q_B d_o}{\mu_{r,B} F_o} \right)^m dt. \quad (3.45)$$

Cuando la magnitud  $Q_B$  es constante de la ultima relación obtenemos una función clara para determinar el tiempo  $t_T$ :

$$t_T = \frac{W_* d_o}{b_{ko} \eta_{r,B} (T_{r,B} - \theta_H)} \left( \frac{F_o \mu_{r,B}}{Q_B d_o} \right)^m. \quad (3.46)$$

Pasaremos a la pregunta sobre el establecimiento de la forma de la función de la magnitud de la superficie inflamada de la carga respecto al tiempo  $S_T(t)$

Vamos a partir de la posición en el momento del tiempo  $t_T$  instantáneamente se inflama la superficie que arde  $S_D$ , indicada ante la sección de entrada al canal ( el extremo, la ranura, etc). Mas adelante el frente de la combustión se propaga por el canal con una velocidad  $v_\phi$  en el momento  $t_3$ , cuando el frente alcanza la presión de salida del canal instantáneamente se inflama la superficie de la carga ubicada después de la sección de salida del canal, ósea el extremo posterior y de esta manera se inflama toda la superficie de la conducción  $S_T = S_D + S_K + S_c$ . De acuerdo con el cuadro adoptado obtenemos la siguiente expresión para la función dictada  $S_T(t)$

$$S_T = \left( S + \int_{t_T}^t h v_\phi dt \right) l(t_T) [1 - l(t_3)] + S_3 l(t_3) \quad (3.47)$$

donde

$$l(t_3) = \begin{cases} 1..cuando..t \geq t_3 \\ 0..cuando..t < t_3 \end{cases}$$

El tiempo  $t_3$  se calcula de la función

$$\int_{t_T}^{t_3} v_{\phi} dt = 1 \quad (3.48)$$

para utilizar la función 3.48, se necesita conocer la función de variación en el tiempo de la velocidad  $v_{\phi}$  de propagación del frente de llama a lo largo de la longitud del canal. El enfoque general teórico para el caso de la velocidad  $v_{\phi}$  esta descrita, por ejemplo, en el trabajo [14]. Tomando en cuenta que los valores teóricos de  $v_{\phi}$  pueden ser hallados muy aproximadamente, para la práctica de ingeniería vamos a suponer que es conveniente utilizar la siguiente función simplificada de la magnitud de la superficie inflamada  $S_T$  respecto al tiempo,

$$S_T = S_3 \left( \frac{t - t_T}{t_3 - t_T} \right)^2 1(t_T) [1 - 1(t_3)] + S_3 1(t_3). \quad (3.49)$$

Para determinar el tiempo  $t_3$  debe utilizarse el enfoque que es aplicable para el calculo del tiempo  $t_T$ , se necesita solamente tomar en cuenta que el calentamiento de la superficie de la carga en la sección  $x = l$  comienza desde el momento del tiempo  $t_1$ , cuando desde el canal de la carga completamente se bota el aire.

Suponiendo que el caudal o gasto de los productos a través de sección de la salida del canal es igual al gasto a través de la tobera y basándonos en una función aproximada 3.43 vamos a llegar a la siguiente relación para determinar el tiempo  $t_3$ , que corresponde a la inflamación total de la carga:

$$\frac{\theta_* - \theta_H}{T_{r.B} - \theta_H} = \frac{2b_k \ln \eta_{r.B}}{\sqrt{\pi d_0 t_3}} \sqrt{c_T \rho_T \eta_T} \int_{t_1}^{t_3} \left( \frac{G_{kp} dt}{\mu_{r.B} F_l} \right)^m dt \quad (3.50)$$

Se tiene que tener en cuenta, que el coeficiente  $b_{kl}$  en la función 3.50 se diferencia del coeficiente  $b_{k0}$  en la función 3.43, ya que el primero caracteriza las condiciones de calentamiento en la salida, mientras que el segundo las caracteriza en la sección de entrada del canal; en un caso general  $b_{k0} > b_{kl}$ , lo que ya se hablo en el sub capitulo 2.3

La magnitud  $t_1$  se determina de la condición: cuando  $t = t_1$ ;  $V_a = V_c$ . Utilizando esta condición y la expresión 3.28, obtenemos la relación para determinar la magnitud  $a_1$  en la forma

$$\left[ \frac{P_H}{p(t_1)} \right]^{k_a} \left( V_K - \frac{1}{\rho_{a.H}} \int_{t_c}^{t_1} G_{kp} dt \right) = V_c \quad (3.51)$$

El empleo de las funciones 3.50 y 3.51 para determinar el tiempo  $t_3$  es difícil debido a que la magnitud  $G_{kp}$  depende  $t_3$ , por esta razón es más fácil calcular debido a que su primera aproximación calcular  $t_3$  en la suposición que  $S_T = 0$  y el calentamiento de las cargas se produce solamente cuando el producto de la combustión de la composición inflamatoria, mas adelante el valor de  $t_3$  se debe precisar mediante la consideración de los productos sobre el caudal  $G_{kp}$  y nuevamente sobre el calentamiento de la carga de los productos de la combustión de la parte inflamada de la carga, cuyo ingreso se determina en función a una primera aproximación.

Las funciones obtenidas 3.25, 3.28, 3.31, 3.34, 3.37, 3.43, 3.49 y 3.50 complementan al sistema general 3.24 de las situaciones del proceso de inflamación conjuntamente con el forman un conjunto cerrado de relaciones que permiten aproximadamente calcular la variación en el tiempo de las características principales de la balística interna del motor con un inflamador en la parte cabezal en el periodo de inflamación y de entrada al régimen estacionario del funcionamiento.

Las condiciones iniciales para integrar el sistema de ecuaciones en la suposición, que el motor al inicio se llena con aire a una presión atmosférica, pueden ser presentadas en la siguiente forma simple

$$p_H = p_{aTM}; \quad \rho_H = \rho_{aTM}, \text{ cuando } t = 0 \quad (3.52)$$

El método desarrollado de cálculo del proceso de inflamación del motor con un inflamador en la parte delantera cabezal, a parte de resolver el problema propuesto, caracteriza simultáneamente un enfoque general, en cuya base no es tan difícil construir métodos de ingeniería para el cálculo del periodo de inflamación en los motores con otras ubicaciones de leyes positivas de inflamación.

### **3.8 CALCULO DE LA MASA REQUERIDA Y DE LAS MEDIDAS INICIALES DE LOS GRANOS DE LA COMPOSICIÓN INFLAMATORIA**

En el proceso de diseño y de procesamiento de los sistemas inflamatorios para los Motores de Cohetes de Combustible Sólido se requiere determinar la masa y las medidas de los granos de la composición inflamatoria, que garanticen un funcionamiento seguro o confiable y normal del motor.

Para los motores pequeños este problema se resuelve experimentalmente mediante la realización de una serie de encendidos en base a cuyos resultados se elige la masa óptima de la composición inflamatoria. Este enfoque será difícil de utilizarse para los motores grandes debido a los artículos gaseosos y altos costos.

El problema sobre la determinación de la masa óptima  $\omega_{B.H}$  y de la medida inicial del grano de la composición inflamatoria  $e_{B.H}$  puede ser resuelto de la siguiente manera: Dando los diferentes valores de las magnitudes encontradas  $\omega_{B.H}$ ,  $e_{B.H}$  y realizando una serie de cálculos correspondientes de los parámetros del proceso de inflamación, durante la integración del sistema inicial de ecuaciones, escogimos aquellos valores de  $\omega_{B.H}$ ,  $e_{B.H}$ , que garanticen la obtención de las características temporales aceptables y de la curva de la presión en la parte inicial del trabajo del motor. Este enfoque se debe reconocer como el más fundamentado y generado, sin embargo este requiere cálculos complicados y dificulta el análisis general.

Por esta razón tiene mayor interés la obtención de funciones de cálculos simples para determinar el peso requerido y la medida del grano de la composición inflamatoria, aunque en forma de relaciones muy aproximadas son aplicables en un rango amplio de condiciones. Estas funciones permiten determinar la masa y las medidas del grano de la composición inflamatoria mediante cálculos, después del cual las características óptimas se precisan de manera experimental.

Vamos a referirnos a las concepciones principales las cuales se basan en un método de cálculo del peso requerido y de la medida del grano de la composición inflamatoria, es decir vamos a adoptar determinadas condiciones de óptimidad de las características desinflamadoras. Como se va a determinar dos magnitudes, entonces debemos formular dos condiciones:

- En calidad de primero de ellos adoptaremos la posición según el cual el peso mínimo de la composición inflamatoria deberá garantizarnos el inicio de la inflamación de la carga cuando se alcanza el máximo de la curva de la presión en la cámara de combustión del motor, generado por los productos de la combustión del inflamador. En este caso se alcanza tanto una inflamación estable como una suavidad de la curva de elevación de la presión en la etapa inicial (ver Fig. 3.4). (curva 1)
- Si la inflamación se produce para un valor del tiempo, sustancialmente menor al tiempo cuando se alcanza la máxima presión, entonces la curva de la presión va a tener un tipo (curva 2), si es que la inflamación se produce mucho más tarde entonces la entrada puede ser alargada y la inflamación va a ser inestable (curva 3). En este último caso, inclusive se producirá la inflamación de solo una dispersión considerada de los parámetros temporales de entrada del motor al régimen estacionario.

En condiciones cuando la inflamación de la carga se produce con el tapón cerrado el principio de selección óptima del peso de la composición inflamatoria se puede formular de otras formas:



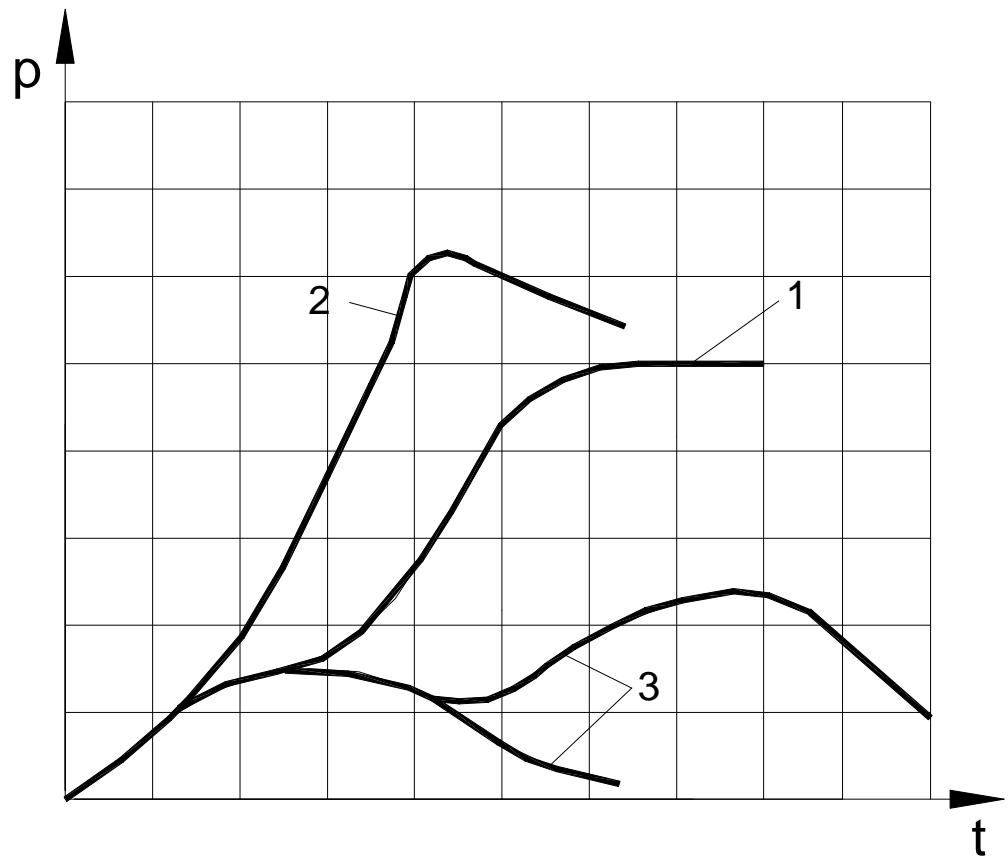


Figura 3.4 CURVA DE ELEVACIÓN DE LA PRESIÓN EN LA ETAPA INICIAL

- Al momento del inicio de la inflamación de la carga deberá arder determinándose el porcentaje de la masa inicial de la composición inflamatoria. En calidad de una condición adicional de la optimicidad del proceso puede ser adoptada la posición perimetral al régimen de calentamiento de la carga el cual deberá garantizar que se alcance simultáneamente la temperatura crítica de la inflamación sobre la superficie del combustible y la cantidad crítica de calor en la capa calentada.

La idea de esta condición consiste en idealizar una transfusión desde el régimen de calentamiento al régimen de combustión casi estacionaria y una red de reestructuración sustancial de la capa calentada.

- En calidad de la segunda condición se puede adoptar determinada magnitud de la presión de los productos de la combustión del inflamador  $P_{K.B}$  en la cámara, durante el cual comienza la inflamación de la carga.

Estos son los principales principios sobre los cuales se puede fundamentar la base de la deducción de funciones simples para el cálculo de la masa requerida y de la medida inicial de los granos de la composición inflamatoria, señalaremos uno de los caminos posibles para realizar este principio, de esta manera fundamentaremos las secuencias posibles para el cálculo de variación del peso y de las medidas iniciales de los granos de la composición inflamatoria, aplicable a las consideraciones típicas de los motores de cohetes (ver fig. 2.2)

Elegiremos la magnitud aproximada de la presión  $P_{K.B}$  en la cámara de combustión durante el cual comienza la inflamación del combustible sólido. Mas adelante tendremos dos pasos:

- La presión  $P_{K.B}$  es mayor a la presión  $P_3$ , durante el cual se abre el tapón, que inicialmente cierra la tobera del motor, ósea la inflamación se produce en una cámara abierta.
- La presión  $P_{K.B}$  es menor a la presión  $P_3$ , ósea la inflamación se produce en una cámara cerrada.

**Vamos a examinar el inicio del caso de la inflamación en una cámara abierta.**

- Conocida la magnitud de la presión  $P_{K.B}$  y partiendo de la posición mediante, el cual la inflamación comienza en el momento, que le corresponde cuando se alcanza el máximo de la curva de la presión en la cámara, creado por los productos de la combustión de la composición inflamatoria, ósea cuando se iguala el ingreso y el gasto de la cámara, expresaremos la magnitud  $Q_B$  del ingreso masico de los productos de la combustión de la composición inflamatoria por la función

$$Q_B = \varphi_2 \Gamma \frac{P_{K.B} F_{KP}}{\sqrt{R_B \chi T_{r.B}}} \quad (3.53)$$

Adoptando la magnitud del ingreso de gas en calidad de promedio para todo el periodo inicial de la combustión de la composición inflamatoria, vamos a determinar el retardo de la inflamación  $t_T$ , igual al tiempo, que se desarrolla desde el ingreso de los productos de la combustión de la composición inflamatoria a la cámara y hasta el inicio de inflamación del combustible sólido. La magnitud buscada  $t_T$  se determina según las funciones 3.44 y 3.46 para el motor cargado con una carga que arde desde el canal y según la función 3.52 para el motor cargado para una carga que arde desde el extremo en el cual la magnitud  $\rho_{cp}$  sea  $P_{K.B} / \chi R_B T_{r.B}$

Mas adelante seguir la función  $\omega_B = Q_B t_T$  (3.54).

Hallando la masa de la composición inflamatoria, que arde hasta el inicio de la inflamación de la carga. El peso de la masa buscada  $\omega_{B.H}$  deberá separar un poco la magnitud  $\omega_B$ , ya que al momento del inicio de la inflamación deberá crearse un ingreso de los productos de la combustión de la composición inflamatoria, aproximadamente igual a su gasto o caudal de la cámara. De aquí se deduce

$$\omega_{B.H} = \zeta \omega_B, \quad (3.55)$$

donde  $\zeta$  es mayor que 1,

El valor de  $\zeta$  debe ser adoptado de 1.2 a 1.3

El espesor de la bóveda que arde de la composición inflamatoria al momento del inicio de la inflamación hallándose la función

$$e_B = u_B t_T \cong u_{1B} \left( \frac{P_{K.B}}{P_{aTM}} \right)^{V_B} t_T. \quad (3.56)$$

El espesor inicial total de la bóveda  $e_{B.H}$  de la composición inflamatoria deberá superar a  $e_B$  ya que parte de la composición arde después del momento  $t_T$ . Para cálculos evaluativos se puede considerar que  $e_{B.H} \approx 1.5 e_B$  para lograrlo de una forma cúbica o esférica,  $e_{B.H} \approx 1.2 e_B$ , para los granos con una superficie de la combustión aproximadamente constante.

**Para el caso de la inflamación en una cámara cerrada es conveniente:**

- Al inicio obtendremos la magnitud del tiempo  $t_T$  retardo de la inflamación, colocando el valor de  $t_T$  de la formula 3.44 en 3.46 y resolviendo las relaciones obtenidas con respecto a  $Q_B$ , hallamos la magnitud media del ingreso del gas masico de los productos de la combustión de la composición inflamatoria para el motor equipado con un carga que arde desde el canal, mas adelante se determina la masa  $\omega_B$  de la composición inflamatoria que arde hasta el inicio de la inflamación de la carga:

$$\omega_B \cong Q_B t_T \quad (3.57)$$

Para el motor equipado con una carga que arde desde el extremo según la magnitud conocida  $t_T$  se determina el flujo calorífico térmico  $q_{cp}$  y luego se halla la densidad media  $\rho_{cp}$  de los productos de la combustión de la composición inflamatoria en la cámara, la magnitud de  $\omega_B$  se determina de una función simple

$$\omega_B \cong 2p_{cp} V_K \quad (3.58)$$

El peso total de  $\omega_{B,H}$  de la composición inflamatoria puede hallarse según la fórmula 3.55. Para calcular el espesor inicial  $e_{B,H}$  de la bóveda que arde se determina al inicio la presión  $p_{K,B}$ , durante el cual comienza la inflamación de la carga

$$p_{K,B} = \frac{\omega_B x R_{r,B} T_{r,B}}{V_K} \quad (3.59)$$

Más adelante hallamos el valor aproximado del espesor  $e_B$  de la bóveda, que arde al inicio de la inflamación de la carga, utilizando la función 3.56 observaremos, que del valor  $e_B$  en el caso examinado se determina considerablemente mayor, ya que la velocidad de la combustión  $u_B$  está calculado para el máximo valor de la presión en el momento del tiempo  $t_T$ , igual a  $P_{K,B}$ .

Por esta razón el valor del espesor inicial especial total de la bóveda  $e_{B,H}$  puede ser adoptado solamente un poco mayor al valor  $e_B$ , calculado según la fórmula 3.56

En conclusión otra vez podemos conocer, los métodos descritos de cálculo de la masa requerida y del espesor inicial de la bóveda que arde con la composición inflamatoria es simplemente evaluativo. Un cálculo más fundamental y más preciso o exacto requiere de uso de todo el conjunto de ecuaciones, que describen la dinámica del proceso de inflamación.

Utilizando la metodología arriba descrita, I.D. Skvartsov [2] halló las funciones para el cálculo de la masa de la composición inflamatoria de pólvora de humo y de la composición cuando está ubicado el dispositivo inflamador en el fondo delantero.

Para la composición inflamadora de pólvora de humo:

$$\omega_b = c_1 \bar{a}_{1b} \bar{a}_{1T} \frac{F_0 W_K^{0,3}}{\Pi_0^{0,2}} + c_2 \bar{a}_{2b} F_{kp} \quad (3.60)$$

donde  $C_1$  y  $C_2$  son coeficientes constantes ( $C_1 = 1,8 \cdot 10^{-4}$ ,  $C_2 = 0,45 \cdot 10^{-2}$ )

$\bar{a}_{1b}$ ,  $\bar{a}_{2b}$  son coeficientes que dependen de la marca de la pólvora de humo ver tabla N° 1

$F_0$  -es el área de la sección del canal de al carga

$\Pi_0$  -es el perímetro mojado de la sección del ducto de la carga

$W_K$  -es el volumen libre inicial del motor

$F_{kp}$  -es el área de la sección crítica de la tobera

TABLA N° 1

Valores de los Coeficientes  $\bar{a}_{1b}$ ,  $\bar{a}_{2b}$  para diferentes marcas de la Pólvora de Humo

Marca de la pólvora de humo	ИЗДР-1	ИЗДР-2	ДРП-1	ДРП-2	ДРП-3	ДРП-4
$\bar{a}_{1b}$	1,0	0,91	0,76	0,69	0,65	0,59
$\bar{a}_{2b}$	1,0	0,63	0,25	0,16	0,11	0,073

$a_{1T}$  - es el coeficiente que depende de la marca del combustible sólido el cual produce la carga.

Para los combustibles balísticos

$$a_{1T} = 0.74 \text{ hasta } 1.0$$

Para los combustibles híbridos

$$a_{1T} = 1.5 \text{ hasta } 2.0$$

Cuando se determine la masa de la composición inflamatoria las medidas geométricas se escogen en centímetros, mientras que las masas se pierden en kilogramos.

La formula para determinar la masa y el peso de inflamación de la composición inflamatoria se ve en la (formula 3.61)

$$\omega_b = c_{\pi} \bar{a}_{IT}^{-1.5} \frac{F_0 W_K^{0.6} e_{BH}^{0.2}}{\Pi^{0.55}} \quad (3.61)$$

- donde  $c_{\pi}$  es un coeficiente constante ( $c_{\pi} = 2.25 \times 10^{-4}$ )
- $e_{B.H}$  es la bóveda que arde inicial de la pastilla pirotécnica.
- $F_0$  es el área de la sección del canal de al carga
- $\Pi_0$  es el perímetro mojado de la sección del ducto de la carga
- $W_K$  es el volumen libre inicial del motor
- $F_{kp}$  es el área de la sección critica de la tobera

En la ultima formula los parámetros geométricos también se dan en cm y como resultados se obtienen Km. A diferencia de las formulas anteriormente desarrolladas empíricas o semi empíricas, para determinar el peso de la composición inflamatoria, estas dos formulas dan buenos resultados en un rango amplio de variación de los parámetros del motor de la carga y del combustible.

## CAPITULO IV

### CIERTOS RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES

#### 4.1 Investigaciones en la cámara experimental

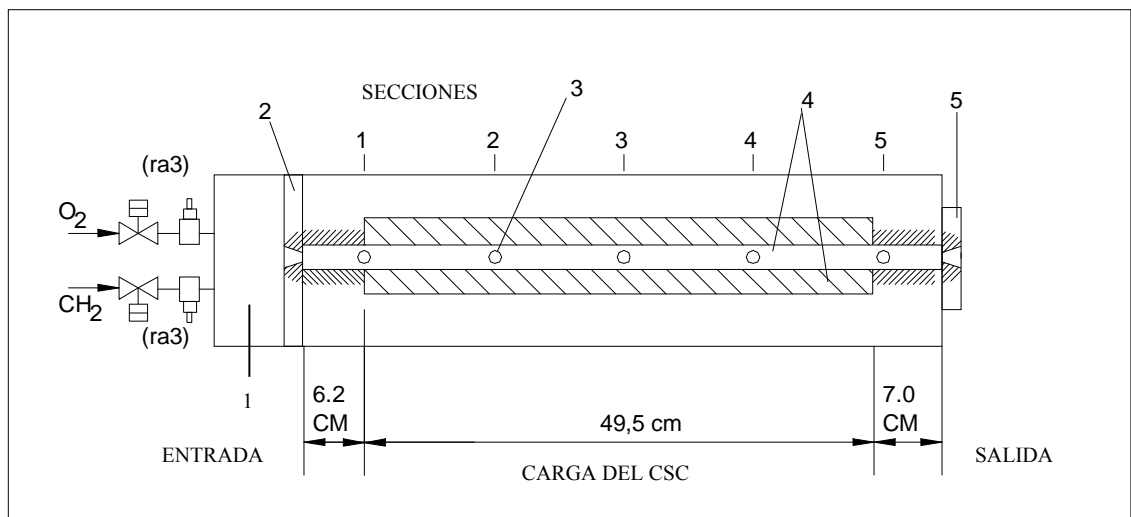
En una cámara plana especial se han realizado experimentos para modelar los procesos de la inflamación y de la combustión en el Motor Cohete de Combustible Sólido, la cámara esta equipada por diferentes ventanas para un fotografiado o filmado, ver Fig. 4.1.

La cámara esta compuesta, de una parte de entrada de la carga del combustible sólido del cohete y de la parte de salida. La carga del combustible sólido del cohete son dos bloques paralelos de combustible en forma de placas o laminas (ancho 25.4 mm y espesor 6.35 y la longitud 495 mm). La inflamación se produce con ayuda de un dispositivo periférico, y los gases de escape o ya quemados se descarguen a través de una tobera mezcladora. Las partes de entrada y salida, y también las paredes laterales de la cámara, que no están ocupadas con combustible, están cubiertas con una capa delgada de termo aislante en base a PBAH, con una concentración del 50% de oxido de titanio  $TiO_2$ . Después de que entre en funcionamiento la bujía eléctrica del inflamador el combustible arde y en el canal de la cámara se desarrolla un flujo de los productos de la combustión. A una baja presión de (0,1 – 0,3 Mpa.) en la cámara se establece un flujo subsónico con fricción y con intercambio de calor en la pared del canal. En el flujo de descarga puede alcanzarse o no alcanzarse la velocidad del sonido.

La primera fase del proceso transitorio es el periodo de inducción (retardo de la inflamación), que termina con la aparición de la llama en cierta parte de la superficie del combustible sólido del cohete.

El criterio adoptado de inflamación en el modelo consiste en que el combustible se inflama cuando alcanza cierta temperatura crítica  $T_{\text{inflamación}}$ . En la segunda fase comienza la propagación del frente de llama a lo largo de la carga. Durante el movimiento el frente de llama se acelera debido al incremento del flujo térmico, condicionado por un rápido incremento de la formación de gases.





**Figura 4.1** MCCS DE MODELACIÓN PARA ESTUDIAR LOS PROCESOS TRANSITORIOS DURANTE EL ARRANQUE

- 1.- CÁMARA INTERMEDIA DE COMBUSTIÓN DEL INFLAMADOR
- 2.-TOBERA DEL INFLAMADOR
- 3.-ORIFICIOS PARA LOS SENSORES DE PRESIÓN
- 4.-PLACAS DEL COMBUSTIBLE SÓLIDO DEL COHETE
- 5.-TOBERA DEL MOTOR

Como regla general, en la fase del proceso de arranque se establece un régimen crítico de descarga y la presión en la cámara rápidamente crece. La última fase del proceso es el periodo de llenado de la cámara con productos de la combustión, durante el cual puede aparecer la combustión erosiva, que facilita o condiciona la aparición de picos de presión. La combustión erosiva puede continuar cierto tiempo y se detiene solamente, cuando crece lo suficientemente la sección libre del canal de la cámara y cuando llega a darse el régimen casi estacionario de trabajo de funcionamiento del motor.

En los experimentos en los cuales se ha utilizado la cámara de moderación del motor propio de combustible sólido, una de cuyas paredes esta hecho en forma de una ventana de plexiglás de doble capa. Las pruebas de fuego con una extinción rápida con agua han mostrado, que en el periodo de arranque hasta que se alcance la presión pico de la cámara, la hablandación del plexiglás no se produce.

En cinco secciones a lo largo del canal con un intervalo de 127 mm. se han montado cinco sensores de presión de alta frecuencia, se ha previsto tres orificios adicionales para colocar termopares y sensores de los flujos térmicos. Para la inflamación de la carga se ha utilizado una mezcla de metano y de oxígeno, en composición parecido al estequeometrico.

La construcción del Motor de Cohetes de Combustible Sólido permite variar el caudal masico, la temperatura y el tiempo de funcionamiento del inflamador. Los experimentos se han hecho en un combustible, que contiene PXA y un aglutinante cuyas propiedades se dan en la tabla 2, para diferentes relaciones  $A_k/A_{kp}$  (1.06, 1.2, 1.5, 2).

Para obtener estas características, como función de  $p(T,x)$ , el retardo de la inflamación  $T_{\text{inflamación}}$ , y el control de estos procesos, como la propagación de la llama y la combustión erosiva, se han utilizado registros de la presión, el método de extinción por agua y la filmación veloz

TABLA 2  
PROPIEDADES DEL CSC

Composiciones 20% PBAK-EPON 828 80% PXA (30% 15 $\mu\text{m}$ - 70% 180 $\mu\text{m}$ )	
$p = 6,8\text{MPa}$ .....	0,804 cm/s
$n$ .....	0,4
$\lambda$ .....	$0,9 \times 10^{-3}$ Cal / Cm. seg $^{\circ}\text{K}$
$\rho_T$ .....	1.6 gr./cm <sup>3</sup>
$\alpha$ .....	$0.1875 \times 10^{-2}$ cm <sup>2</sup> /3
$W$ .....	22.01 gr/mol
$\gamma$ .....	1.24 gr/mol
$M$ .....	$0.87 \times 10^{-6} W^{0.5} T^{0.65} \Pi_3$
$q_D$ .....	0.4665 Cal/gr $^{\circ}\text{K}$
$R$ .....	0.09025 Cal/gr $^{\circ}\text{K}$
$T$ inflamación.....	700 $^{\circ}\text{K}$
$T$ combustión.....	2225 $^{\circ}\text{K}$
$T$ combustible.....	298 $^{\circ}\text{K}$
$k$ .....	5.72 Cm <sup>3</sup> $^{\circ}\text{K}$ /Cal
$\beta$ .....	105

## 4.2 RESULTADOS

En la Fig. 4.2 se muestra el proceso de transición de variación de la presión durante el arranque del Motor Cohete de Combustible Sólido según los registros en cinco secciones diferentes del canal.

En el periodo de retardo de la inflamación la presión en el canal es de 0,12Mpa. Después de 36 microsegundos del encendido del inflamador aparece la llama, lo que ha sido registrado con una filmación de alta velocidad. Debido a las bajas velocidades del gas en la parte de entrada del canal los registros de los sensores 1 y 2 se juntan. La presión en el lugar de ubicación del sensor 3 comienza a crecer un poco después, pero la curva es mas empinada. En la sección 1 la máxima presión se consigue después de 72 ms, y en la sección 5 después de 73.5 ms después de que se encienda el inflamador.

En la Fig. 4.3 se comparan las curvas experimentales y de calculo de la presión-tiempo en las secciones 1 y 5 en las fases de retardo de la inflamación se tiene una concordancia muy buena de los resultados. En la parte de propagación del frente de llama a lo largo de la carga se nota cierta correspondencia de los resultados cuando se considera el efecto de la combustión erosiva.

En la Fig. 4.4 se comparan las distribuciones de las presiones experimentales y de calculo a lo largo del canal de la carga en 4 diferentes momentos de tiempo cuando entra el motor al régimen y también se observan buena correspondencia de los resultados.

En la Fig. 4.5 se muestra las curvas de distribución de la velocidad axial del gas y de la temperatura a lo largo del canal de la carga calculada en los mismos momentos de tiempo.

En la Fig. 4.6 se muestra las variaciones y la posición calculada del frente de llama en función al tiempo que permiten juzgar también sobre la velocidad de propagación de la llama.

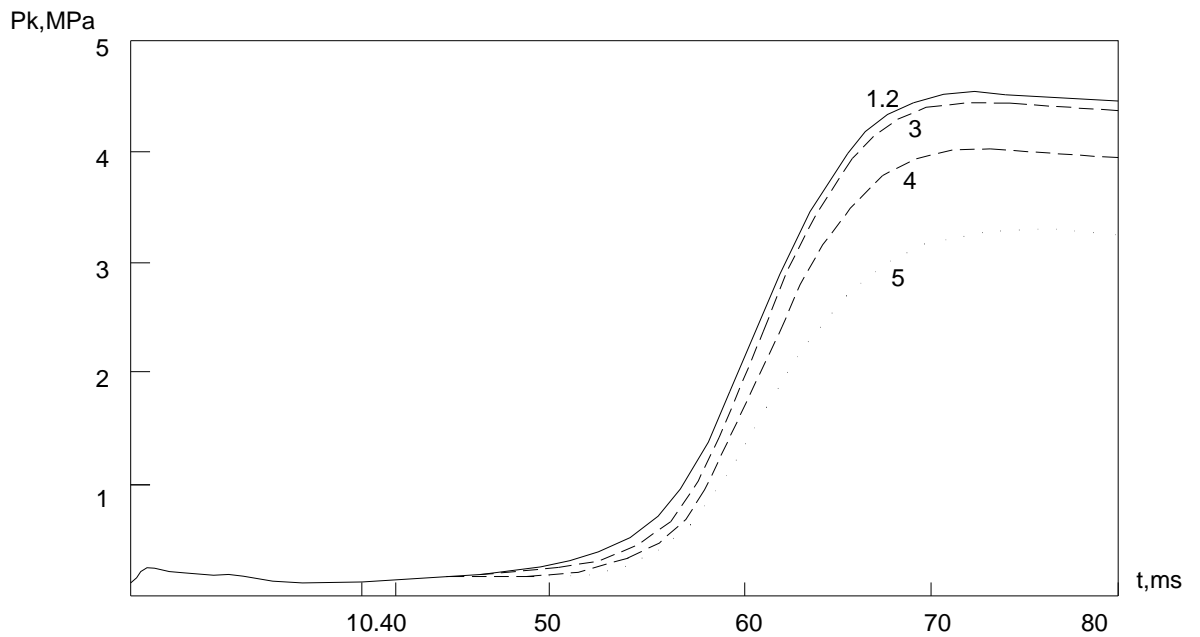
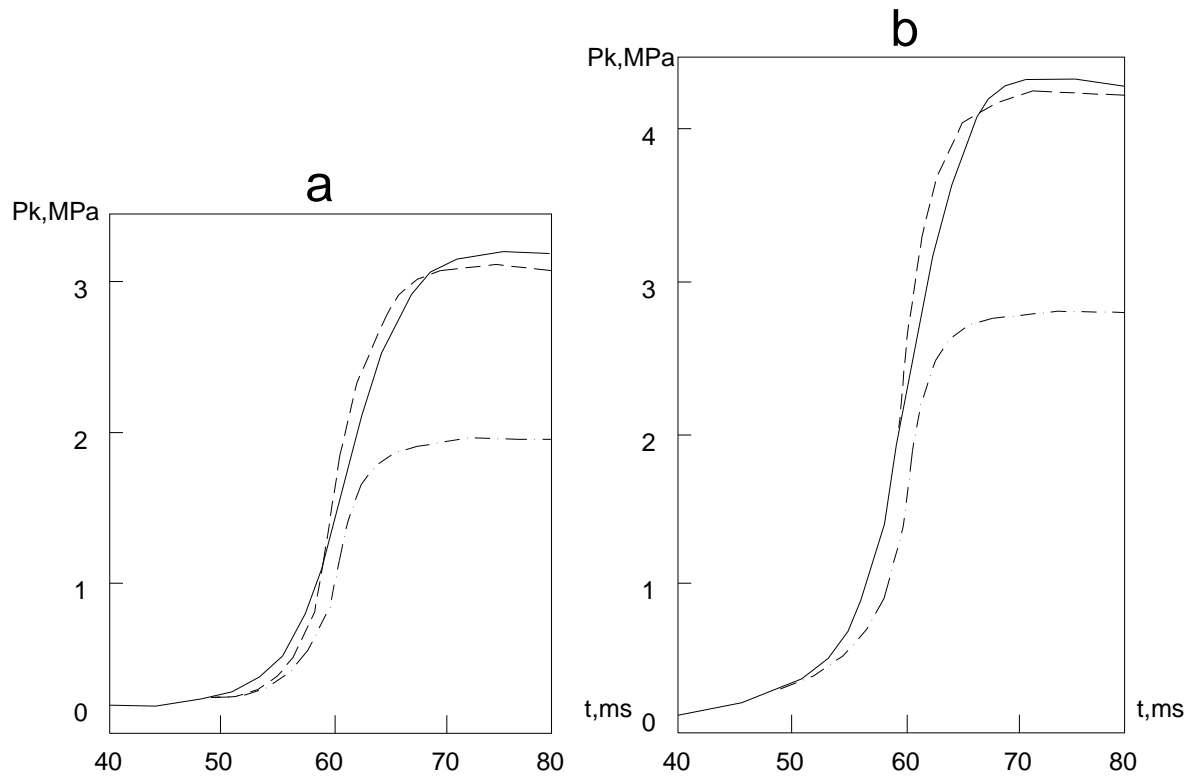


Figura 4.2 VARIACION DE LA PRESIÓN SEGÚN EL TIEMPO EN CINCO SECCIONES DEL CANAL DEL MCCS DURANTE EL ARRANQUE, QUE ILUSTRAN LA EXISTENCIA DEL GRADIENTE NEGATIVO DE LA PRESIÓN A LO LARGO DEL EJE DE LA CARGA.

$$A_K/A_{KP} = 1.2 \quad ; \quad \dot{m}_{infl} = 15.0 \text{ gr} / \text{s}$$

1,2,3,4,5 - Las cifras corresponden a los números de las secciones en la fig. 4.1



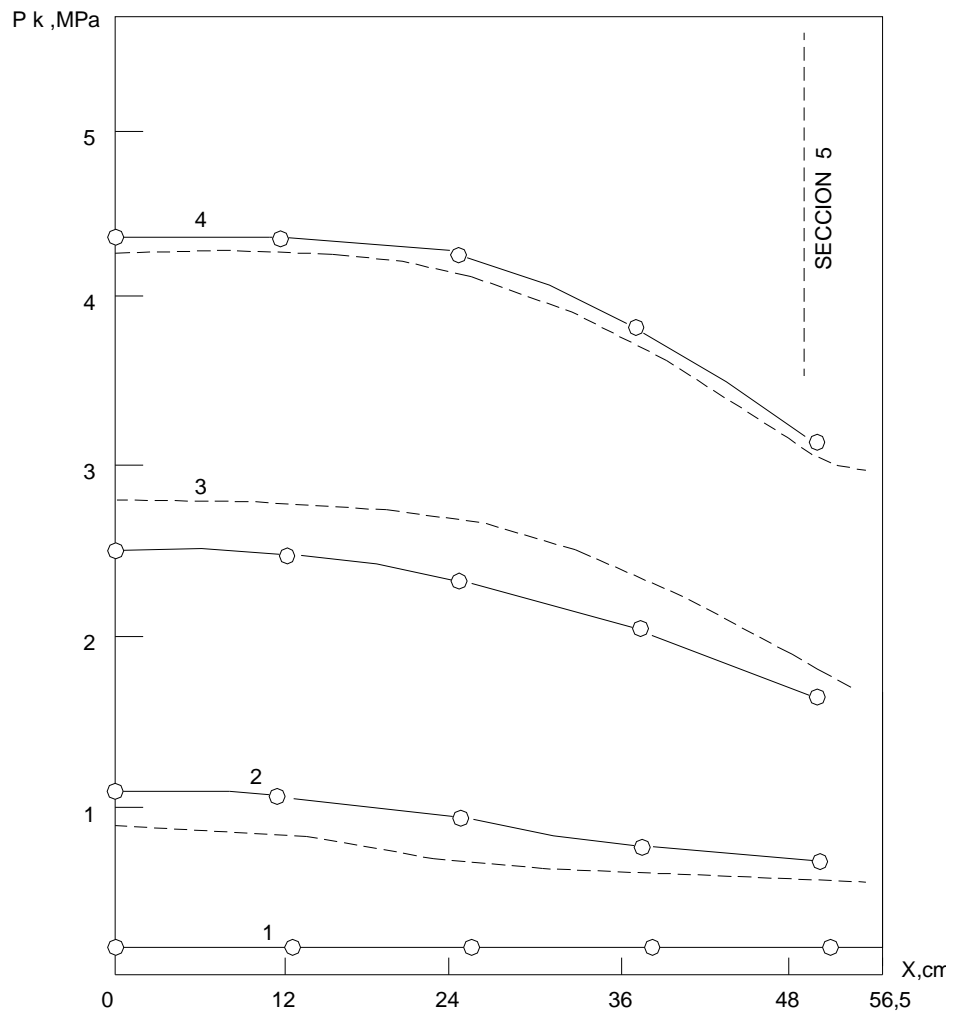
**Figura 4.3** COMPARACIÓN DE LOS DIAGRAMAS EXPERIMENTALES Y DE CALCULO DE LA PRESIÓN, TIEMPO PARA LAS PARTES DE ENTRADA a) Y SALIDA b) DEL MCCS

$$A_K/A_{KP} = 1.2 \quad ; \quad \dot{m}_{infl} = 15.0 \text{ gr} / \text{s} \quad ; \quad T_{infl} = 2410 \text{ }^\circ\text{K}$$

— datos experimentales

----- calculado

-.-.- calculado sin combustion erosiva



**Figura 4.4** COMPARACIÓN DE LAS DISTRIBUCIONES DE LA PRESIÓN EXPERIMENTALES Y CALCULADAS A LO LARGO DEL EJE DE LA CARGA PARA CUATRO INTERVALOS TÍPICOS DE LA PRESIÓN

$$A_K/A_{KP} = 1.2 \quad ; \quad T_{infl} = 2410 \text{ }^\circ\text{K}$$

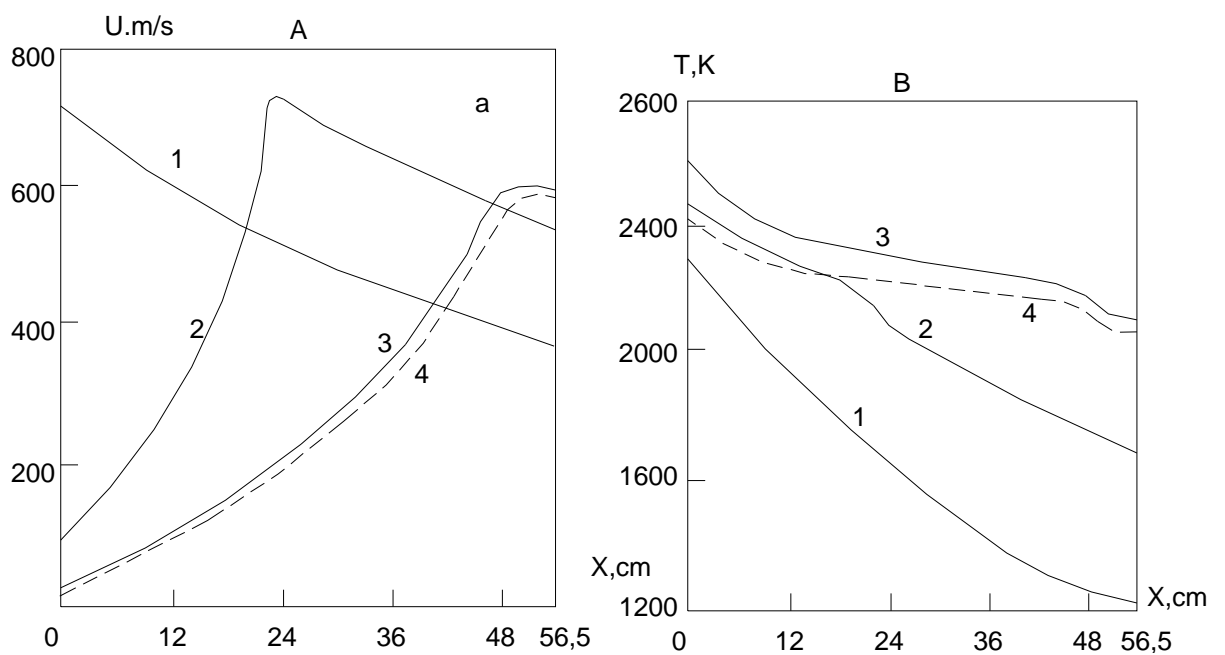
— datos experimentales

----- calculado

Según los resultados de estos experimentos se puede hacer una deducción, de que con el aumento del caudal de los productos de la combustión del inflamador  $m_{\text{inflamación}}$  y la relación de las áreas  $A_k/A_{KP}$  la velocidad de propagación de la llama a lo largo de la carga aumenta. Cuando esta relación  $A_k/A_{KP} = 2$  y  $m_{\text{inflamación}} = 20$  g/seg la velocidad del frente de llama es de 10 a 200 m/s. Esta influencia de las relaciones de áreas es comprensible, para una combinación dada de los parámetros del motor y del Combustible Sólido de Cohetes la magnitud de esta relación de áreas  $A_k/A_{KP}$  aumenta cuando disminuye  $A_{kp}$  y por consiguiente cuando aumenta  $p_k$ . En este caso las reacciones químicas van a desarrollarse más rápido y va acrecer la intensidad de intercambio de calor.

En la Fig. 4.7 se ilustra la influencia del caudal en los productos de la combustión del inflamador sobre el periodo de retardo de la inflamación, que cae desde 60 hasta 20 ms cuando aumenta al doble la magnitud  $m_{\text{inflamación}}$ . La pendiente de la recta es muy parecida al valor calculado según las relaciones para el intercambio de calor turbulento.





**Figura 4.5** DISTRIBUCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL GAS A LO LARGO DEL CANAL DE LA CARGA Y DE LA TEMPERATURA CALCULADA PARA CUATRO INTERVALOS TÍPICOS DE TIEMPO.

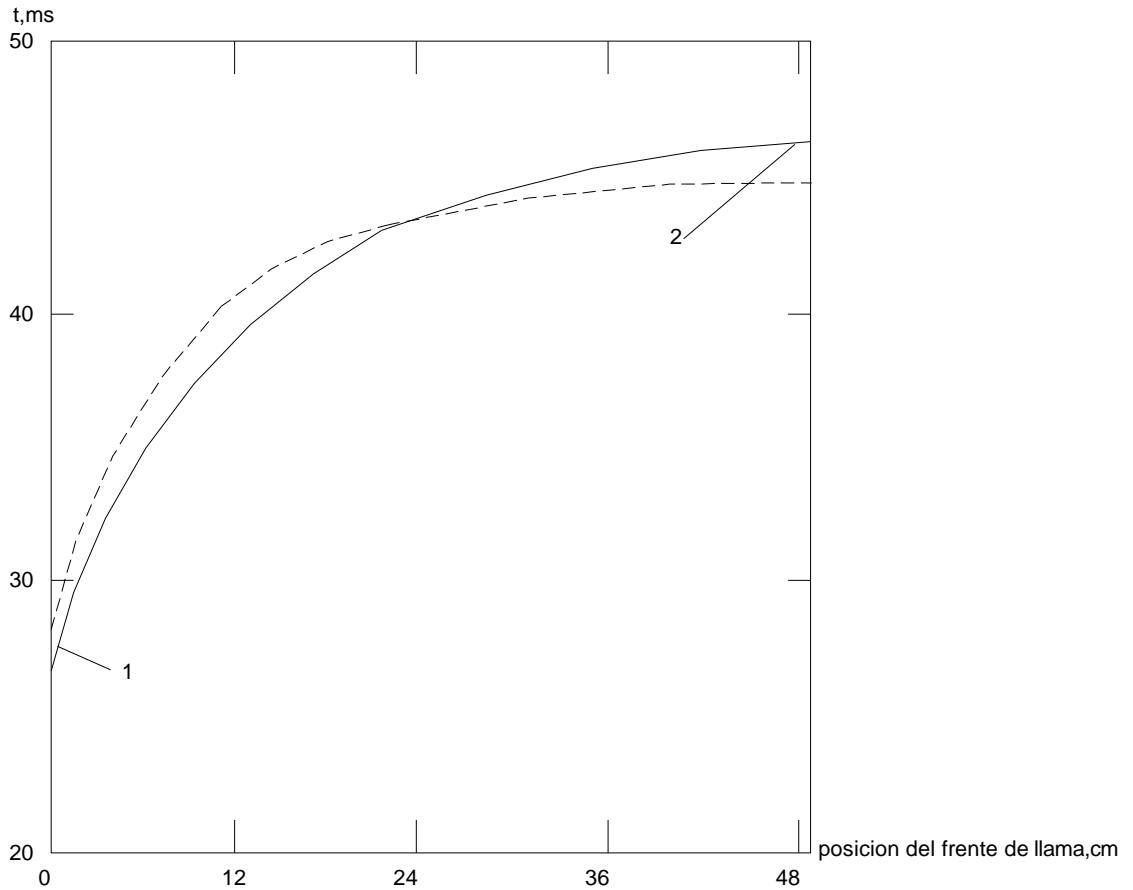
$$A_K/A_{KP} = 1.2 \quad ; \quad T_{infl} = 2410 \text{ °K}$$

1- Periodo de inducción, 25 ms

2- Propagación de la llama, 57 ms

3- Llenado de la cámara de combustión, 61 ms

4- Pico de la presión cerca al extremo delantero, 72 ms



**Figura 4.6** VARIACIONES Y LA POSICIÓN CALCULADA DEL FRENTE DE LLAMA EN FUNCIÓN AL TIEMPO QUE PERMITEN JUZGAR TAMBIÉN SOBRE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA LLAMA.

1. VELOCIDAD INICIAL DE PROPAGACIÓN DE LLAMA 8,3 m/s
2. VELOCIDAD FINAL DE PROPAGACIÓN DE LA LLAMA 126 m/s

$$A_K/A_{KP} = 1.5 \quad ; \quad \dot{m}_{infl} = 17.9 \text{ gr} / \text{s} \quad ; \quad T_{infl} = 2340 \text{ }^\circ\text{K}$$

\_\_\_\_\_ Experimental

----- calculado

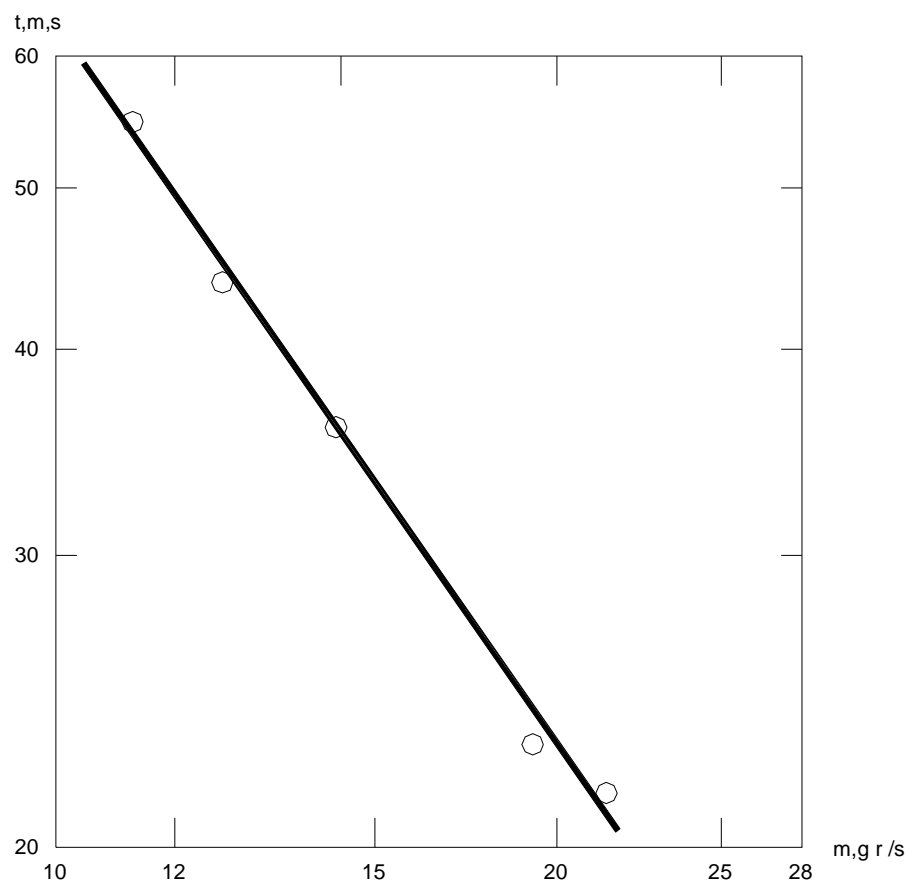


Figura 4.7 VALORES MEDIDOS DEL RETARDO DE LA INFLAMACIÓN DE LA CARGA

$$A_K/A_{KP} = 1.2 \quad ; \quad \text{pendiente de la recta } 1,5 \text{ s}^2/\text{Kg}$$

## CONCLUSIONES

- 1.- En base al estudio y análisis de la variedad de construcciones existentes de los dispositivos inflamadores se han determinado los medios pirotécnicos para la inflamación que se encuentran ubicados en el fondo delantero del Motor Cohete de Combustible Sólido ya que esta configuración crea las condiciones mas favorables para la inflamación de la carga de combustible sólido.
- 2.- Para aumentar la confiabilidad del encendido del Motores Cohetes de Combustible Sólido de los tipos existentes de dispositivos inflamadores se han seleccionado los inflamadores pirotécnicos tipo  $Zr + BaCrO_4$  con los siguientes dispositivos:
  - a. Dispositivos iniciadores con piró espoletas
  - b. La composición de transferencia compuesto de:
    - 1).El oxidantes Cromato de Bario ( $BaCrO_4$ ) en forma de granos
    - 2).El comburente Zirconio ( $Zr$ ) en forma de granos
  - c. La composición inflamatoria principal de la carga del Combustible sólido compuesta por Pólvora de Humo ya que este sistema es de fácil inflamabilidad.
- 3.- De las teorías existentes de la inflamación del combustible sólido se propone “La teoría de inflamación en una fase sólida”, ya que la inflamación estable se produce cuando se alcanza la temperatura critica en la superficie del combustible (Temperatura de inflamación).
- 4.- La base para construir el modelo matemático del proceso inflamatorio en la cámara de combustión del MCCA es:
  - El aparato de la teoría de los flujos unidimensionales en el canal de la carga,
  - Las relaciones que se deducen de las leyes de conservación de la masa y de la energía,
  - Las ecuaciones del intercambio de calor y la carga
  - y una serie de funciones específicas.

5.- En base al modelo matemático del proceso de inflamación se ha efectuado una optimización de las relaciones matemáticas obtenidas en un sistema único de ecuaciones que describen toda la variación de las magnitudes medias en el volumen libre de la cámara de combustión y de sus elementos:

- De la Presión, Densidad, Temperatura y otros parámetros físicos durante el periodo de inflamación.

6.- Considerando el principio de una promediación parcial de las magnitudes físicas y también utilizando la metodología del Dr. I.D. Skvartsov se ha obtenido una ecuación para el cálculo de la masa de la composición inflamadora de la pólvora de humo y de la composición pirotécnica cuando el dispositivo inflamador se ubica en el fondo delantero del Motor del Cohete de Combustible Sólido.

7.- En las investigaciones experimentales y teóricas básicas la influencia de diferentes factores sobre el retardo de la inflamación son los siguientes:

a) El aumento del retardo de la inflamación influye en:

- El aumento del flujo calorífico o térmico externo
- El aumento de la presión
- El aumento de contenido de oxígeno en la composición de combustible sólido de cohetes
- El aumento de la velocidad de reacción de la fase gaseosa
- El aumento de la temperatura inicial
- El aumento de la velocidad del gas

b) El crecimiento del retardo de la inflamación influye :

- Cuando aumenta la energía de activación del proceso de pirolisis
- Con el aumento de la relación de las densidades del gas y de la fase sólida o la relación de los coeficientes de conductividad de calor.
- Con el aumento de las medidas de las partículas del oxidante

## RECOMENDACIONES

Del análisis del estudio efectuado en la presente tesis se recomienda:

- 1.- El uso de los inflamadores pirotécnicos tipo  $Zr + BaCrO_4$  los cuales permiten aumentar la confiabilidad del encendido del Motores Cohetes de Combustible Sólido para lo cual debe estar asociado a los siguientes dispositivos:
  - Dispositivos iniciadores con piró espoletas
  - La composición de transferencia compuesto de:
    - 1).El oxidantes Cromato de Bario ( $BaCrO_4$ ) en forma de granos
    - 2).El comburente Zirconio (Zr) en forma de granos
  - La composición inflamatoria principal de la carga del Combustible sólido compuesta por Pólvora de Humo ya que este sistema es de fácil inflamabilidad.
- 2.- En la construcción de motores de cohetes los medios pirotécnicos para la inflamación deben ser ubicados en el fondo delantero del Motor Cohete de Combustible Sólido ya que esta configuración crea las condiciones más favorables para la inflamación de la carga de combustible sólido
- 3.- El uso de las relaciones matemáticas obtenidas mediante la optimización en un sistema único de ecuaciones que describen toda la variación de las magnitudes medias en el volumen libre de la cámara de combustión y de sus elementos (La presión, densidad, temperatura y otros parámetros físicos durante el periodo de inflamación) necesarios para la construcción de lo motores de cohetes de combustible sólido.
- 4.- La aplicación de la ecuación obtenida para el calculo de la masas de la composición inflamadora de la pólvora de humo y de la composición pirotécnica cuando el dispositivo inflamador se ubica en el fondo delantero del Motor del Cohete de Combustible Sólido la cual permitirá optimizar la inflamación del compuesto inflamador, el quemado homogéneo del combustible sólido y la entrada del motor al régimen estacionario .

## BIBLIOGRAFÍA

1. RAIZBERG B.A., YEROJIN BG, SAMSONOV KV, Fundamentos de la teoría de los procesos de trabajo en los sistemas coheteriles en base a combustible sólido. Moscú “Mashinoestroyenie” 1972, 836 paginas
2. Procesos no estacionarios de la combustión en los motores cohetes. Conclusiones de la ciencia y de la técnica. Motores aeronáuticos y de cohete. Bajo la redacción de AZ CHULKOV, Moscú Instituto de Investigación de la Academia de ciencias de la Unión Soviética. TOMO II 1977 199 paginas.
3. Siemienov N.N. Reacciones en cadena. Leningrado 1934 347paginas
4. Sielovich Y.B. Sobre la Teoría de la combustión de las pólvoras y los explosivos. RETF 1942 N° 12 251 paginas
5. Sielovich Y.B. sobre la Teoría del encendido. Academia de Ciencias de la Unión Soviética 1963 N° 2
6. Librovich V.B. Sobre la inflamación de las pólvoras en las sustancias explosivas RTMTF 1973 N° 6
7. Andreev k.k. Descomposición térmica y combustión de las sustancias explosivas. Moscú 1957
8. Freinsten JH , Hiks BL Thermal theory of ignition propellant physical and color kent 1950 volumen 54
9. MAC-ALENI R.F. y otros Mecanismos de Inflamación de los combustibles híbridos con gases calientes. Juego de tomos “Investigación de los motores cohetes en base ha combustible sólido” Moscú Instituto Científico 1983 861 paginas

10. Sorkin LE Gasotermodinamica de los motores cohete en base a combustible sólido Moscú 1967
11. Ludvicov AV Teoría de la conductividad de calor. Moscú 1967 970 paginas.
12. Pesov A, QO KK KDMiLH and Summerfiel Moscú 1963 Starting story propellant
13. IVKAD in Motores cohetes en base a combustible químico. Moscú "MIR" 1990 296 paginas.



## INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas mas complejos que aparecen durante la creación de los Motores de Cohetes de Combustible Sólido, es el diseño y la puesta a punto del sistema de inflamación, que incluye la elección de la composición inflamadora y la construcción del inflamador que garanticen un conjunto optimo de las características de trabajo en el periodo de entrada del Motor del Cohete de Combustible Sólido al régimen estacionario

la complejidad del problema consiste además en que estas características deberán conseguirse para unas limitaciones como son, la inflamabilidad y la combustión de la carga de combustible sólido, las características constructivas dadas de la carga del combustible sólido y de la cámara de combustión, las condiciones del medio externo etc.

El proceso de inflamación de la carga de combustible sólido y de entrada del motor al régimen de funcionamiento estacionario es él mas complicado según los procesos que se producen en la cámara de combustión en el periodo de trabajo del Motor Cohete de Combustible Sólido

En la cámara de combustión se producen una serie de procesos no estacionarios tales como:

- La combustión del inflamador
- El calentamiento y la inflamación de la carga del combustible sólido
- La formación y el movimiento del frente de inflamación por el canal de la carga
- La combustión conjunta de la composición inflamadora y de la carga del combustible sólido.

Todos estos procesos influyen sobre el carácter y los parámetros de entrada del motor al régimen de funcionamiento estacionario. De estos parámetros depende el régimen de lanzamiento del misil desde el depósito de lanzamiento, el proceso de separación de las etapas del misil, las cargas límite que actúan sobre los elementos del misil y sobre todo en la carga de combustible sólido.

En el inicio del periodo de desarrollo de los motores que emplean combustible sólido, para los cohetes no tripulados, el proceso de inflamación se elaboraba básicamente experimentalmente. Esto está justificado debido que los motores tenían pequeños tamaños y los costos al inicio no eran altos. Los diseñadores del motor en el mejor caso, utilizaban para determinar la masa del inflamador funciones empíricas y semi empíricas, que daban resultados satisfactorios solamente para aquellas condiciones para las cuales habían sido obtenidas.

Con el diseño de los misiles controlados, sobre todo los misiles estratégicos, las medidas y el costo de los motores bruscamente aumentaron

Esto requirió investigaciones teóricas y experimentales profundas y el desarrollo de los modelos físicos y matemáticos de los procesos que se producían en la entrada del motor al régimen estacionario

El mayor aporte a estas investigaciones lo hicieron:

- En Rusia V.I. Vilianov, B.I. Yerojin, A.G. Merchanov, B.A. Raizberg, R.E. Sorkin y otros

- En Europa F. Chanut, Ramond Jean, Sinclair J.E.
- En Estados Unidos Summerfield, German, F.Williams, Ryan, Beer, Kiro y Andersen y otros.

Todos estos científicos contribuyeron con sus experimentos, sobresaliendo uno de ellos Raizberg, quien en la década de los 60 efectuó mas de cien trabajos sobre la teoría multifase de inflamación, en la actualidad sé ha acumulado una gran experiencia en el diseño y calculo de los inflamadores, en el desarrollo de los compuestos inflamadores, en la investigación de su combustión, en la elaboración de los modelos matemáticos y físicos.

En base a los datos bibliográficos estudiados sobre los dispositivos inflamadores de los motores de cohetes de combustible sólido y la entrada de este ultimo al régimen estacionario, en el trabajo de tesis se han planteado las siguientes problemas:

- Analizar los tipos existentes de dispositivos inflamadores con la finalidad de determinar la variante optima.
- De la variedad de construcciones de los dispositivos inflamadores, y del lugar de su ubicación en el MCCS, fundamentar la efectividad de la construcción seleccionada y su lugar de ubicación.
- Optimizar el modelo fisico del proceso de inflamación del combustible sólido con la finalidad de conseguir la temperatura critica de la superficie del combustible.
- Optimizar el modelo fisico del proceso de inflamación de la carga en la cámara de combustión con la finalidad de reducir el tiempo de retardo del encendido del inflamador ( $t_{3g}$ )
- En base al análisis de las descripciones matemáticas del proceso de inflamación y de entrada del motor al régimen estacionario, llevar las relaciones matemáticas existentes en un sistema único de ecuaciones.
- Optimizar el método de ingeniería del calculo del proceso de inflamación que permita calcular aproximadamente las variaciones en el tiempo de las principales características balísticas internas del motor con el inflamador seleccionado en la cabeza, en el periodo de inflamación de la carga y de entrada al régimen estacionario de trabajo.

En la presente tesis se incluye los siguientes capítulos:

- En el Capítulo 1: “Dispositivos Inflamadores” se dan los principales requisitos de los dispositivos inflamadores, se describe los tipos de dispositivos inflamadores, se muestran las principales construcciones de los dispositivos inflamadores y su lugar de ubicación.
- En el Capítulo 2: “Modelo físico del proceso de inflamación” se describe los principales mecanismos de encendido de los combustibles sólidos, las condiciones de inflamación y el modelo multifase del proceso de inflamación de la carga
- En el Capítulo 3: “Descripción Matemática del proceso de inflamación y entrada del motor al régimen estacionario” se muestran las ecuaciones que describen las principales leyes relacionadas con la variación de los parámetros balísticas internos del proceso de entrada al régimen estacionario, se da el método y algunos ejemplos del calculo de la masa necesaria o requerida y de las medidas iniciales del grano del compuesto inflamador.
- En el Capítulo 4: “Algunos resultados de las investigaciones experimentales” se describen el equipo experimental, los principales resultados obtenidos en él y se da una comparación de los resultados del calculo y los experimentales.

## SIMBOLOGIA

$\phi$	Gradiente de Temperatura
$\phi^*$	Valor critico del gradiente de temperatura
$\rho_T$	Densidad del combustible sólido
$C_{pr}$	Calor especifico de los productos de la combustión
$R$	Constante especifica del gas
$T_r$	Temperatura en la cámara de combustión
$u(\theta)$	Constante de la velocidad que depende de la temperatura critica
$\eta_T$	Coefficiente de llenado volumétrico con combustible
$E_a$	Energía de activación
$e$	Distancia recorrida por el frente de llama
$Y^*$	Espesor de la capa caliente
$t^*$	Duración del calentamiento
$W^*$	Calor necesario
$\theta$	Temperatura
$\theta^*$	Temperatura característica
$X_T$	Coefficiente de la conductividad térmica
$q$	Magnitud del flujo térmico específico
$U$	Efecto térmico (intensidad de desprendimiento de calor que incluye en si al multiplicador exponencial
$\theta_H$	Temperatura de combustión de la carga a una $T^0$ normal en °K

$\lambda_T$	Coeficiente de conductividad de calor
$\theta_0$	Temperatura de la superficie del combustible
$q_r$	Es la velocidad de la generación del calor
$q_n$	Es el flujo térmico de la capa gaseosa
$M_r$	Masa del gas
$M_q$	Masa de las partículas en el volumen
$\rho$	Densidad local
$\rho_r$	Densidad de los gases en la cámara
$P_r$	Presión de los productos de la combustión
$g_q$	Es el porcentaje del peso de las partículas
$G_{kp}$	Gasto o caudal a través de la tobera
$k$	Es el exponente isoentrópico
$F_{kp}$	Area de la sección crítica de la tobera
$T_0$	Temperatura inicial de la carga
$u$	Velocidad media condicional del medio continuo
$V_r$	Velocidad masica del gas
$V_q$	Velocidad media masica de las partículas
$V$	Velocidad del medio condicional continuo
$q_k$	Es el flujo térmico convectivo
$\alpha_k$	Coeficiente de irradiación de calor
$\eta$	Coeficiente de llenado volumétrico

<b>I</b>	La longitud de la distancia
<b>Re</b>	Numero de Reynolds
<b>m</b>	Es el porcentaje masico de la fase condensada
<b>d</b>	Diámetro del canal
<b><math>\mu</math></b>	Es el coeficiente del gasto de la tobera
<b><math>V_i</math></b>	Volumen libre
<b><math>Q_{Bi}</math></b>	Es el ingreso masico de los productos de la combustión del compuesto inflamador
<b><math>Q_{Ti}</math></b>	Es el ingreso masico de los productos de la combustión en el volumen libre
<b><math>G_i</math></b>	Es el caudal o gasto masico de los productos del volumen libre debido a la descarga
<b><math>V_k</math></b>	Es la variación del volumen libre
<b><math>P_B</math></b>	Presión a que se produce la combustión de la composición inflamadora
<b><math>A_B</math></b>	Coefficiente de descarga de los productos de la combustión
<b><math>F_B</math></b>	Area de descarga
<b><math>S_B</math></b>	Función de variación de la superficie de combustión
<b><math>e_B</math></b>	Espesor actual de la bóveda que se quema de la composición inflamadora
<b><math>e_{BH}</math></b>	Espesor inicial de la bóveda que se quema de la composición inflamadora
<b><math>W_{BH}</math></b>	Es la masa inicial de la composición inflamatoria
<b>Z</b>	Es la variación del espesor relativo de la bóveda que se quema de la composición inflamatoria
<b><math>u_B</math></b>	Es la velocidad de combustión de la carga

<b><math>t_{II}</math></b>	Es el tiempo característico de propagación de la llama por la superficie de la composición inflamatoria
<b><math>S_T</math></b>	Es la magnitud actual de la superficie de la carga que esta incluida en la carga de combustible
<b><math>t_T</math></b>	Es el momento de la inflamación de la carga
<b><math>P_3</math></b>	Es una función Unitaria
<b><math>u_T</math></b>	Es la velocidad de combustión de la inflamación.
<b><math>V_a</math></b>	Es el volumen ocupado por el aire atmosférico que se bota de la cámara
<b><math>V_B</math></b>	Es el volumen ocupado por los productos de la combustión de la composición inflamatoria
<b><math>V_{CM}</math></b>	Es el volumen ocupado por los productos de la combustión del inflamador y del combustible.



## CAPITULO I

### DISPOSITIVOS INFLAMADORES

#### 1.1 Principales requisitos de los dispositivos inflamadores

El periodo de encendido de la composición inflamatoria de la carga del combustible sólido, al igual que la entrada del motor al régimen de funcionamiento estable es muy compleja según su naturaleza gasodinámica y físico-química y es un conjunto de procesos consecutivos.

Después del envío del impulso eléctrico se produce el encendido de la composición inflamatoria y luego el intermedio, este ultimo enciende la composición inflamatoria principal, como resultado del proceso de quema de la composición de inflamación en la cámara de combustión se produce el desprendimiento de calor que se acompaña con un aumento de la presión.

El diseño y el desarrollo del sistema de inflamación (Fig. 1), que incluye la elección del tipo de la composición de encendido, su masa, medidas (desde la pólvora pequeña dispersada y los gránulos hasta las pastillas, las cargas y los bloques de una forma dada) y de la construcción del dispositivo de inflamación (ignición) se deberá realizar de tal manera, que garantice un empleo optimo de los parámetros del proceso de trabajo y de las características para el periodo de inflamación no estacionario.

La complejidad del problema consiste además en que estas características deberán garantizar unas limitaciones como la inflamabilidad y combustión de la carga del combustible sólido, las características constructivas de la carga del combustible sólido y de la cámara de combustión, las condiciones del medio externo y otros.

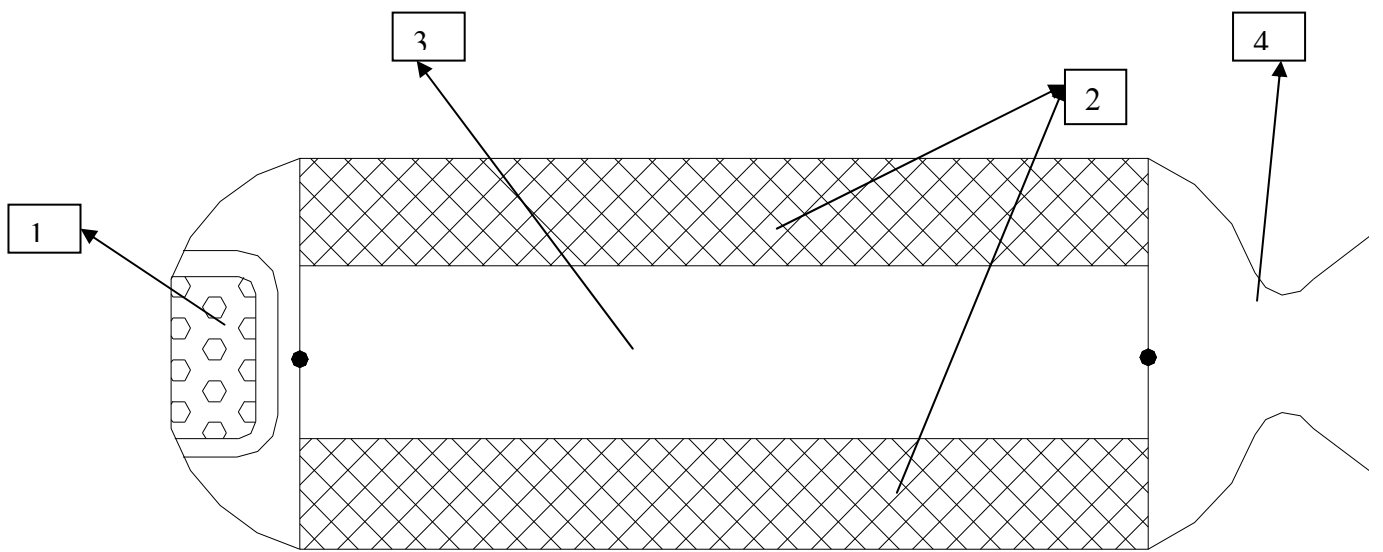


Figura 1 MOTOR DE COHETES DE COMBUSTIBLE SOLIDO

1. DISPOSITIVO INFLAMADOR
2. COMBUSTIBLE SOLIDO
3. CAMARA DE COMBUSTIÓN
4. TOBERA DE SALIDA

Los dispositivos Inflamadores (sistemas de encendido) sirven para la inflamación y para asegurar un proceso estable de quema de la carga del combustible sólido en la cámara de combustión; Como inflamación se entiende a aquel proceso durante el cual gracias a las reacciones exotérmicas se produce un desprendimiento local del calor en una cantidad suficiente como para que el desprendimiento de calor supere a las pérdidas de calor.

La cantidad de calor desprendido en un determinado intervalo de tiempo en el proceso de quema de la composición de inflamación deberá ser suficiente para aumentar la temperatura de la superficie de la carga del combustible sólido hasta un valor en el cual comienza el proceso de descomposición estable, la gasificación y su encendido con la formación de la zona de combustión.

La estabilidad del proceso de inflamación depende de:

- La densidad del flujo de calor
- La presión
- La composición de los productos de la combustión
- La velocidad del flujo
- La superficie de la carga del combustible sólido.

Las características de su construcción y lugar de ubicación del dispositivo de inflamación se determinan por:

- El área de la superficie de combustión,
- La forma y las medidas de la carga y la cámara de combustión
- la presión inicial en la cámara de combustión (condiciones de altitud de arranque).

Los dispositivos inflamadores deberán para una masa y medidas dimensionales mínimas garantizar:

- Una alta confiabilidad y fiabilidad de inflamación de la superficie de la carga del combustible sólido,
- Una seguridad durante la operación y almacenamiento en las condiciones dadas,
- Un almacenamiento prolongado sin una variación sustancial de las características balísticas,
- Una insensibilidad a la acción de las corrientes de inducción que aparecen en los sistemas de abordo y de tierra.

Los componentes de las mezclas pirotécnicas deberán inflamarse fácilmente y garantizar una reacción exotérmica auto mantenida.

La elección de los componentes para el sistema de inflamación en gran medida depende de la función cumplida por el, ósea de donde se utiliza el componente en la carga intermedia o principal.

Sobre el carácter de inflamación de la carga del combustible sólido influyen:

- La forma y las medidas de los elementos utilizados en el dispositivo inflamador en formas diferentes (desde los polvos finamente dispersados hasta los bloques de forma dada)
- Las propiedades de los productos de la combustión.
- El contenido de las fases gaseosa y condensada.
- La temperatura de combustión y la velocidad de combustión.

## **1.2 Tipos de dispositivos inflamadores**

En la actualidad se utilizan los dispositivos de inflamación :

- Con pólvora de humo, utilizados en los motores de cohetes de combustible sólido en un diámetro externo de hasta un metro. Las principales ventajas de estos inflamadores son la sencillez de la construcción y la fiabilidad de funcionamiento, mientras que las desventajas son la corta duración de la acción del impulso térmico sobre la carga de combustible sólido, la presencia

de factores de carga de impacto considerables sobre el combustible sólido y la temperatura relativamente baja de la combustión.

- Con composiciones pirotécnicas que son mezclas de los oxidantes no orgánicos con polvos de metales.

Las composiciones pirotécnicas para la carga de los inflamadores pueden pensarse en cargas con un diámetro de 5 a 15 mm. o en pequeñas pastillas con una masa de algunos cuantos decimos de gramos. Los dispositivos inflamadores examinados, ampliamente se usan en los motores de cohetes de combustible sólido con un diámetro externo de hasta 2 m.; estos motores de cohetes de combustible sólido equipado con combustible del principal (motores de cohetes de combustible sólido inflamador), son utilizados como regla general, en los motores de cohetes de combustible sólido potentes de grandes dimensiones y en las variantes ligeras de motores de cohetes de combustible sólido inflamador, los ligeros pueden establecerse en el fondo delantero del motor principal y los pesados desde el lado de la tobera.

- Del tipo combinado, que son diversas combinaciones hechas basándose en los diferentes principios analizados arriba de inflamación.

Equipado con fluidos auto inflamatorios. La inflamación de la carga con liquido auto inflamatorio se produce gracias al efecto de las reacciones exotérmicas entre el liquido y los componentes del combustible sobre la superficie de la carga del combustible sólido.

### **1.3 Compuestos Pirotécnicos.**

Los compuestos pirotécnicos inflamatorios se usan en forma de polvos, pastillas, mallas impregnadas con compuestos pirotécnicos.

Los polvos básicamente se utilizan en calidad de compuestos de transmisión, donde se requiere una alta velocidad de quema, mientras que para las composiciones de inflamación se utilizan elementos prensados en forma de pastillas, que poseen unas características balísticas más estables.

Existen diferentes formas de pastillas (Fig. 1.1) su altura y diámetro varían desde 1.25 hasta 25 mm. y más. Estas características como la forma de las pastillas, la densidad y la velocidad de quema ejercen influencia sustancial sobre la formación masica del gas.

En los dispositivos inflamadores del tipo “motor en un motor” en la cámara ignitora se utilizan cargas o bloques (Fig. 1.2). Durante esto los elementos hechos con un prensado ciego, condicionalmente se denominan bloques, mientras que los vaciados o compresados de peso se denominan carga. De las mezclas pirotécnicas en base a perclorato de potasio o aluminio compresado ciego bajo presión de hasta 560 Mpa se han obtenido bloques con diámetro de hasta 150 mm. y una longitud hasta 300mm. (Fig. 1.3). Los bloques de estas medidas pueden garantizar en los dispositivos inflamadores durante el arranque una presión de 15 hasta 17.5 Mpa. y en un tiempo de combustión de 30 ms hasta 2 seg.

En las cargas de los dispositivos inflamadores fuertemente fijadas con el cuerpo de la cámara, de las mezclas de los metales y de los oxidantes pueden fabricarse directamente un vaciado en el cuerpo con la solidificación posterior. Con este mismo método se fabrican las cargas de ignición de las composiciones que contienen zirconio, nitrato de potasio y aglutinante poli sulfuroso y también el aluminio, el boro y el perclorato de amonio con aglutinante fósforo carbonoso.

En calidad de composiciones inflamatorias el mayor empleo en los dispositivos inflamadores en forma de gránulos o pastillas la ha obtenido la pólvora de humo, que tiene la siguiente composición química (en porcentajes de masa) salitre de potasio-75%, carbón de leña-15%, azufre-10%. La pólvora de humo que posee una alta estabilidad química y una alta estabilidad fisico-química fácilmente se inflama desde el iniciador, pero posee una alta higroscopicidad y tiene un poder calorífico relativamente bajo y una temperatura de combustión  $T= 2400...2500^{\circ}K$ . La densidad de esta pólvora es 1,6.....1,7  $gr/cm^3$ , mientras que la densidad gravimetrica que depende de la medida de los granos varia en el rango de 0,9.....1,10<sup>5</sup>  $gr/cm^3$

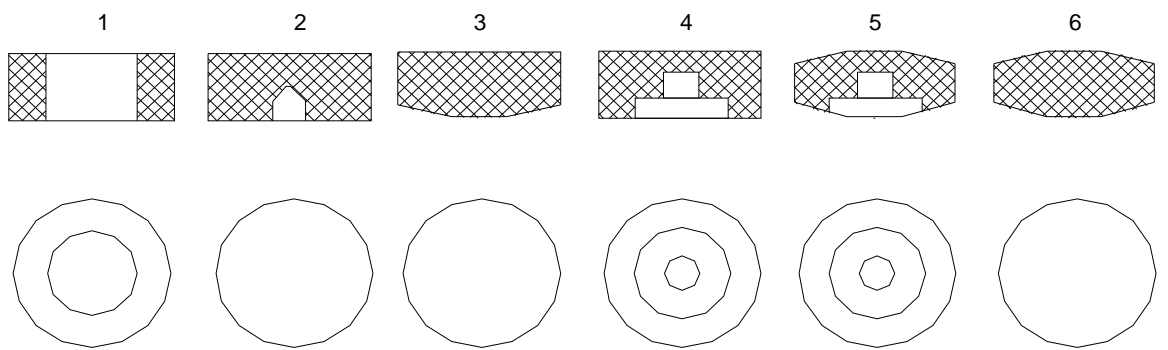


Figura 1.1 FORMA DE LAS PASTILLAS

- 1.- PLANO CON ORIFICIO
- 2.-PERFILADO
- 3.-PLANO CONVEXO
- 4.-PLANO CON INSERTO
- 5.-BICONVEXO CON INSERTO
- 6.-BICONVEXO

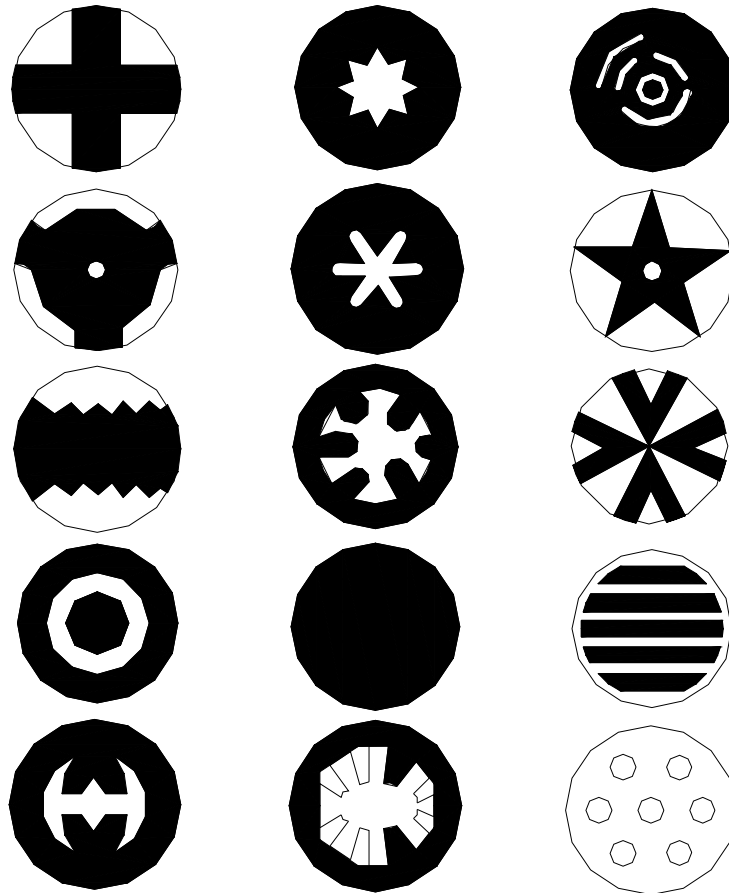


Figura 1.2 FORMAS DE LA SECCION TRANSVERSAL DE LAS CARGAS CILÍNDRICAS



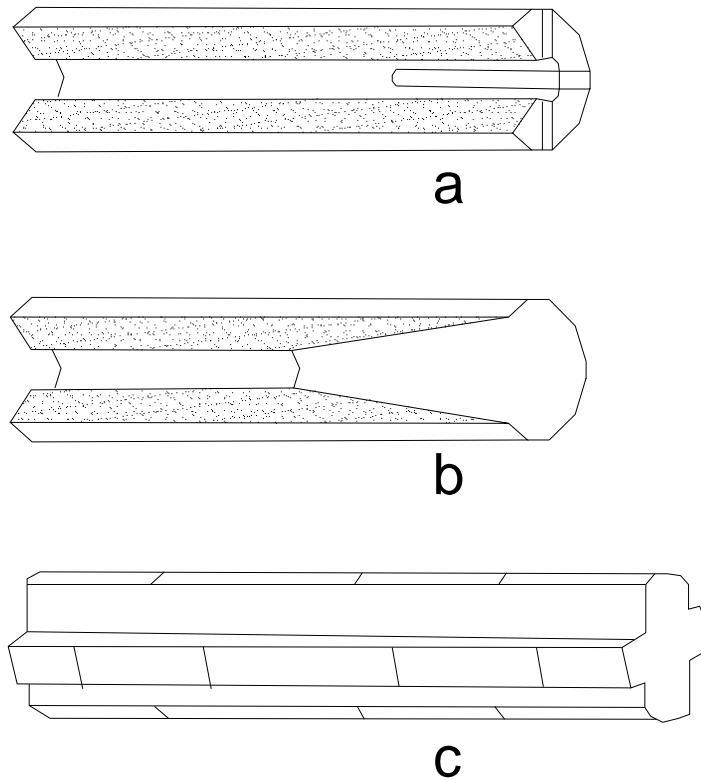


Figura 1.3 CARGAS DE LA COMPOSICIÓN INFLAMADORA DE FORMA CILÍNDRICA

- a) CARGA DE LA COMPOSICIÓN INFLAMADORA CON COMPENSADOR RANURADO
- b) CARGA DE LA COMPOSICIÓN INFLAMADORA CON CANAL CILINDRICO CON TRANSICIÓN A CONICO
- c) CARGA DE LA COMPOSICIÓN INFLAMADORA DE SECCION EN CRUZ CON BANDAS PEGADAS DEL RECUBRIMIENTO INHIBIDOR.

Las composiciones pirotécnicas incluyen en si al oxidante, carburante, aglutinante y también diferentes tipos de aditivos, que juegan el papel de aceleradores o desaceleradores del proceso de combustión o flematizadores.

En calidad de oxidantes pueden utilizarse el perclorato de potasio  $\text{KClO}_4$ , el nitrato de bario  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ , el nitrato de potasio  $\text{KNO}_3$ , el nitrato de sodio  $\text{NaNO}_3$ , el peroxido y el cromato de bario  $\text{BaO}_2$ ,  $\text{BaCrO}_4$  y otros.

En calidad de carburantes se usan los metales como el magnesio, el zirconio, el aluminio, el boro y el titanio, las aleaciones aluminio y magnesio, zirconio y níquel, los no metales como el fósforo, carbono, azufre, los componentes orgánicos, los hidrocarburos, los compuestos no orgánicos, los sulfuros, los fósforos, los silicios y otros.

Para garantizar la resistencia mecánica necesaria en las composiciones pirotécnicas se incluye a los aglutinantes (Cementadores), los polímeros orgánicos editol, cofinol, las resinas epoxicas, los cauchos, las etilcelulosas. En base a estos componentes se obtienen diferentes composiciones pirotécnicas.

Presentaremos las composiciones inflamatorias pirotécnicas más difundidas:

- La composición pirotécnica boro + nitrato de potasio se usa en forma de tabletas, esta fácilmente se enciende a bajas presiones de condiciones de altitud, la potencia calorífica de esta composición es mas que el doble que la potencia calorífica de la pólvora de humo. La velocidad de combustión es de 10 mm/s para una  $p = 0,1$  MPa.
- La composición inflamadora de polvo de aluminio y de perclorato de potasio se utiliza en forma de tabletas y bloques, y es una composición de alta energética. Esta composición se inflama mal a bajas presiones, mientras que la velocidad de su quema fuertemente depende de la presión y cuando la  $p=0,1$  MPa es igual a 10 mm/s.

- La composición pirotécnica  $Mg + NaNO_3 + KNO_3$  se utiliza en forma de polvo y tabletas. Cuando se añade a esta composición resinas en calidad de aglutinante, de ella se fabrican cargas pirotécnicas con un tiempo de trabajo relativamente grande. Debido a la presencia de partículas condensadas en los productos de la combustión mejora las condiciones de irradiación de calor, desde el flujo de doble base hacia la superficie de la carga del Combustible Sólido. El sistema posee una alta potencia calorífica, una velocidad de combustión de 4 mm/s cuando  $p = 0,1$  Mpa.
- La composición pirotécnica  $Zr+BaCrO_4$ , que se utiliza en forma de polvo o gránulos, durante la combustión de la cual se forma partículas condensadas de alta temperatura. Este sistema es uno de los sistemas más fáciles de inflamar, posee una baja potencia calorífica. La velocidad de combustión débilmente depende de la presión, para  $p=0,1$  Mpa es igual a 70mm/s.
- Para utilizar el dispositivo inflamador en condiciones de explosión nuclear puede usarse el sistema pirotécnico  $Al+CuO$ , que posee una resistencia a la sección de la radiación neutrónica y que se distingue por su estabilidad térmica y en pequeño desprendimiento de gas, cuando arde el sistema se forma partículas. La velocidad de combustión es de 40 mm/s cuando  $p = 0,1$  Mpa.

#### 1.4 Construcción de los dispositivos inflamadores

El sistema de inflamación mas difundida en los Motores de Cohetes de Combustible Sólido es el pirotécnico que contiene a las composiciones iniciadoras, de transmisión y principal. La composición de iniciación sirve para crear el impulso inicial de la llama, que prende a la composición de transmisión, mientras que la combustión de la composición de transmisión garantiza la inflamación de la composición pirotécnica principal. La composición pirotécnica, que es una mezcla del carburante y el oxidante, durante la quema genera la parte principal del calor, necesaria para la inflamación de la carga del Combustible Sólido.

En calidad de dispositivos iniciadores el mayor empleo hallan los dispositivos iniciadores eléctricos, los encendedores eléctricos o los piró patrones eléctricos.

El esquema típico de la bujía eléctrica compuesta de los elementos del circuito eléctrico, del piró patrón y de la bujía pirotécnica se muestra en la Fig. 1.4.

En función de la forma y de las medidas de la carga del Combustible Sólido y de la cámara de combustión pueden utilizarse diferentes construcciones de los dispositivos inflamadores.

Los dispositivos inflamadores pueden ubicarse del lado del fondo delantero, de la parte de tobera del canal de la carga combustible sólido y del extremo de la carga del combustible sólido (para las cargas desde la superficie lateral de la combustión). El lugar de ubicación del dispositivo inflamador al igual que la construcción de la carga del combustible sólido en mucho determina la secuencia de encendido de la superficie de la carga de combustible sólido a la combustión

En la Fig. 1.5 se muestra el esquema del dispositivo inflamador que se encuentra en el fondo delantero. En este esquema de ubicación del dispositivo inflamador se crean las condiciones más favorables de inflamación de la carga del combustible sólido, ya que los productos de la composición inflamatoria antes de abandonar la cámara de combustión interactúa con toda la superficie de combustión de la carga del combustible sólido. Principalmente partiendo de estas consideraciones, el esquema de inflamación con la ubicación del dispositivo inflamador de la parte delantera han obtenido el mayor empleo del motor cohete de combustible sólido de diferente finalidad.

Cuando se inflama la carga del combustible sólido desde el lado de la tobera el dispositivo inflamador puede fijarse ya sea en el fondo posterior o en la tapa de la tobera. En él ultimo caso el dispositivo inflamador junto con la tapa de la tobera es un conjunto único. (Fig. 1.6)

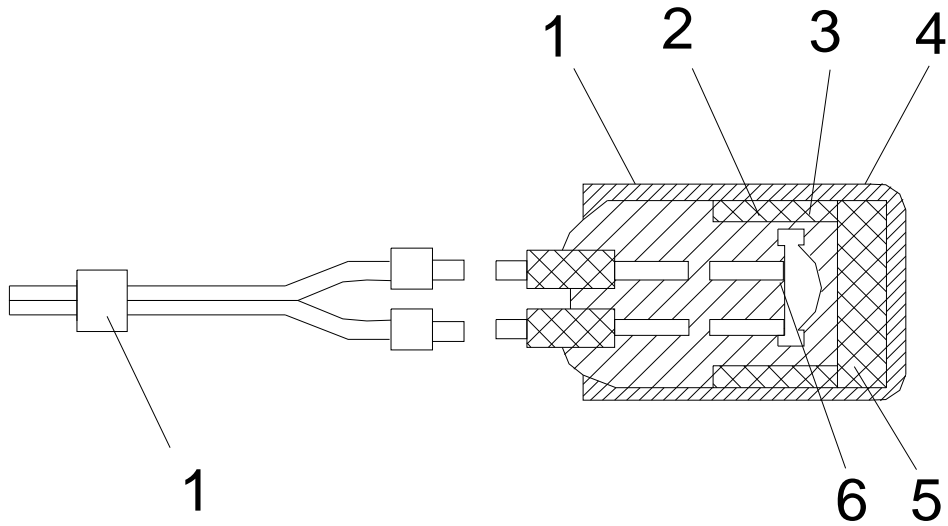


Figura 1.4 ESQUEMA TÍPICO DE LA BUJÍA ELÉCTRICA

1.-CUERPO

2.-BOCINA DE FIJACIÓN

3.-MEZCLA INCENDIARIA

4.-COMPUESTO DE TRANSMISION

5.-COMPUESTO PRINCIPAL DEL DISPOSITIVO

6.-FUENTE INCANDESCENTE

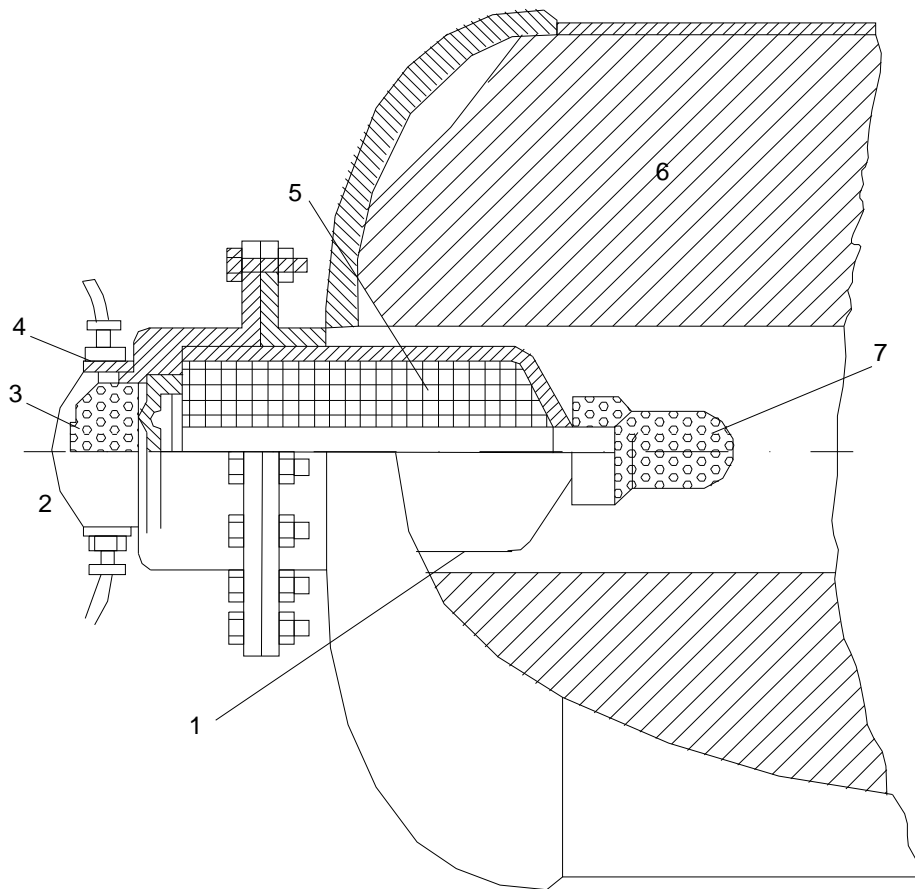


Figura 1.5 DISPOSITIVO INFLAMADOR TIPO MOTOR EN MOTOR

- 1.-CUERPO
- 2.-DIAFRAGMA DE ROTURA
- 3.-CARGA PIROTÉCNICA COMPUESTA DE PASTILLAS
- 4.-PIROENCENDEDOR
- 5.-CARGA DEL COMBUSTIBLE SÓLIDO
- 6.-CARGA DEL COMBUSTIBLE SÓLIDO DEL MOTOR PRINCIPAL
- 7.-TOBERA DE ESCAPE

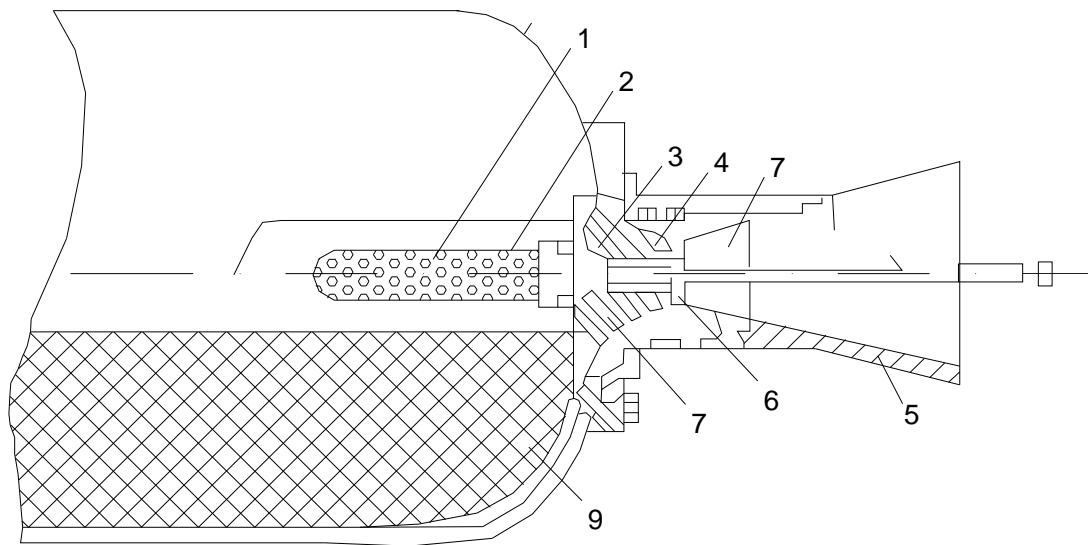


Figura 1.6 DISPOSITIVO INFLAMADOR UBICADO EN EL LADO DEL FONDO DE LA TOBERA

- 1.-TUBO PERFORADO
- 2.-CARGA DE LA C.I. COMPUESTO DE PASTILLAS
- 3.-CUERPO
- 4.-INICIADOR
- 5.-TOBERA
- 6.-DISPOSITIVO SELLANTE
- 7.-TAPON DE TOBERA
- 8.-CUERPO DEL MOTOR
- 9.-CARGA DE COMBUSTIBLE SOLIDO

Para inflamar las cargas de los combustibles sólidos de los motores cohete de combustible sólido potentes, se utilizan en las etapas primeras o cero de los cohetes booster, dispositivos inflamadores de medidas y masa relativamente grandes, por esta razón es conveniente fijarlos de manera directa en la instalación de despegue (Fig. 1.7)

Este método de ubicación del dispositivo inflamador conlleva a la disminución de la masa pasiva del motor. Este sistema de arranque es una cámara de combustión de encendido de un tamaño determinado con una tobera. Dentro de la cámara de combustión se ubica la carga del combustible sólido, durante esto la presión en ella puede alcanzar 17 Mpa.

En la Fig. 1.8 se muestran los esquemas de los dispositivos inflamadores, ubicados en el canal de la carga y utilizados para inflamar las superficies desde el lado del canal. La parte principal de este dispositivo es un tubo perforado hecho ya sea de plástico o de papel prensado dentro del cual se ubica la composición pirotécnica; para proteger la composición pirotécnica el tubo se envuelve en una cinta plástica.

En caso de inflamación de la carga desde la superficie lateral de combustión el dispositivo inflamador puede fijarse a la carga, a la tapa de tobera o al fondo posterior

En la Fig. 1.9 se muestra el esquema del dispositivo inflamador para una inflamación múltiple de la carga de combustible sólido en los motores de encendido múltiple.

El más simple desde el punto de vista constructivo es el dispositivo inflamador del tipo casquete, que es una bolsa con pólvora negra y piró bujía.

Un poco más complejo es el dispositivo inflamador del tipo caja, que es un cuerpo relativamente ligero metálico o plástico, dentro del cual se ubica la bujía eléctrica y la carga de la pólvora negra o la composición pirotécnica en pastillas (Fig. 1.9a). La principal desventaja de estos dispositivos inflamadores es la reproductividad baja de la entrada del motor al régimen estacionario.



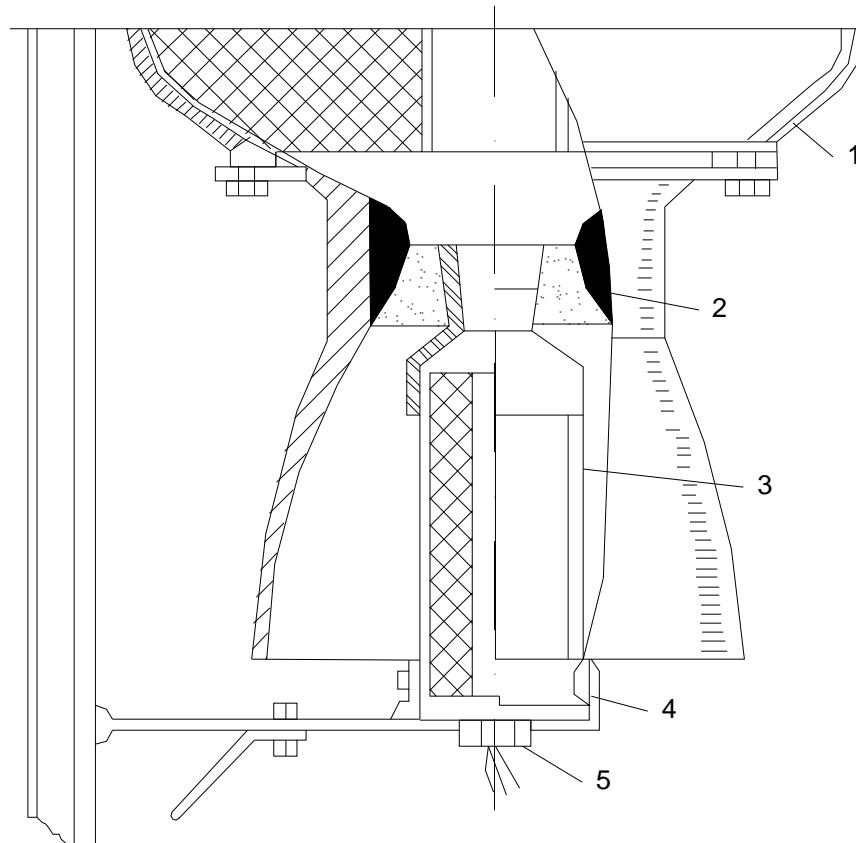


Figura 1.7 SISTEMA DE ENCENDIDO DEL MOTOR DESDE EL LADO DE LA TOBERA

- 1.-MCCS
- 2.-TAPA DE TOBERA
- 3.-DISPOSITIVO INFLAMADOR
- 4.-BASE
- 5.-PIROCARTUCHO

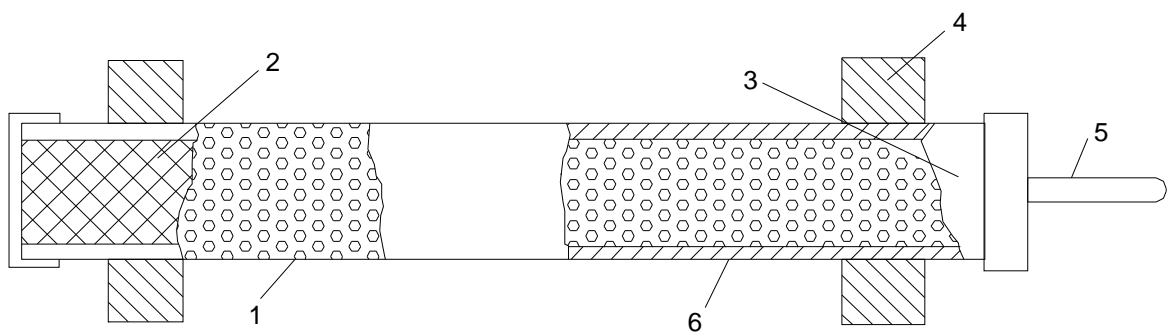


Figura 1.8 DISPOSITIVO INFLAMADOR UBICADO EN EL CANAL DE LA CARGA DEL COMBUSTIBLE SÓLIDO

1.-TUBO PERFORADO

2.-RECUBRIMIENTO SELLANTE

3.-INICIADOR

4.-APOYO DE JEBE POROSO

5.-CABLE ELECTRICO

6.-CARGA DEL COMPUESTO INFLAMADOR DE PASTILLAS PIROTECNICAS

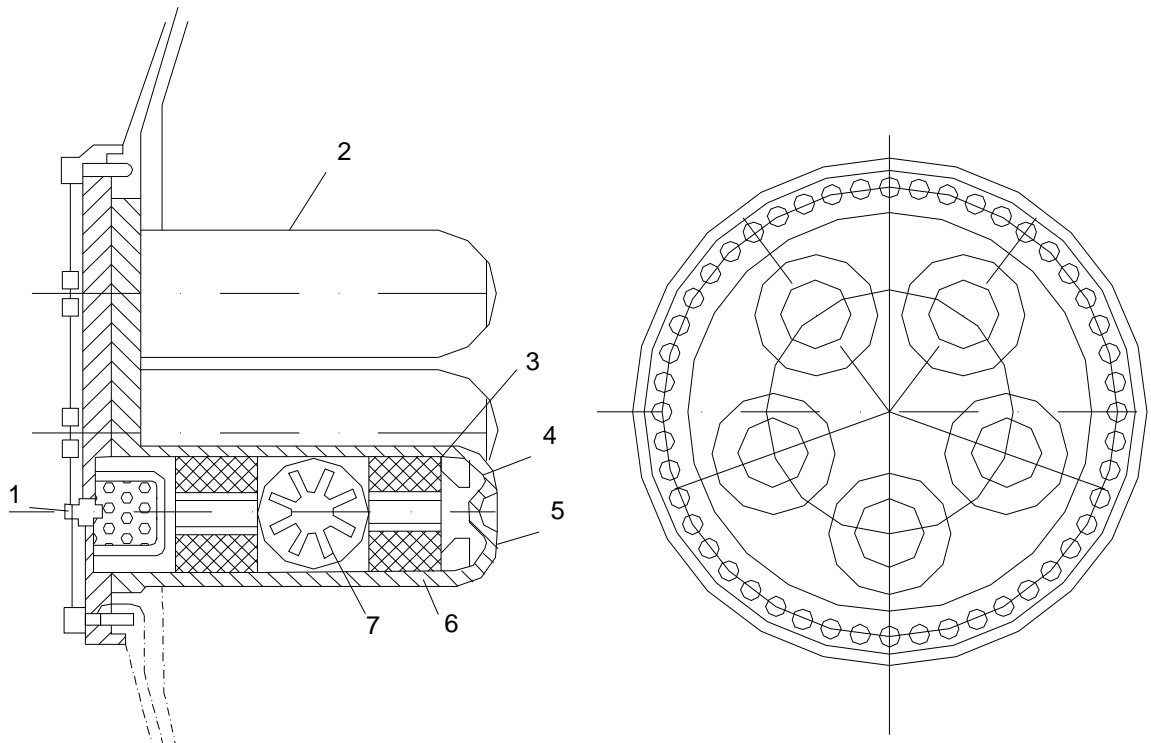


Figura 1.9 BLOQUE DE LOS DISPOSITIVOS INFLAMADORES PARA UN ENCENDIDO QUINTUPLE

1.-PIROCARTUCHO

2.-CUERPO

3.-CUERPO DE MATERIAL COMPUESTO

4.-TOBERA

5.-MENBRANA DE ROTURA DOBLE

6.-CARGA DEL COMBUSTIBLE SÓLIDO

7.-SECCION DEL CANAL DE LA CARGA DEL CS

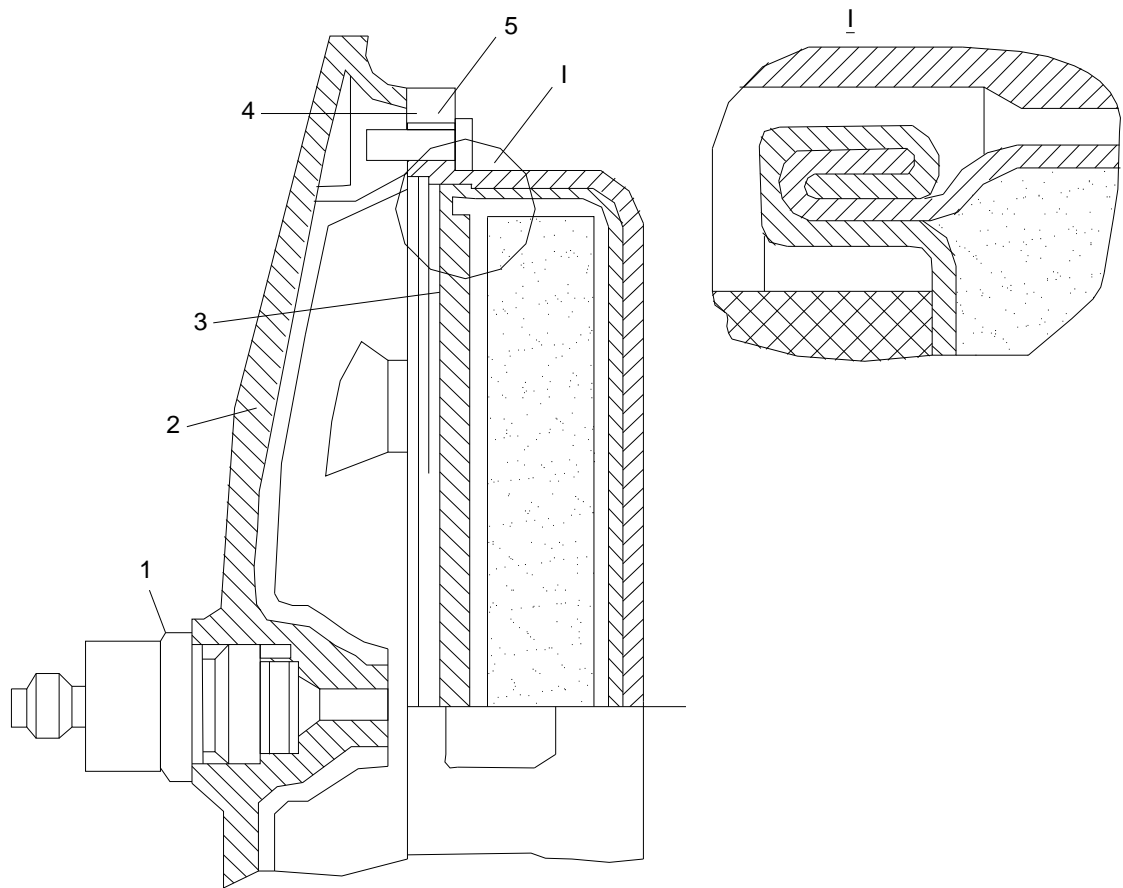


Figura 1.9 a DISPOSITIVO INFLAMADOR

1.-PIROCARTUCHO

2.-FONDO DELANTERO DEL MCCS

3.-CUERPO DEL INFLAMADOR

4.-ENVOLTURA

5.-TORNILLO DE FIJACIÓN DEL INFLAMADOR

El dispositivo inflamador tipo rollo (Fig.1.10) es una malla de la composición pirotécnica envuelta sobre el tubo perforado o sobre el molde central, dentro del cual se encuentra la bujía eléctrica. La fijación del dispositivo inflamador se efectúa con ayuda de los sellantes laterales. Este dispositivo inflamador posee una pequeña masa pasiva y como regla general se fija desde el lado de la tobera.

En la Fig. 1.11 se representa el esquema del dispositivo inflamador del tipo canastilla, en el cual el proceso de combustión se produce en un volumen semi cerrado a una determinada presión. Esta construcción del dispositivo inflamador garantiza una reproductividad relativamente alta de los parámetros del proceso de trabajo para el periodo de inflamación. Los inflamadores “canastilla” se fabrican de una carcasa de alambre, vidrio plástico o de lamina metálica perforada. Gracias a la variación de la cantidad de orificios y de sus medidas para este tipo de construcción del dispositivo inflamador se puede en cierto grado regular el nivel y la velocidad de variación de la presión en la cámara de combustión.

El Dispositivo Inflamador de este tipo permite también aumentar el tiempo de acción de los productos de la combustión de la Cara Inflamatoria sobre la superficie de la carga del Combustible Sólido.

Existen Dispositivos Inflamadores que combinan los elementos pirotécnicos con la técnica de los esquemas de impresión (Fig. 1.12). Estos dispositivos son franjas de material inductor eléctrico y de elementos pirotécnicos que forman una red sobre la superficie de combustión de la carga y están unidos en un circuito cerrado de fuego. La inflamación se produce cuando se alimenta de corriente al circuito. En la composición de la mezcla pirotécnica generalmente entran el oxidante cristalino (perclorato de potasio), el comburente (boro), el material conductor de electricidad (plata) y el aglutinante polimérico. Para disminuir la sensibilidad del inflamador a las acciones mecánicas se utiliza una capa protectora de papel aluminio.

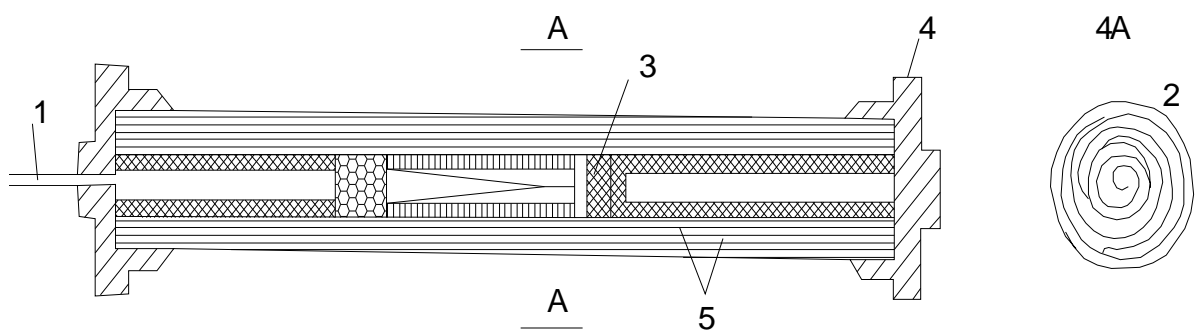


Figura 1.10 DISPOSITIVO INFLAMADOR TIPO ROLLO

1.-CONDUCTOR ELECTRICO

2.-MALLA DE MATERIAL PIROTÉCNICO ENVUELTO EN EL  
MOLDE

3.-INICIADOR

4.-BASE DEL DISPOSITIVO INFLAMADOR DE JEBE

5.-TELA EMPAPADA CON COMPUESTO PIROTECNICO

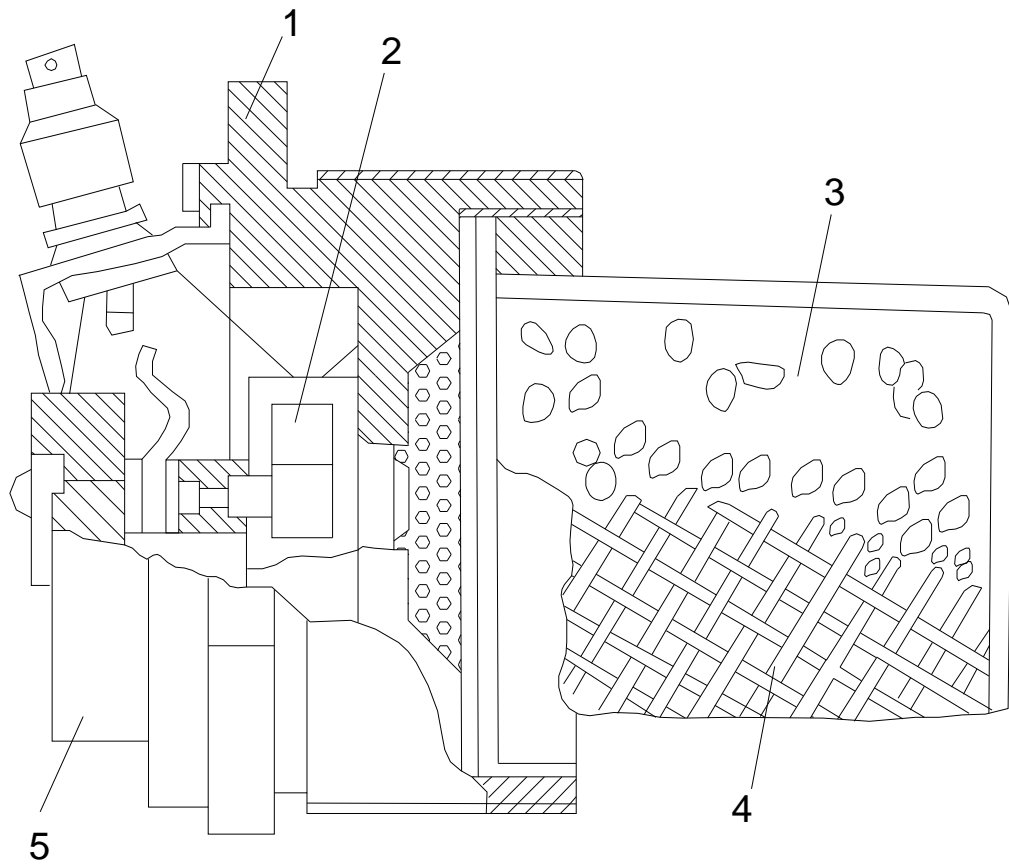


Figura 1.11 CONSTRUCCION TIPICA DEL DISPOSITIVO INFLAMADOR DE CANASTILLA

1.-BASE

2.-INICIADOR

3.-CARGA DEL COMPUESTO INFLAMADOR COMPUESTO  
POR PASTILLAS

4.-CANASTILLA

5.-UNION

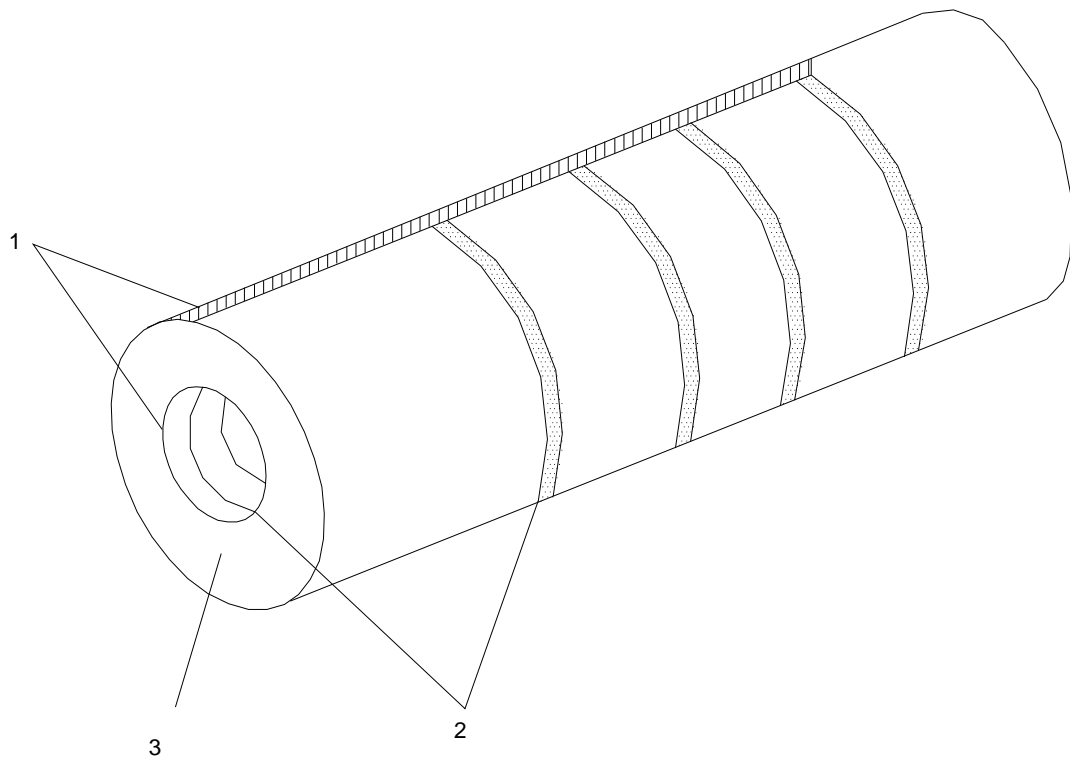


Figura 1.12 DISPOSITIVO INFLAMADOR DE PELÍCULA CONDUCTORA DE ELECTRICIDAD APLICABLE SOBRE LA SUPERFICIE DE COMBUSTIBLE DE LA CARGA DEL COMBUSTIBLE SÓLIDO

1.-CONDUCTORES

2.-PELICULA CONDUCTIVA DE ELECTRICIDAD CON MEZCLA PIROTÉCNICA

3.-CARGA DEL COMBUSTIBLE SOLIDO



## CAPITULO II

### MODELO FÍSICO DEL PROCESO DE INFLAMACIÓN

#### 2.1 Mecanismos de Encendido de los Combustibles Sólidos y condiciones de la Inflamación

El proceso de inflamación en los Motores de Cohetes de Combustible Sólido incluye en si a un conjunto de fenómenos gasodinámicos y físico-químicos que se desarrollan en un volumen libre de la cámara llena de productos gaseosos y en la capa superficial de la carga en el periodo de su encendido.

Hablando exactamente todo el proceso de encendido debe examinarse como único, sin embargo con la finalidad de aliviar las investigaciones de este proceso es conveniente resaltar y estudiar por separado, de un lado el círculo de fenómenos que caracterizan la propia inflamación del combustible sólido y por otro lado los fenómenos físicos que caracterizan la variación del estado del medio que llena el volumen libre de la cámara.

Cuando se estudian los procesos físico-químicos en la capa superficial del combustible inflamador y en la capa próxima de los productos de la combustión, denominado mecanismo de encendido, la acción gasodinámica y térmica sobre la carga desde el lado de los productos inflamables se limita mediante la implantación de condiciones límites simplificadas.

El modelo matemático de los procesos físicos en el volumen libre de la cámara de combustión en el periodo de la inflamación se construye generalmente suponiendo el encendido del elemento de la superficie de la carga ósea la aparición del frente de llama sobre la superficie y su entrada en el proceso de combustión produciéndose instantáneamente después de alcanzar ciertas condiciones críticas, por ejemplo, cierta temperatura de la superficie como en adelante se utiliza. Básicamente en el sugerido enfoque a nosotros nos va a interesar las leyes principales y las características del proceso de encendido y las

así denominadas condiciones críticas de encendido, que se entienden como la relación entre los parámetros del sistema, que divide a los regímenes de presencia y ausencia del encendido. Entre los parámetros del sistema se incluyen a las condiciones de calentamiento y a las características termofísicas del combustible.

Pasamos a examinar el tema propio del presente capítulo con un rápido recuento de los conceptos existentes sobre los fundamentos físicos del proceso de encendido y las condiciones críticas de encendido.

Los fundadores de la Escuela de inflamación térmica fueron N.N. Siemienov. [3], Y.B. Zeldovich, K.K. Andreev y otros.

El desarrollo de la teoría del encendido comienza desde los trabajos clásicos de Y.B. Sielovich [4–5] que formuló las condiciones de inflamación de la pólvora:

- Alcanzar la temperatura crítica de la superficie  $\theta_*$ , durante el cual comienza la descomposición intensa de la pólvora con la formación de productos gaseosos.
- Creación de una capa caliente lo suficientemente profunda, la existencia de llama en la superficie. El máximo valor de la gradiente de la temperatura  $\varphi$  en la superficie de la pólvora no deberá superar el valor crítico  $\varphi_*$ , determinado por la relación

$$\varphi_* = \frac{\rho_T c_{pr}}{\eta_T} \frac{2RT_r^2}{E_a} \frac{u(\theta_*)}{e} \quad (2.1)$$

- Donde:**  $\Phi$       Gradiente de Temperatura
- $\Phi_*$       Valor crítico del gradiente de temperatura
- $\rho_T$       Densidad del combustible sólido
- $C_{pr}$       Calor específico de los productos de la combustión
- $R$       Constante específica del gas

$T_r$  Temperatura en la cámara de combustión

$u(\theta)$  Constante de la velocidad que depende de la temperatura crítica

$\eta_T$  Coeficiente de viscosidad

$E_a$  Energía de activación

$e$  Distancia recorrida por el frente de llama

Si es que  $\varphi > \varphi_*$  la reserva de calor en la capa caliente es insuficiente para mantener la combustión.

- Adición de una cantidad adicional de calor, necesario para el encendido de los vapores de pólvora que se forman en la superficie.

Como señala Y.B. Sielovich, la cantidad de calor necesario para el encendido de los productos de la combustión es muy pequeño en comparación al gasto de calor para el calentamiento de la fase condensada (capa caliente), por esta razón la tercera condición se puede no tomar en cuenta y suponer que la pólvora se inflama en el momento cuando se cumplan las dos primeras condiciones.

En el trabajo [4] simultáneamente se da una evaluación de los valores mínimos del espesor de la capa caliente  $Y_*$ , de la duración del calentamiento  $t_*$ , y del calor necesario  $W_*$  (en el cálculo por unidad de área de la superficie), requerido para alcanzar las condiciones de inflación. Estas magnitudes son iguales correspondiente a:

$$y_* = \frac{\theta_* - \theta_H}{\varphi_*} \quad t_* = \frac{y_*^2}{x_r}$$
$$W_* = \rho_T c_T (\theta_* - \theta_H) y_* \quad (2.2)$$

Donde:  $Y_*$  Espesor de la capa caliente

$t_*$	Duración del calentamiento
$W_*$	Calor necesario
$\theta_*$	Temperatura característica
$X_T$	Coefficiente de la conductividad térmica
$\theta_H$	Temperatura de combustión de la carga a una $T^\circ$ normal en $^\circ K$
$\theta_0$	Temperatura de la superficie del combustible
$C_T$	Calor específico del combustible sólido
$\rho_T$	Densidad del combustible sólido

Estas ideas fueron desarrolladas en el trabajo [7], donde se examinó la inflamación de las pólvoras por un flujo de gases calientes en el cono, cuando la gasificación de la sustancia condensada se produce por completo debido a la adición de calor desde los productos gaseosos. Durante esto en función a la intensidad de adición de calor a la superficie de la pólvora, medida por la magnitud del flujo térmico específico ( $q$ ) desde los productos de la combustión a la carga de la pólvora, se distinguen del régimen de inflamación.

- El régimen de adición débil de calor, durante  $q < \eta_T \varphi_*$ , cuando el gradiente de temperatura es menor al crítico y se alcanza antes que la temperatura crítica de la superficie. En este caso la capa superficial al inicio acumula la cantidad necesaria de calor y luego una vez que la temperatura de la superficie llegue a ser igual a la temperatura de gasificación la pólvora se inflama.
- El régimen de fuerte adición de calor, durante  $q > \eta_T \varphi_*$ , cuando la temperatura de descomposición en la superficie del combustible se alcanza antes que el gradiente crítico de temperatura en la superficie. Después de alcanzar la temperatura crítica de la superficie la adición posterior del calor provoca una gasificación forzada de la capa superficial, hacia la cual se va parte del calor

adicionado, además el flujo térmico hacia la superficie se va a debilitar por los gases que la recorren. Como resultado el gradiente de temperatura en la cámara comienza a caer y cuando alcanza el valor crítico se produce la inflamación estable.

En el régimen de fuerte adición el inicio de la inflamación condicionalmente también se puede considerar cuando se alcanza la temperatura crítica de la superficie, ya que comenzando desde este momento se produce la gasificación del combustible.

Este es aproximadamente el cuadro físico de inflamación de la pólvora, que se deduce de la teoría de combustión no estacionaria, desarrollado por Y B Sieldovich. Concepciones similares sobre la esencia del proceso inflamador fue expresadas por K. K. Andreer [8].

Los trabajos señalados se basan en el modelo valido básicamente para las sustancias volátiles que no se descomponen en la fase condensada. Aparte de esto, este modelo no prevee las condiciones de inflamación en los productos gaseosos.

Por lo visto la consideración de las reacciones químicas en la fase condensada es el elemento necesario en la teoría de encendido de los combustibles sólidos de cohete.

El intento de considerar las reacciones exotérmicas que se desarrollan en la fase condensada durante la inflamación han hallado su expresión en el modelo térmico de D. Dreiser y B Heaks [9]. Ellos estudiaron el proceso de inflamación de una lamina semi infinita de combustible sólido, hacia la cual desde el lado de la superficie plana se adicionaba un flujo calorífico (térmico) (Fig. 2.1)

En la suposición de desarrollo en el combustible de las reacciones exotérmicas de orden cero con un efecto térmico  $U$  y de la preparación del calor en la masa combustible de acuerdo con la ecuación de conductividad de calor.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = x_r \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{U}{c_T p} e^{-\frac{E_a}{R\theta}} \quad (2.3)$$

Donde :  $\frac{\partial \theta}{\partial t}$  Es la conductividad de calor  
 U Es el efecto térmico

(La magnitud U incluye el así denominado multiplicador pre exponencial)

Las condiciones limites para la ecuación (2.3) tiene la forma

$$- \eta_r \frac{\partial \theta}{\partial y} = q_o = \alpha(T - \theta_o) \text{..cuando..} y = 0, t > 0,$$

$$- \eta_r \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0 \quad \text{cuando..} y \longrightarrow \infty, t \geq 0.$$

Como el segundo sumando en la parte derecha de (2.3) depende no linealmente de la temperatura  $\theta$ , obtener una solución analítica de carácter específico de esta función permite desarrollar métodos simplificados de solución.

Señalaremos la particularidad de la solución determinado por una relación exponencial entre la intensidad de la generación del calor debido a las reacciones exotérmicas y a la temperatura  $\theta$ . Después de alcanzar la temperatura característica  $\theta^*$  la generación del calor crece tan fuerte que el aumento posterior de la temperatura de la superficie del combustible hasta la temperatura de combustión se produce casi instantáneamente ósea prácticamente no requieren una adición suplementaria de calor desde una fuente externa, de tal manera que el proceso de inflamación se produce como si fuera espontáneo. Hasta alcanzar la temperatura característica  $\theta^*$ , la generación de calor interna es tan poco efectiva que se puede despreciar, reemplazando la solución (2.3) por la solución de la ecuación de la conductividad de calor sin considerar las reacciones exotérmicas en la fase condensada.

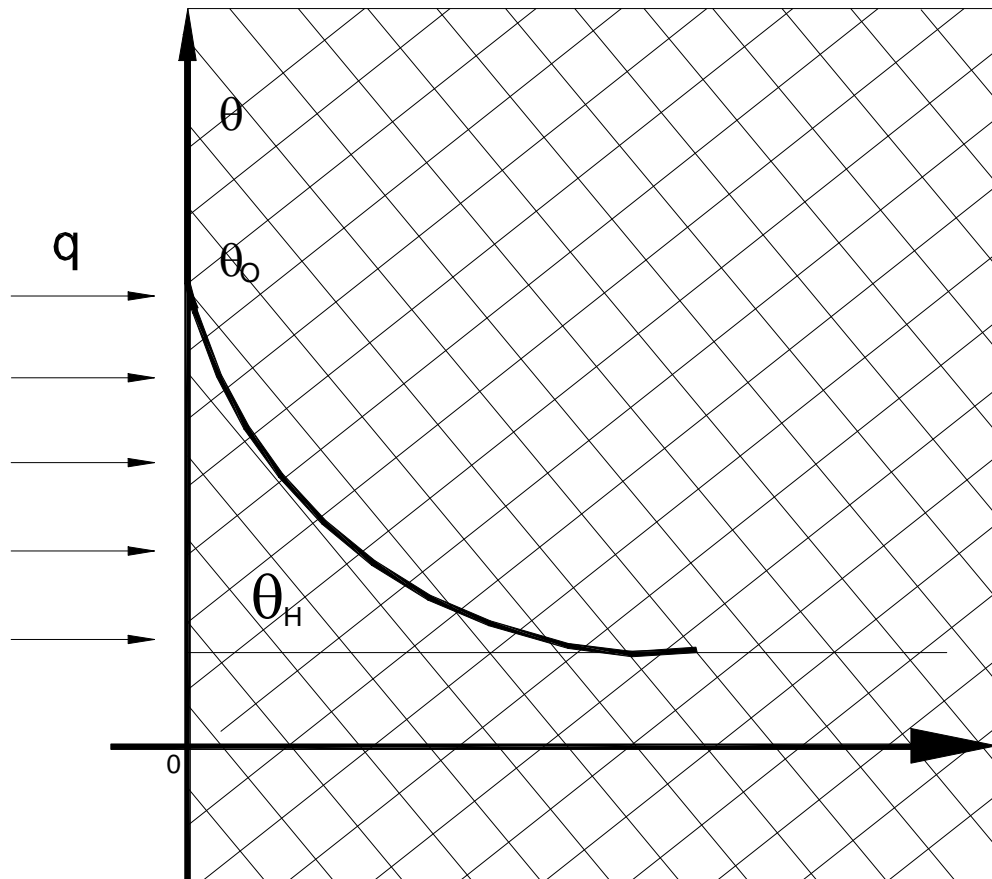


Figura 2.1 PROCESO DE INFLAMACIÓN DE UNA LAMINA SEMI INFINITA DE COMBUSTIBLE SÓLIDO, HACIA LA CUAL DESDE EL LADO DE LA SUPERFICIE PLANA SE ADICIONA UN FLUJO CALORÍFICO

Como temperatura característica  $\theta^*$  condicionalmente se entiende a aquella temperatura durante la cual la generación (desprendimiento) de calor debido a las reacciones químicas en la fase condensada comienza a ser un porcentaje lo suficientemente susceptible de la cantidad de calor transmitido desde la fuente externa o el extraído de la zona de reacción

$$\theta^* > 0,05Ea/R.$$

De esta manera desde la posición de la teoría térmica de la inflamación se debe considerar, que la inflamación se produce cuando se alcance la temperatura característica de la superficie del combustible, que garantiza la obtención de la velocidad crítica de generación de calor en la fase condensada. Correspondientemente la condición de inflamación es el calentamiento de combustible hasta la temperatura crítica respectiva.

La temperatura crítica  $\theta^*$ , puede ser hallada teóricamente como el punto en el cual se observa una divergencia notable de las curvas de la función de la temperatura de la superficie del combustible  $\theta_0$ , respecto al tiempo construido mediante la solución de la ecuación (2.3) considerando y sin considerar el desprendimiento del calor en la fase condensada.

Nos detendremos brevemente al desarrollo de los elementos del modelo físico de la teoría de encendido basado en el desprendimiento del calor en la fase gaseosa. La teoría habla sobre la inflamación del combustible en base a los procesos de intercambio de calor y reacciones químicas en la capa de los gases adyacentes a la superficie del combustible. Como resultado del calentamiento de la superficie de la carga, los productos de la descomposición del combustible que se evaporizan desde la superficie ingresan al medio gaseoso de los alrededores. Generalmente el componente comburente tiene una velocidad más alta de descomposición que los cristales del oxidante, por esta razón el comburente rápidamente pasa a un estado gaseoso. Los vapores del combustible que se forman en la superficie, son ricos en componentes comburentes, entran en reacción entre sí y también con el oxígeno que se encuentra en el medio de los alrededores. Cuando la cantidad de calor generada químicamente llega a ser igual a las pérdidas de calor como resultado



de la conductividad de calor al medio de los alrededores, se produce la inflamación de combustible.

El criterio de inflamación, utilizado en la teoría de encendido en la fase gaseosa de acuerdo con el modelo descrito arriba tiene la forma.

$$q_r = q_n ; \quad \left( q_n = -\eta_r \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (2.4)$$

Donde  $q_r$  -es la velocidad de la generación de calor debido a las reacciones en la capa gaseosa a la superficie de la carga.

$q_n$  -es el flujo calorífico de la capa gaseosa al medio externo.

$T$  ,  $\eta_r$  -son la temperatura y la conductividad de calor del gas en el medio adyacente a la superficie.

El empleo practico del criterio (2.4) en el proceso de inflamación de la carga en las configuraciones que se utilizan ampliamente de los motores, provoca grandes dificultades debido a la no claridad de que manera calcular las magnitudes  $q_r$  y  $d^2T/dy^2$  considerando el recorrido de la superficie inflamada por el flujo de gas.

En los últimos tiempos se ha propagado la tal denominada teoría de encendido heterogéneo. En base a esta teoría se encuentra la hipótesis, sobre el rol principal en el proceso de encendido de los combustibles sólidos híbridos que juegan las reacciones heterogéneas entre oxidante gaseoso y los aglutinantes condensados, que se desarrollan directamente en la superficie inflamada, o en la capa superficial en el limite de separación de los granos del oxidante y del comburente. Las reacciones heterogéneas tienen lugar durante la así denominada inflamación hipergolica (autoinflamación) de los combustibles sólidos mediante el contacto con el oxidante liquido o gaseoso químicamente activo.

En el caso cuando la inflamación se consigue mediante el calentamiento de la superficie del combustible con los productos de la combustión del inflamador, de acuerdo a la teoría heterogénea de encendido inicialmente se produce la

sublimación del oxidante, cuyos productos luego entran en reacción con el aglutinante. Durante una inflamación normal de desprendimiento de calor debido a esta reacción heterogénea exotérmica supera las pérdidas de calor lo que provoca el crecimiento de la temperatura de la superficie hasta el valor crítico, durante el cual de forma espontánea aparecen las reacciones auto sostenidas lo que en sí se considera como encendido del combustible.

El estado de la combustión estacionaria se consigue más adelante sin la adición de energía desde el inflamador.

Los resultados publicados de la investigación experimental del mecanismo de encendido está de cierta manera limitado y permiten obtener determinados conceptos sobre la naturaleza de los procesos estudiados solamente aplicable al modelo térmico.

Señalaremos que ninguna de las teorías de encendido no entran en el marco de heterogeneidad, factor que para los combustibles híbridos juega un papel importante, ya que la zona de calentamiento durante una adición intensa de calor puede ser menor a las medidas de las partículas, lo que inevitablemente debe influir en el carácter de desarrollo de los procesos de encendido.

A pesar de la ausencia de concepciones únicas sobre el mecanismo de encendido del combustible sólido se puede resaltar las siguientes posiciones que encierra u otras medidas que son genéricas y reflejan los conocimientos acumulados y la experiencia. La inflamación del combustible sólido se produce como resultado de formación sobre su superficie de productos de la gasificación que calentándose, reaccionan entre sí y con la superficie del combustible, como resultado del cual aparece la llama. De esta manera, en todos los casos para la inflamación del combustible sólido es necesario el calentamiento previo de su superficie hasta una temperatura, durante la cual comienza la formación intensa de los productos de la gasificación o se excitan las reacciones exotérmicas.

Para las composiciones balísticas la formación de la llama sobre la superficie no es condición suficiente de una inflamación estable; se requiere todavía calentar la capa superficial de la carga en una determinada profundidad para que la cantidad

de calor acumulada, calculada por unidad de superficie de la carga sea comparable con el calor que se encuentra en la capa caliente del combustible que arde estacionariamente para las condiciones dadas.

Por consiguiente las principales condiciones de encendido estable del combustible balístico pueden ser presentadas de la siguiente forma:

- Calentamiento de la superficie del combustible hasta la temperatura de descomposición o desarrollo de las reacciones exotérmicas en la capa caliente, haciendo notar que la magnitud de esta última depende de la velocidad de calentamiento y del mecanismo de encendido.
- Transferencia de determinada cantidad de calor a la carga calculada por unidad de superficie (creación del gradiente crítico de temperatura de la fase condensada en la superficie).

Para los sistemas con una reacción en la fase condensada la última condición puede ser no sustancial.

La duración de la inflamación del elemento de la superficie se determina por el tiempo de calentamiento de la capa superficial, ya que el tiempo de inflamación de los productos gaseosos de la sublimación es despreciablemente pequeño en comparación con el tiempo de calentamiento.

La inflamación de los combustibles híbridos es en gran medida un resultado de los procesos que se desarrollan en la fase gaseosa y en las superficies de división de los granos del oxidante y del comburente.

La principal condición de la inflamación estable es la pirolisis de determinado espesor de la capa superficial con la formación de los productos gaseosos de descomposición del aglutinante y del oxidante (si es que el medio de los alrededores no hay oxígeno).

De esta manera para el combustible híbrido la inflamación estable puede ser alcanzada cuando se caliente la superficie del combustible hasta la temperatura de pirolisis con la posterior adición de calor en una cantidad, insuficiente como para la sublimación de la capa superficial.

Tanto para los híbridos como para los compuestos balísticos la condición necesaria para la inflamación es alcanzar la temperatura crítica de la superficie del combustible y la suficiencia de la condición se predetermina por la transferencia de

una cantidad determinada de calor a través de la unidad de área de la superficie del combustible.

La diferencia consiste solamente en que para los combustibles híbridos este calor se gaste básicamente en la gasificación del aglutinante y del oxidante mientras que para los balísticos en el calentamiento de la capa superficial.

La temperatura crítica de la superficie y la cantidad crítica de calor dependen de la presión y de la temperatura inicial de la carga, de las características termofísicas del combustible, de la velocidad y del método de adición de calor, del estado de la superficie del combustible y de algunos factores secundarios. La forma general de estas ecuaciones hasta la fecha no se ha establecido. El valor de la cantidad de calor  $W_*$  en un cálculo por unidad de área y superficie de la capa calentada puede ser considerada igual a la cantidad de calor correspondiente en la capa calentada de combustible que arde estacionariamente. En este caso, optando la distribución de Michelson de la temperatura en la capa caliente, fácilmente se obtiene:

$$W_* = \int_0^{\infty} c_T p_T [\theta(y) - \theta_H] dy = \int_0^{\infty} c_T p_T (\theta_* - \theta_H) e^{-\frac{u}{x_T} y} dy = \frac{\eta_T (\theta_* - \theta_H)}{u}. \quad (2.5)$$

La cantidad de calor depende de la presión disminuyendo con su aumento

**Donde:**  $W_*$  Calor necesario

$\theta_*$  Temperatura característica

$\theta_H$  Temperatura de combustión de la carga a una  $T^\circ$  normal en  $^\circ K$

$u$  Velocidad media condicional del medio continuo

$\eta_T$  Coeficiente de llenado volumétrico del combustible

$C_T$  Calor específico

De acuerdo a la formula (2.5), la cantidad critica del calor  $W^*$  depende de la presión, disminuyendo con su aumento. Por lo visto, el uso de la función (2.5) para determinar las condiciones criticas de la inflamación esta fundamentado solo para las composiciones balísticas.

## **2.2 Modelo físico del proceso de inflamación de la carga en la cámara de combustión**

Para un enfoque simplificado que hace tiempo ha sido adoptado en la práctica de los cálculos balísticos que es el proceso de inflamación en la cámara de combustión de los Motores Cohete de Combustible Sólido se puede considerar como instantáneo. Ósea el tiempo entre el momento de iniciación de la inflamación y el momento de que se cubra totalmente la carga con llama no se toma en cuenta. La curva de la presión en la cámara de combustión en este caso se calcula comenzando desde cierto nivel condicional, denominado presión de inflamación, que se determina por ejemplo, como la presión desarrollada por el dispositivo inflamador durante la combustión cuando arde en el volumen cerrado de la cámara. El enfoque excluye la necesidad de examinar el proceso de combustión del inflamador y del encendido de la carga.

El desarrollo de los Motores de Cohetes de Combustible Sólido de grandes dimensiones requiere un estudio mas profundo del proceso inflamatorio.

Un impedimento considerable en el camino de construcción del modelo físico del proceso de inflamación de la carga del combustible sólido en la cámara ha sido la ausencia de comprobación experimental sobre las nociones de carácter de comportamiento del proceso investigado.

Examinaremos el modelo físico no estacionario hipotético en cierta medida de los procesos de inflamación en la cámara del motor que tienen lugar en el periodo de inflamación y entrada del motor en el régimen, cuya descripción de cierta manera critica las nociones acumuladas y refleja las particularidades específicas del proceso [1]

Cogeremos la configuración más común del motor cargado con una carga que arde por el canal y con un inflamador A en el fondo delantero Fig. 2.2

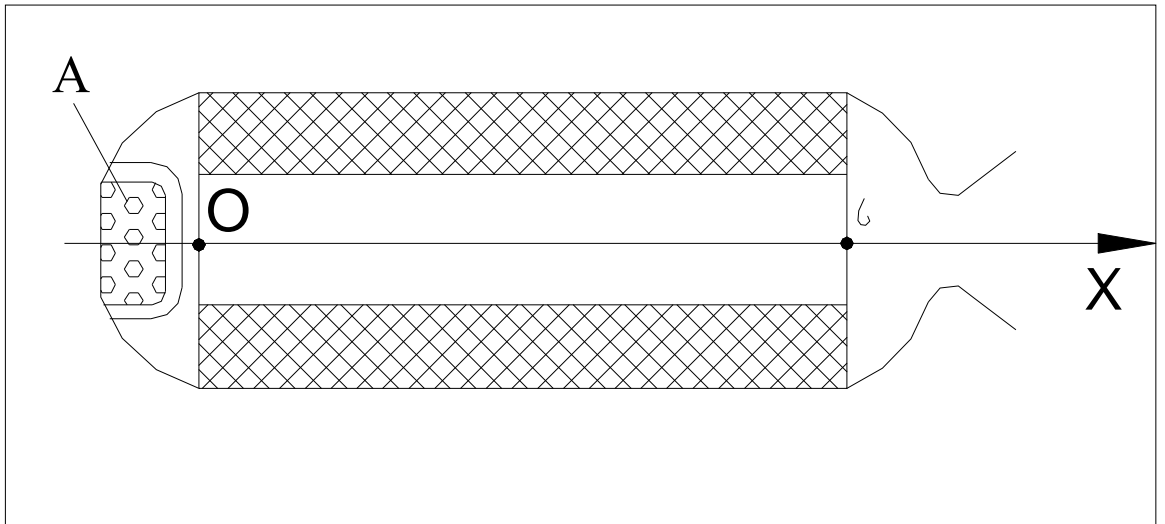


Figura 2.2 CONFIGURACIÓN MÁS COMÚN DEL MOTOR CARGADO CON UNA CARGA QUE ARDE POR EL CANAL Y CON UN INFLAMADOR “A” EN EL FONDO DELANTERO

### 2.2.1 FASE PREVIA AL PROCESO DE INFLAMACION

Generalmente la inflamación se produce mediante el envío de un impulso eléctrico al pirócartucho que dirige la fuerza de la llama a la composición inflamatoria. Señalaremos que el ingreso de los productos de la combustión de la piro composición a la cámara del motor puede provocar la aparición de un salto de la presión en la cámara, como esto se ve por ejemplo, de la curva característica de variación de la presión en la parte inicial de trabajo del motor mostrado en la Fig. 2.3

La fuerza de la llama del pirócartucho calienta al componente inflamador y gradualmente lo enciende.

El propio proceso de encendido del componente inflamador se desarrolla en el tiempo:

- Al inicio se encienden los granos de la carga del compuesto inflamador, sobre los cuales de manera directa actúa la fuerza del pirócartucho.
- Después del cual la llama se propaga a los granos vecinos de la carga del compuesto inflamador.
- Los productos de la combustión del compuesto inflamador a través de la envoltura protectora del cuerpo del inflamador ingresan a la cámara de combustión del motor.

Comenzando desde este momento, la presión en la cámara de combustión se incrementa, lo que propiamente se considera el inicio del periodo de inflamación.

El tiempo  $t_{3g}$  desde el envío del impulso de la corriente al pirócartucho (o fuente de incandescencia) hasta el inicio del proceso estable de crecimiento de la presión en el motor lo vamos a llamar “tiempo de retardo del encendido” del compuesto inflamador.

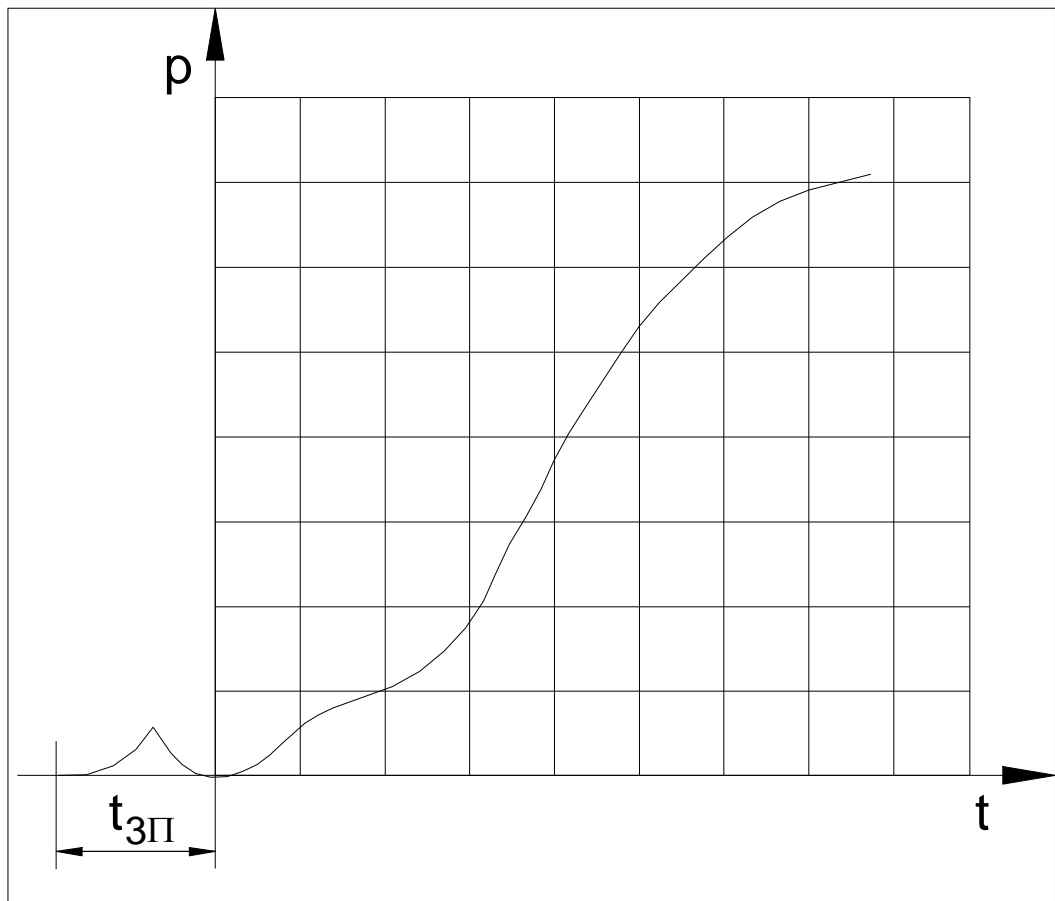


Figura 2.3 CURVA CARACTERÍSTICA DE VARIACIÓN DE LA PRESIÓN EN LA PARTE INICIAL DE TRABAJO DEL MOTOR



## 2.2.2 PRIMERA FASE DEL PROCESO DE INFLAMACIÓN

### **Propagación del frente de llama de los productos de la combustión por el canal de la carga del Combustible Sólido.**

Después de la inflamación la combustión de los elementos de la carga de Compuesto Inflamador, se produce ya sea en el volumen libre de la cámara (en caso de utilizar un cuerpo no destructible), o en el propio cuerpo del inflamador, desde el cual los productos de la combustión ingresan a la cámara de combustión del motor a través de los orificios del caudal.

Los productos de la combustión (2) del Compuesto Inflamador (1) llenan el volumen libre en el fondo delantero y desplaza al aire (4) del canal de la carga. Durante esto el frente de los gases calientes del Compuesto Inflamador, generalmente concebido en forma de una superficie plana (3), que divide los productos de la combustión del Compuesto Inflamador y el aire, se desplaza a lo largo del canal, ver Fig. 2.4

Al mismo tiempo la onda de la presión, cuya velocidad en condiciones normales es superior a la velocidad del frente señalado, también se propaga por el canal, provocando el aumento de la presión del aire en el canal y en el volumen antes de la tobera de la cámara de combustión. Mas adelante la onda de la presión reflejándose del fondo posterior, se propaga en dirección contraria e interactúa con la división de contacto; en este periodo en el volumen libre de la cámara de combustión tiene lugar un cuadro complicado de interacción de las ondas. En determinadas condiciones la onda de presión, propagándose en el medio de aire puede degenerar en una onda de choque. El aumento de la presión del aire en el volumen antes de la tobera provoca la destrucción del tapón de tobera sellante, después del cual comienza el proceso de descarga del aire, que dura hasta que la división de contacto no alcance la sección de salida del canal y los productos de la combustión del Compuesto Inflamador no cubra por completo el volumen libre del motor.

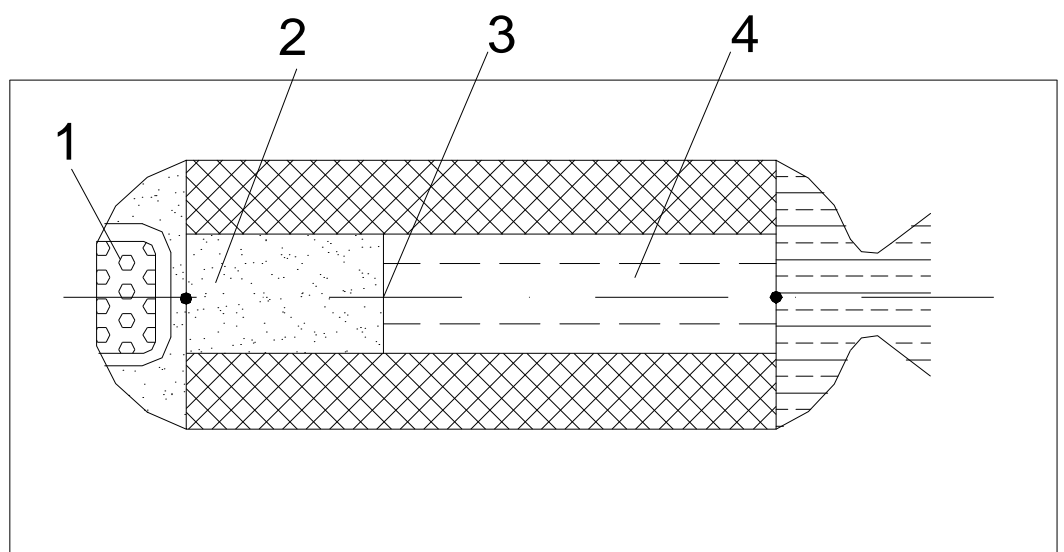


Figura 2.4 **PRIMERA FASE DEL PROCESO PROPAGACIÓN DEL FRENTE DE LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN DEL INFLAMADOR POR EL CANAL**

1. Combustión del compuesto inflamador
2. Llenado del volumen libre en el fondo delantero y desplazamiento del aire del canal de la carga
3. Frente de los gases calientes del compuesto inflamador
4. Productos de la combustión del compuesto inflamador y el aire, se desplaza a lo largo del canal

La destrucción del tapón provoca la aparición de la onda de depresión, que se propaga por el volumen libre de la cámara de combustión. Si el inflamador está ubicado en la parte de tobera de la cámara, entonces en el transcurso de la primera fase los productos de la combustión del Compuesto Inflamador desplazan el aire del canal al volumen libre en el fondo delantero, simultáneamente parte de los productos después de la destrucción del tapón sale a través de la tobera.

En la primera fase se produce un calentamiento parcial de la superficie de la carga. Se puede suponer que el elemento de la superficie comienza a calentarse después de que por él haya pasado el frente de los gases del Compuesto Inflamador y despreciar el efecto insignificante del aumento de la temperatura del aire desplazado debido a la compresión y la acción de los flujos radiacionales a través del medio aéreo.

De este modo ya en el primer periodo se han dado las condiciones del calentamiento no equivalente de las diferentes zonas de la superficie de la carga, lo que condiciona el inicio desigual de la inflamación de estas zonas. Se debe señalar que la fuerza de la llama del pirócartucho en una serie de casos puede propagarse a una considerable profundidad en el canal y provocar el movimiento del aire que parcialmente se mezcla con los productos de la combustión del Compuesto Inflamador, por esta razón la noción sobre la presencia de un límite claro que dividen los gases de del Compuesto Inflamador y el aire, en cierta medida es condicional.

### **2.2.3 SEGUNDA FASE DEL PROCESO**

#### **Combustión del compuesto inflamador y calentamiento de la superficie de la carga del combustible sólido**

Durante la segunda fase se produce la combustión solamente del Compuesto Inflamador, cuyos productos de la combustión cubren la superficie de la carga y salen a través de la tobera, ver Fig. 2.5

Se produce el calentamiento de toda la superficie de la carga por convección, por radiación y por el contacto directo de las partículas ardientes del compuesto inflamador, que son llevados por el flujo y que se precipitan sobre la superficie. Durante el segundo periodo los diferentes elementos de la superficie de la carga también se encuentran en condiciones equivalentes de calentamiento debido a la variación de los parámetros de flujo sobre todo de la velocidad condicionado por la variación y no estacionaridad de la estructura de la capa limite y que varia a lo largo del canal.

La segunda fase se prolonga hasta que las condiciones en cierta parte de la superficie de la carga principal, que esta sometida a un calentamiento más intenso no alcanzan las condiciones críticas de inflamación. Como se mostró antes los conocimientos modernos sobre el mecanismo de encendido de los combustibles sólidos no permiten establecer con una suficiente determinación las condiciones de encendido, por esta razón con la finalidad de concretizar estas condiciones mas adelante vamos hablar sobre el alcance de la temperatura critica de inflamación.

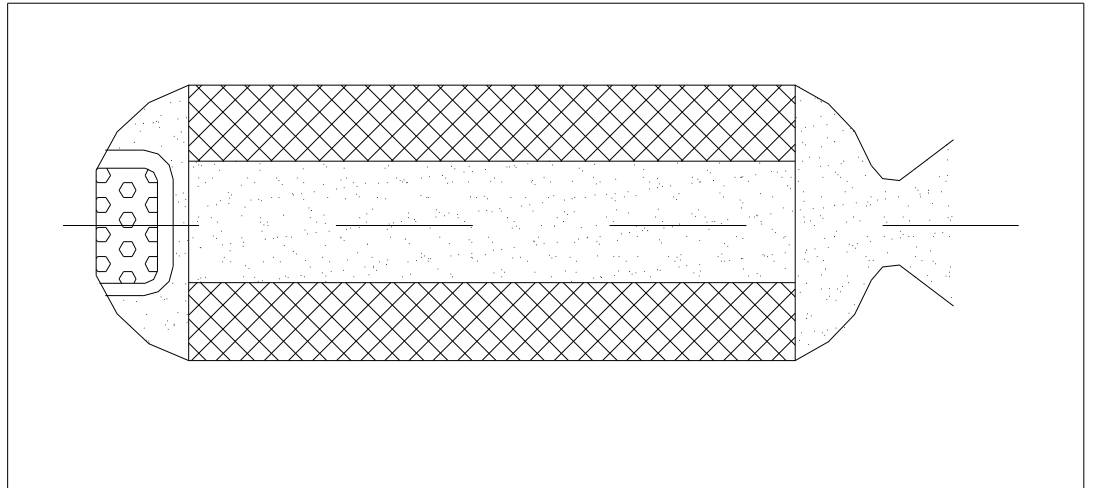


Figura 2.5 **SEGUNDA FASE DEL PROCESO COMBUSTIÓN DEL INFLAMADOR Y EL CALENTAMIENTO DE LA SUPERFICIE DE LA CARGA**

## 2.2.4 TERCERA FASE DEL PROCESO

### **Propagación de la llama por la superficie de la carga del combustible sólido**

Después de la inflamación de una parte de la carga principal del combustible sólido, los productos gaseosos de la combustión que se forman en el proceso de combustión mezclándose con los productos del compuesto inflamador continuaran calentando la parte restante de la pólvora, como resultado de dicho proceso, la zona en la cual se alcanzan las condiciones criticas de inflamación se propaga por la superficie de la carga (por el canal) en forma de un frente de llama (ver Fig. 2.6)

En este periodo se produce una variación sustancial de las condiciones del flujo y del calentamiento de la carga a lo largo del canal, condicionado por los siguientes factores.

1. El desplazamiento del frente de llama conlleva a la variación de la estructura de la capa limite en la zona inflamada de la superficie de la carga; esta perturbación provoca una deformación de la capa limite que se propaga con la velocidad del sonido, este ultimo deberá provocar la variación de las condiciones del calentamiento, ya que la velocidad del sonido, evidentemente sustancialmente supera la velocidad de propagación del frente de llama.
2. Los productos de la combustión de la parte inflamada de la carga ingresan al canal y se mezclan con el flujo principal. El frente de estos productos se mueve por el canal con la velocidad del flujo. Es natural suponer, que la velocidad del flujo supera a la velocidad de propagación del frente de llama por el canal. En este caso el flujo mezclado de los productos de la combustión del Compuesto Inflamador y del combustible se adelanta al frente de llama y cubre la superficie

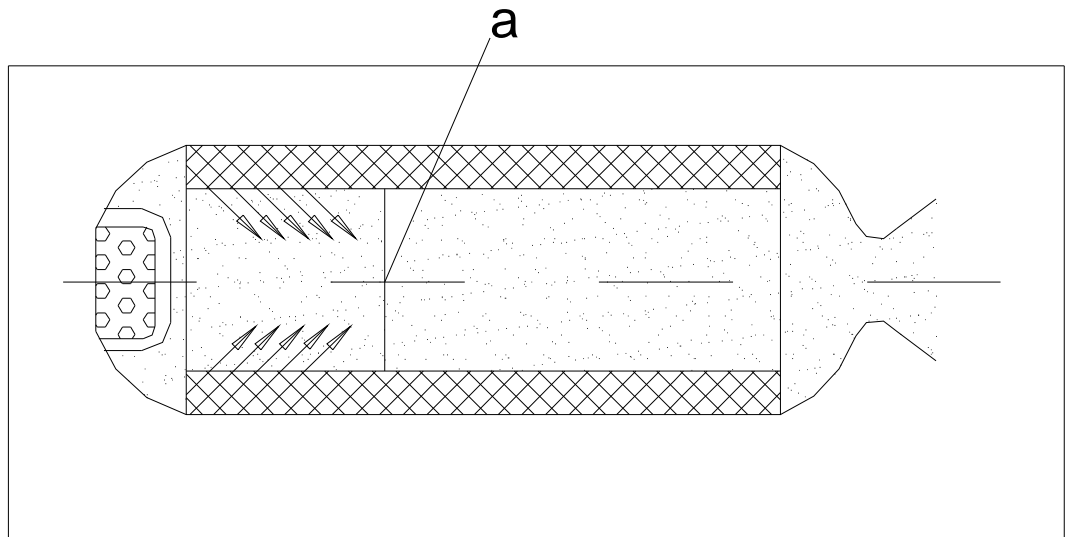


Figura 2.6 **TERCERA FASE DEL PROCESO PROPAGACIÓN DE LA LLAMA POR LA SUPERFICIE DE LA CARGA.**

todavía no inflamada, lo que provoca un calentamiento mas fuerte de la superficie del canal.

3. Un ingreso adicional de los productos de la combustión de la parte inflamada del combustible al canal provoca la propagación en el flujo de ondas de presión que se desplazan con la velocidad del sonido, que continuamente varia los parámetros del flujo en el canal.

Para el caso cuando el inflamador esta ubicado en la parte de tobera el cuadro se complica aun más ya que el flujo en la cámara no tiene una dirección, parte de los productos salen a través de la tobera y parte llena el volumen libre de la cámara.

Hay que señalar que el cuadro de desplazamiento de una dirección del frente de llama de por sí solo es hipotético. El uso de compuestos inflamadores pirotécnicos, que tienen un considerable contenido de partículas condensadas en los productos de la combustión, puede provocar una inflamación local de fuego de las zonas de la superficie sometidas al calentamiento por las partículas que llegan a estar en la superficie por acción de la gravedad, de las pulsaciones turbulentas en el flujo o debido a la presencia del componente transversal inicial de la velocidad.

La propagación de la llama por la superficie del combustible en este caso tiene un carácter de unión de las fases de inflamación, y el concepto de velocidad de propagación del frente de llama tiene un carácter condicional debido a la ausencia de un frente único.

Esta fase del proceso culmina en el momento, cuando toda la superficie de la carga esta cubierta de llama.



## 2.2.5 CUARTA FASE DEL PROCESO

### **Combustión conjunta de la carga principal y de los residuos del compuesto inflamador. Entrada del motor al régimen estacionario de trabajo.**

En el momento de la inflamación total de la carga en la cámara de combustión, puede quedarse parte del compuesto inflamador, que termina de quemarse en el periodo cuando la carga principal completamente ya participa en el proceso de combustión (ver Fig.2.7). Los productos de la combustión de la carga principal y de los residuos del Compuesto Inflamador parcialmente salen del motor y parcialmente se van al llenado del volumen libre de la cámara. Este ultimo esta condicionado por el hecho de que la superficie de la carga se cubre de llama a presiones relativamente bajas, generalmente muy inferior que la presión estacionaria en la cámara, por esta razón el ingreso de los productos de la combustión supera al gasto y la presión en la cámara se incrementa.

Mas adelante a medida que se incrementa la presión se produce la igualación del ingreso y del gasto; los residuos de las composiciones inflamatorias completamente arden y el motor entra al régimen estacionario de trabajo. En el motor con el inflamador en el fondo de tobera la cuarta fase del proceso se desarrolla de manera similar.

Esto es en líneas generales el modelo físico del proceso de inflamación de la carga del combustible sólido en la cámara de combustión, la descomposición mostrada en el cuadro general del proceso y la división del proceso en fases seguramente limitadas en cierta forma es condicional, debido a las particularidades impuestas por las condiciones concretas.

El desarrollo del proceso puede cambiar en forma. Así por ejemplo, el inicio de la inflamación de la carga puede comenzar antes de que se bote

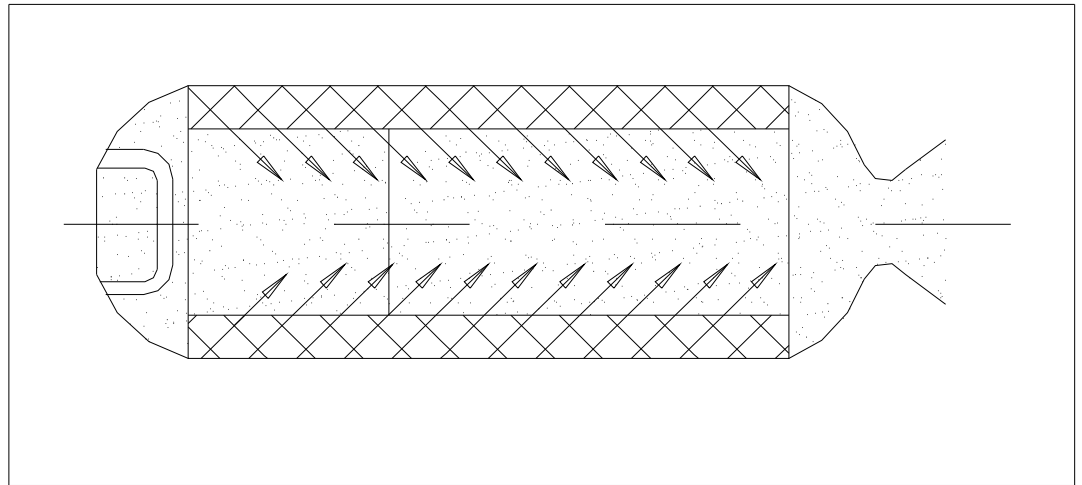


Figura 2.7 **CUARTA FASE DEL PROCESO COMBUSTIÓN CONJUNTA DE LA CARGA PRINCIPAL Y DE LOS RESIDUOS DE LA COMPOSICIÓN INFLAMATORIA. LA ENTRADA DEL MOTOR AL REGIMEN ESTACIONARIO,**

completamente el aire de la cámara de combustión, en este caso la segunda fase se junta con la primera.

La combustión de la composición inflamatoria puede finalizar antes de la inflamación completa de la carga lo que varía el carácter del desarrollo de la tercera y cuarta fase. Simultáneamente a pesar de las particularidades específicas predeterminadas por unas u otras condiciones particulares, las leyes generales de los fenómenos se propagan a todos los casos individuales.

### **2.3 Principales principios y suposiciones utilizados durante la construcción del modelo matemático del proceso de inflamación**

La principal base para construir el modelo matemático del proceso inflamatorio en la cámara de combustión del Motor Cohetes Combustible Sólido es el aparato de la teoría de los flujos unidimensionales en el canal de la carga, las relaciones que se deducen de las leyes de conservación de la masa y de la energía, las ecuaciones de intercambio de calor entre los productos de la combustión y de la carga y una serie de funciones especiales.

Antes de pasar a describir matemáticamente el proceso inflamatorio que se producen en el motor, cargado en una carga que arde desde el canal (ver Fig. 2.2), nos detendremos a analizar los principales principios en que se fundamenta el modelo matemático de la inflamación.

Son posibles los siguientes enfoques principales para construir el modelo matemático

- La descripción matemática del proceso de inflamación con la ayuda de ecuaciones en derivadas parciales, que permiten tomar en cuenta la

variabilidad de las magnitudes físicas en el espacio del volumen libre de la cámara y en el tiempo.

- La descripción matemática del proceso de inflamación con ayuda de un sistema de ecuaciones diferenciales comunes mediante la promediación de las magnitudes físicas en todo volumen libre de la cámara.
- El empleo del método de promediación de las magnitudes físicas por los volúmenes de las zonas típicas para describir el proceso de inflamación con ayuda de ecuaciones diferenciales comunes.

Caracterizaremos la esencia de cada uno de estos enfoques.

La descripción del proceso de inflamación con ayuda de ecuaciones en diferenciales parciales se basa en la teoría de flujos no estacionarios en el canal de la carga y en la cámara de combustión.

En la supervisión de un carácter unidimensional del movimiento de los productos de la combustión de la composición inflamadora y del combustible en calidad inicial se puede utilizar el sistema de ecuaciones de un flujo unidimensional no estacionario en el canal con un ingreso de gas distribuido, si es que los productos de la cámara de combustión se consideran como un gas ideal homogéneo, o si es que se considera un flujo de doble fase condicionado por la presencia en los productos de la combustión de partículas condensadas. A las relaciones gasodinámicas señaladas se deberá añadir el sistema de ecuaciones en derivadas parciales, que describe el proceso no estacionario de transferencia de calor y de la masa en la capa superficial de la carga del combustible sólido, esta solución permite registrar el momento de inicio de la inflamación de cada parte de la superficie a lo largo de la carga (en un caso simple se considera una ecuación de la conductividad de calor no estacionario).

Las condiciones iniciales y límites para el sistema de ecuaciones obtenido en derivadas parciales se formulan considerando lo específicos de cada motor y

aplicable al modelo físico adoptado del proceso. La descripción de las condiciones límite varia cuando se pasa de una fase del proceso a otro (rigurosamente hablando, varia un poco y la propia estructura de las ecuaciones: así los términos que caracterizan el ingreso de gas adicional desde la superficie lateral del canal deberán considerarse solamente después de la inflamación de la superficie.

Examinaremos mas adelante el segundo método de construcción del modelo matemático del proceso de inflamación, en cuya base se fundamenta el principio de promediación total de la presión, de la densidad y de la temperatura de los productos que llenan la cámara de combustión en su volumen libre.

Las ecuaciones diferenciales que describen la variación de las magnitudes promedios en el tiempo se construyen mediante el uso de la ley de conservación de la sustancia y de la energía en toda la masa de los productos que llenan el volumen libre. El método de promediación total en el volumen libre, puede considerarse como una aproximación cero de un modelo más general, que toma en cuenta la variación de las magnitudes física no solamente en el tiempo, sino en el espacio del volumen libre.

El empleo de la teoría de dimensión cero para describir el proceso de inflamación permite sustancialmente simplificar el aparato matemático que se presente en este caso como un sistema de ecuación diferenciales comunes.

La principal desventaja de este enfoque consiste en la necesidad de simplificar sustancialmente e inclusive la distorsión del cuadro físico del proceso, ya que la promediación de las características físicas en todo el volumen libre no permite tomar en cuenta las particularidades gasodinamicas de interacción de los productos heterogéneos, la variación de la presión de la densidad, de la temperatura y de la característica termodinámica de los productos a lo largo de la cámara y la dinámica de propagación del frente de llama por la superficie de la carga.

Con la finalidad de corregir aunque sea parcialmente las desventajas señaladas conservando el modelo matemático, del sistema presentado de ecuaciones diferenciales comunes, se puede proponer el principio de promediación de las magnitudes físicas en volumen separado de la zona típica.

El empleo de este principio no supone una total exclusión de la consideración de la variabilidad de las magnitudes físicas a lo largo de la cámara de combustión, ya que mediante la división de la cámara en volúmenes típicos y el empleo de las leyes de conservación de los productos, que llenan estos volúmenes, se consigue en cierta medida considerar la variación de ciertas magnitudes no solamente en el tiempo sino a lo largo de la longitud. Semejante método que es en esencia la teoría de dimensión cero modificado, es la base de la descripción matemática mostrada mas abajo del proceso de inflamación.

Antes de pasar a describir la materia propia de este subcapitulo debemos examinar y fundamentar ciertas simplificaciones principales, que se utilizan durante la descripción matemática del proceso de inflamación.

Vamos a suponer, que los productos de la combustión del inflamador y su mezcla con los productos de la combustión del combustible son un medio homogéneo continuo en forma de una gas ideal no viscoso, aunque para la mayoría de las composiciones inflamatorias y para los combustibles metalizados los productos de la combustión son una mezcla de productos gaseosos que arden en partículas oxidadas y también en residuos sólidos arrastrados por el flujo; el porcentaje en peso de las partículas en los productos de la combustión puede ser durante estos muy pequeños algunas décimas.

De esta manera los productos que llenan la cámara de combustión durante el periodo inflamatorio se pueden considerar solamente como un medio continuo, en forma hipotética. Vamos a diseminar el concepto de la presión, la densidad, la temperatura y de las características termodinámicas del modelo del mismo.

La densidad masica de las condiciones del medio continuo lo determinaremos de la relación,

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{M_r + M}{\Delta V} \quad (2.6)$$

Donde  $M_r$  y  $M_q$  son las masas del gas y de las partículas en el volumen.

La magnitud  $\rho$  es la densidad local, que tendría el medio durante una solución uniforme de partículas condensadas en ella.

La presión del medio continuo hipotético va a igualar con la presión en la fase gaseosa. Suponiendo que la temperatura de las partículas es igual a la temperatura de la fase gaseosa vamos a llegar a una magnitud determinada de la temperatura del medio examinado. Si la temperatura del gas sustancialmente se diferencia de la temperatura de las partículas, consideraremos en calidad de temperatura condicional del medio determinados de la igualdad de las energías internas de las unidades del volumen del medio continuo y de doble fase.

La constante de gas del medio condicional continuo lo determinaremos de tal manera que para el medio se cumpla la condición del estado del gas ideal. Con esta finalidad previamente transformaremos la ecuación 2.6.

Como las partículas condensadas debido a su alta densidad ocupan una parte pequeña del volumen gaseoso, la densidad del medio continuo hipotético puede ser expresado en la forma de la ecuación

$$\rho = \rho_r(1 + g_q) \quad (2.7)$$

donde  $g_q$  es el porcentaje de peso de las partículas en la mezcla de doble fase, o la relación de las masas de las partículas entre la masa por unidad de volumen.

Suponiendo que la fase gaseosa es un gas ideal, tenemos

$$p = \rho_r R_r T_r = \rho_r R_r T$$

Donde:

**P** Presión de los productos de la combustión

**R<sub>r</sub>** Constante específica del gas

**T<sub>r</sub>** Temperatura en la cámara de combustión

**ρ<sub>r</sub>** Densidad de los gases en la cámara

De donde se deduce que

$$p = \rho \frac{R_r}{1 + g} T = \rho \frac{R_r}{1 + g} T \quad (2.8)$$

Suponiendo que la fase gaseosa es un gas ideal tenemos que la ecuación 2.8 se ve que el medio continuo modelo puede considerarse como gas ideal cuya constante de gas específica se expresa a través de la constante específica del gas R de la fase gaseosa a través de la relación

$$R = \frac{R_r}{1 + g} \quad (2.9)$$

De esta manera introduciendo hasta cierto punto algunos conceptos condicionales de la densidad de la temperatura y de la constante específica del gas y del medio modelo se consigue igualarlo con un gas ideal.

Simultáneamente para el medio continuo condicionado adoptado puede ser utilizando la expresión conocida para el caudal o gasto a través de la tobera

$$G_{kp} = \varphi_2 \Gamma(k) \frac{p F_{kp}}{\sqrt{RT}} \quad (2.10)$$

Donde: **G<sub>kp</sub>** Gasto o caudal a través de la tobera

**R** Constante específica del gas

**T<sub>r</sub>** Temperatura en la cámara de combustión



- k** Es el exponente isoentrópico
- F<sub>kp</sub>** Area de la sección crítica de la tobera
- φ<sub>2</sub>** Gradiente de Temperatura
- P** Presión de los productos de la combustión

La magnitud del exponente isoentrópico  $k$  en la ecuación 2.10 también es reducida; ella se calcula de tal manera que la presión y la densidad del medio continuo en la cámara (el volumen pre tobera) y en la sección crítica de la tobera se relaciona entre sí por una función isoentrópica.

Hablando rigurosamente la función para el caudal en la formula 2.10 es valida solamente durante un equilibrio dinámico de las partes en la sección crítica de las toberas. El retardo de las partículas condensadas y su influencia sobre el caudal puede ser tomada en cuenta mediante la variación del coeficiente del caudal y de gastos  $\phi_2$ , que aplicable al caso de la descarga del chorro del medio de doble espacio a través de la tobera puede tomar valores superiores.

Se debe especificar también el concepto de la velocidad del medio continuo modelo durante un desequilibrio dinámico de las fases. Con esta finalidad introduciremos la velocidad media condicional del medio continuo en la sección del canal “u” para el cual el caudal del medio a través de una sección dada es igual a la suma de los caudales básicos de las fases condensada y gaseosa. Escribiendo la última condición en la forma de la siguiente ecuación

$$P_v = \rho_r V_r + g_q V_q$$

Donde  $V_r$  y  $V_q$  son las velocidades medias masicas del gas y de las partículas en la sección dada.

De aquí se deduce la velocidad del medio condicional continuo

$$v = \frac{v_r + g_4 \bar{v}_4}{1 + g_4} \quad (2.11)$$

- Donde:
- V** Velocidad del medio condicional continuo
  - V<sub>r</sub>** Velocidad masica del gas
  - V<sub>q</sub>** Velocidad media masica de las partículas
  - g<sub>q</sub>** Es el porcentaje del peso de las partículas

Suponga más adelante, que la parte de la superficie de la carga se inflama instantáneamente después de alcanzar cierta temperatura crítica  $\theta_*$ . De esta manera se excluye del análisis los problemas complicados del mecanismo del encendido y ciertos aspectos que se desarrollo en el sub-capítulo 2.1. Para el cálculo de la temperatura de la superficie de la carga inflamada se debe conocer las magnitudes de los flujos térmicos ó caloríficos desde los productos de la combustión de la composición inflamatoria y de su mezcla con los productos de la combustión del combustible hacia la parte no inflamada de la carga. Los principales tipos de transferencia de calor a la superficie de la carga son la convección obligada, la radiación y la transferencia de calor por contacto durante la precipitación y la introducción de partículas al rojo vivo a la capa superficial.

Más adelante el flujo calorífico total desde los productos inflamados hacia la superficie del canal de la carga vamos a calcularlo en la forma de una función simplificada para el intercambio de calor por convección

$$q_k = \alpha_k (T - \theta_0) = b_k \frac{\eta}{l} (\text{Re})^m (T - \theta_0). \quad (2.12)$$

Resaltando justamente la forma por convección de transferencia del calor de esta manera consideramos determinante más aún que nosotros no podemos determinar de manera fundamentada aquella parte de la cantidad de calor que se transfiere a la carga mediante la irradiación y la precipitación de partículas condensadas sobre la superficie. Naturalmente, que el coeficiente de irradiación de calor  $\alpha_k$  puede sustancialmente superar el correspondiente valor para el flujo de convección propiamente dicho.

El coeficiente  $\alpha_k$  lo determinaremos de manera similar a la transferencia de calor por convección en un tubo largo o cuando recorre una placa plana. En el primer caso en calidad de medida característica “ $l$ ” es lógico utilizar el diámetro equivalente del canal “ $d$ ”, mientras que el número de Reynolds “ $Re$ ” lo determinará según la función

$$Re = \frac{vd\rho}{\mu}$$

Donde:  $\mu$  Es el coeficiente del gasto de la tobera

Como el canal de la carga del combustible sólido no se puede relacionar como algo muy largo y tomando en cuenta, que el calculo de los flujos caloríficos que debe realizar para las secciones que se encuentran próximos a la entrada tenemos que considerar la disminución del coeficiente  $d_k$  a lo largo del canal, aunque sea en base a los datos obtenidos para el intercambio de calor en los tubos, sin embargo se tiene que tomar en cuenta, ellos se relacionan al paso del flujo de un gas homogéneo. Como los productos de la combustión de la composición inflamatoria es una mezcla de doble fase mientras el flujo calorífico de combustión se considera como condicionado el efecto total de las diferentes formas de interacción térmica o calorífica entre los productos de la combustión y la carga entonces los coeficientes  $d_k$  deberán ser aumentados respectivamente.

Si el coeficiente  $d_k$  determina sobre la base de la teoría de una capa limite laminado que fluye en forma de capas, entonces en calidad de medidas características típicas  $l$  y la función 2.12 es conveniente utilizar a la distancia a lo

largo del cese del canal desde la entrada hasta la sección dada. Aunque este enfoque parecería artificial este permite, en cierta medida tomar en cuenta la variación de la estructura de la capa límite condicionado por efectos del soplado (ver fig. 2.7)

Si es que en calidad de longitud típica se utiliza la distancia desde el punto de formación de la capa límite hasta la sección dada, el coeficiente  $d_k$  naturalmente se considera constante. Una de las dificultades durante semejante determinación del coeficiente de variación de calor  $\alpha_k$  es aquella situación cuando “ $l$ ” tiende a cero el valor  $\alpha_k$  crece ilimitadamente, ya que el exponente  $m < 1$  ( $m \approx 0.8$ ).

Como se deduce de lo descrito, el coeficiente de irradiación de calor y por consiguiente, el flujo calorífico desde los productos de la composición inflamatoria hacia la superficie no inflamada del combustible sólido puede ser calculado solamente según funciones muy simplificadas y aproximadas lo que predetermina el carácter aproximado de la descripción matemática del proceso inflamatorio.

La siguiente principal suposición consiste en que los límites de los volúmenes ocupados por los productos homogéneos (los productos de la combustión del inflamador, los productos de la combustión del combustible y su mezcla, el aire en la cámara de combustión), suponemos que la densidad, la temperatura y las propiedades termodinámicas de los productos son iguales. Consideramos que los volúmenes, ocupados por los productos homogéneos, están separados uno con respecto a otros por las superficies de la  $vi$  dirección de contacto. Esta suposición refleja la esencia del principio de la promediación parcial por zonas.

La presión en la cámara de combustión la promediamos (iguales) en todo el volumen libre de la cámara de combustión. Esta suposición se fundamenta en que prácticamente para los Motores Cohete de Combustible Sólido de todos tamaños el tiempo de propagación de las perturbaciones por el volumen libre de la cámara es pequeño en comparación con el tiempo del proceso transito de la inflamación y

de entrada al régimen y la caídas de las presiones relacionadas con la variación de la velocidad del flujo a lo largo de la longitud del cañón y por las resistencias hidráulicas es relativamente pequeño.

Suponemos que cada uno de los productos de la combustión se encuentra en un estado de equilibrio químico y termodinámico y que el contacto y el desplazamiento de los productos de la combustión entre sí y también con los residuos de aire en la cámara de combustión no provocan la aparición de reacciones químicas. Consideramos que la temperatura de la cámara de los productos de la combustión de la composición inflamadora y del combustible que ingresan al volumen libre de la cámara es constante e igual a la temperatura de la combustión de las sustancias correspondientes a una presión constante. Los efectos de la combustión incompleta y de las pérdidas caloríficas se toman en cuenta en forma de una reducción artificial de la temperatura de la combustión mediante la multiplicación por el coeficiente constante de pérdidas caloríficas ó térmicas. Despreciamos la variación del volumen libre de la cámara y de la superficie total que arde después de su inflamación debido a que el proceso estudiado es de muy corta duración en comparación con el tiempo total de trabajo del motor.

El proceso de descarga de los productos que se encuentran en la cámara a través de la tobera lo consideramos súper crítico y casi estacionario. Suponemos, que la descarga comienza después de la abertura instantánea del tapón que tiene lugar cuando se alcanza la presión crítica en la cámara de combustión. La variación del coeficiente del caudal o de gasto de la tobera en el tiempo lo va a despreciar. Las simplificaciones descritas aunque contiene en ciertas medidas elementos de un enfoque intuitivo, caracterizan en su totalidad la esencia de las simplificaciones, introducidas con la finalidad de construir un modelo matemático relativamente simple del proceso de inflamación. Con esto sin embargo no desaparecen todas las suposiciones bases de las cuales contienen un carácter más parcial lo vamos a hablar directamente en el transcurso de la reducción de las relaciones que buscamos.

## CAPITULO III

### OPTIMIZACION DE LA DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DEL PROCESO DE INFLAMACIÓN Y DE ENTRADA AL REGIMEN ESTACIONARIO DEL MOTOR.

Fundamentándonos en los principios arriba descritos y en las suposiciones obtenemos las relaciones matemáticas generales que describen el conjunto de los procesos que se producen en la cámara del motor en el periodo de inflamación [1]

En el periodo de inflamación en la cámara del motor se encuentran diferentes productos heterogéneos:

- Los productos de la combustión de la composición inflamatoria,
- Los productos de la combustión del combustible y del aire
- También la mezcla de los productos de la combustión.

De acuerdo con el principio adoptado de promediación por zonas van a dividir el volumen libre de la cámara en N elementos en cada uno de los cuales se encuentran productos homogéneos, suponemos que el elemento individual esta separado del vecino por la vi dirección de contacto.

En el transcurso de la descripción siguiente las ecuaciones de la balística interna del periodo inflamatorio lo vamos a dividir de acuerdo a la ley fisica o proceso fisico al cual pertenece y que representa dicha ecuación.

#### 3.1 ECUACIÓN DE LA LEY DE CONSERVACIÓN DE LA MASA DE LOS PRODUCTOS DE LA ECUACIÓN LIBRE DE LA CÁMARA

Las condiciones de conservación de la masa de los productos en cada uno de los elementos con un volumen  $V_i$  se puede escribir en forma de un sistema de N ecuaciones.

$$\frac{d}{dt}(\rho_i V_i) = Q_{Bi} + Q_{Ti} - G_i \quad (3.1)$$

$(i = 1, 2, \dots, n),$

Donde  $Q_{Bi}$ ,  $Q_{Ti}$  - Es el ingreso masico de los productos de la combustión de la composición inflamatoria y del combustible en el volumen libre  $V_i$ ;

$G_i$  -Es el caudal o gasto masico de los productos desde el volumen libre del elemento debido a la descarga (generalmente la descarga tiene lugar solamente para el elemento N para los demás  $G_i$  es = 0)

En la practica de los cálculos de ingeniería he adoptado el reemplazo del sistema de N ecuaciones del tipo 3.1 empleando una ecuación genérica de conservación de la masa que se puede obtener mediante la suma de las ecuaciones parciales. Sumando las partes de la derecha y de la izquierda de las ecuaciones 3.1 obtenemos

$$\frac{d}{dt} \sum_{i=1}^n \rho_i V_i = \sum_{i=1}^n Q_{Bi} + \sum_{i=1}^n Q_{Ti} - \sum_{i=1}^n G_i = Q_B + Q_T - G_{kp} \quad (3.2)$$

Introduciremos la densidad promedio de la combustión “ $\rho$ ” en todo el volumen de la cámara, determinado por la relación

$$\rho = \frac{1}{V_k} \sum_{i=1}^n \rho_i V_i \quad (3.3)$$

Despreciando la variación del volumen libre  $V_k$  en el tiempo obtenemos la ecuación de conservación de la masa de los productos en el volumen libre de las cámaras,

$$\boxed{V_k \frac{d\rho}{dt} = Q_B + Q_T - G_{kp}} \quad (3.4)$$

### 3.2 ECUACIÓN DE LA LEY DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA DE LOS PRODUCTOS QUE LLENAN O CUBREN EL VOLUMEN LIBRE DE LA CÁMARA

La condición de la conservación de la energía en cualquier zona “i” lo vamos a representar de la siguiente forma

$$\frac{d}{dt}(c_{vi}\rho_i V_i T_i) + A p_i \frac{dV_i}{dt} = Q_{Bi} c_{PB} x T_{rB} + Q_{Ti} c_{pT} x T_{rT} - G_i c_{pi} T_i = 0;$$

$$(i = 1, 2, \dots, n). \quad (3.5)$$

Donde:  $V_i$  Volumen libre

$Q_{Bi}$  Es el ingreso masico de los productos de la combustión del compuesto inflamador

$Q_{Ti}$  Es el ingreso masico de los productos de la combustión en el volumen libre

$G_i$  Es el caudal o gasto masico de los productos del volumen libre

Suponiendo que cada uno de los productos gaseosos que se encuentran en los volúmenes separados  $V_i$  incluyendo a las mezclas de doble fase se pueden aplicar a la ecuación del estado del gas ideal  $p_i = \rho_i R_i T_i$  y utilizando la relación de Mayer  $C_{pi} - C_{vi} = AR_i$  transformaremos la ecuación 3.5 de la siguiente manera.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{p_i V_i}{k_i - 1} \right) + p \frac{dV_i}{dt} = \frac{k_B}{k - 1} Q_{Bi} x R_{rB} T_{rB} + \frac{k_T}{k_T - 1} Q_{Ti} x R_{rT} T_{rT} - \frac{k_i}{k_i - 1} G_i R_i T_i$$

$$(i = 1, 2, \dots, n). \quad (3.6)$$

Vamos a obtener el reemplazo del sistema de “n” ecuaciones, una ecuación general reducida de conservación de la energía. Sumando las partes de la izquierda y de la derecha de la ecuación 3.6, utilizando la condición de que es



constante la presión, el volumen libre y considerando que la diferencial respecto al tiempo de la suma de  $i = 1$  hasta  $n$  de los volúmenes

$$\frac{d}{dt} \sum_{i=1}^n V_i = dV_k / dt \approx 0,$$

(se puede decir que es igual a cero el trabajo de expansión cuando se aumenta el trabajo libre de la cámara) obtenemos

$$\frac{d}{dt} \left( p \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{k_i - 1} \right) = \frac{k_B}{k_B - 1} Q_B X R_B T_{r,B} + \frac{k_T}{k_T - 1} Q_T X R_T T_{r,T} - \frac{k}{k - 1} G_{kp} R_c T_c \quad (3.7)$$

Introduciremos el exponente y su isoentrópico  $k$  promedio en todo el volumen y que se determina según la igualdad

$$k = 1 + \frac{V_k}{\sum_{i=1}^n \frac{V_i}{k_i - 1}} \quad (3.8)$$

Considerando la igualdad 3.8 la ecuación de la energía para las magnitudes promedios en todo el volumen de la cámara la vamos a representar en la forma

$$V_k \frac{d}{dt} \left( \frac{p}{k - 1} \right) = \frac{k_B}{k_B - 1} Q_B X R_B T_{r,B} + \frac{k_T}{k_T - 1} Q_T X R_T T_{r,T} - \frac{k_c}{k_c - 1} G_{kp} R_c T_c \quad (3.9)$$

### 3.3 ECUACIONES DE INGRESO DE PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN DESDE LOS INFLAMADORES

El ingreso masico de los productos de la combustión de la composición inflamatoria al volumen libre de la cámara del motor puede ser expresado de manera simple por la función

$$Q_B = \rho_B S_B u_B \quad (3.10)$$

Esta función es válida, cuando la composición inflamatoria arde directamente en el volumen libre de la cámara. Si es que la composición inflamatoria se encuentra y arde en un cuerpo no destructible aislado, desde el cual los productos de la combustión salen a la cámara del motor, entonces la fórmula 3.10 también es válida bajo la condición de la igualdad del ingreso y del caudal de los productos de la combustión en el cuerpo del inflamador. En este último caso la combustión de la composición inflamatoria se produce a una presión  $p_B$ , que es diferente a la presión  $p$  en la cámara del motor y entre las funciones que describen el proceso se deben incluir relaciones adicionales, que expresen la condición de igualdad del ingreso y del caudal o gasto de los productos de la combustión en el cuerpo del inflamador:

$$\rho_B S_B u_B = A_B p_B F_B, \quad (3.11)$$

donde el coeficiente de descarga  $A_B$  de los productos de la combustión a través de los orificios de gasto con un área  $F_B$  se determina por las relaciones conocidas para el régimen súper crítico y sub crítico de descarga:

$$A_B = \varphi_2 \sqrt{K_B} \left( \frac{2}{k_B - 1} \right)^{\frac{K_B + 1}{2(K_B - 1)}} \frac{1}{\sqrt{X_B R_B T_B}} \quad \text{cuando} \quad \frac{p}{p_B} \leq \left( \frac{2}{k_B + 1} \right)^{\left( \frac{k_B}{k_B - 1} \right)};$$

$$A_B = \varphi_2 \sqrt{K_B} \sqrt{\frac{2}{X_B R_B T_{r.B}} \left[ \left( \frac{p}{p_B} \right)^{\frac{2}{K_B}} - \left( \frac{p}{p_B} \right)^{\frac{K_B + 1}{K_B}} \right]} \quad \text{cuando} \quad \frac{p}{p_B} > \left( \frac{2}{k_B + 1} \right)^{\frac{k_B}{k_B - 1}}$$

La función de variación de superficie de combustión  $S_B$  de la composición inflamatoria en el tiempo depende de la forma del grano en particular si es que la composición está compuesta de granos iguales que tienen la forma de un cubo o

una esfera, entonces como se deduce de las relaciones geométricas y masicas simples:

$$S_B = S_{B.H} \left( 1 - \frac{e_B}{e_{B.H}} \right)^2 = S_{B.H} (1 - z)^2;$$

$$\rho_B S_B = \frac{3\omega_{B.H}}{e_{B.H}} \left( 1 - \frac{e_B}{e_{B.H}} \right)^2 = \frac{3\omega_{B.H}}{e_{B.H}} (1 - z)^2; \quad (3.12)$$

donde:  $e_B$ ,  $e_{B.H}$  -son los espesores actual e inicial de la bóveda que se quema de la composición inflamatoria respectivamente;

$\omega_{B.H}$  -es la masa inicial de la composición inflamatoria

La variación del espesor relativo  $z$  de la bóveda que se quema del grano de la composición inflamatoria en el tiempo se produce de acuerdo con la ecuación,

$$\frac{dz}{dt} = \frac{u_B}{e_{B.H}} \quad (3.13)$$

Donde:  $u_B$  - Es la velocidad de la combustión

Para reflejar el hecho en una gradualidad del encendido de la composición inflamatoria en la ultima ecuación se puede artificialmente introducir un multiplicador especial y presentar esta ecuación en la forma:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{u_B}{e_{B.H}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{t_{\pi_i}}\right) \right] \quad (3.14)$$

Donde  $t_{\pi_i}$  .es el tiempo característico de propagación de la llama por la superficie de la composición inflamatoria.

Las relaciones arriba mostradas debemos relacionarla a la función de la velocidad de la combustión de la composición inflamatoria respecto a la presión. Para la

función exponencial de combustión que más ampliamente se utiliza esta función tiene la forma:

$$u_B = u_{1B} \left( \frac{p_B}{p_{aTM}} \right)^{V_B} \quad (3.15)$$

Más flexible para la aproximación de los datos experimentales de la función analítica es la función generalizada de la combustión de la forma:

$$u_B = u_{1B} \frac{p_B}{p_{aTM}} \frac{1}{1 + u_{2B} (p_B / p_{aTM})^n} \quad (3.16)$$

El conjunto de las relaciones presentadas desde el 3.10 hasta el 3.16 puede ser utilizado para la descripción matemática del ingreso de los productos de la combustión del inflamador.

### 3.4 ECUACIONES QUE DESCRIBEN EL INGRESO DE LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN DESDE LA CARGA DE COMBUSTIBLE SÓLIDO

El ingreso de los productos de la combustión condicionados por la combustión de la carga del combustible sólido, se expresa por la masa de los productos que ingresan al volumen libre de la cámara del motor en una unidad de tiempo y puede ser presentada en la forma:

$$Q_r = \rho_T S_T(t) u_T l(t_r), \quad (3.17)$$

donde  $S_T$  - es la magnitud actual de la superficie de la carga que esta incluida en la carga de la combustión.

$$l(t_r) = \begin{cases} 1 & \text{cuando } t \geq t_r \\ 0 & \text{cuando } t < t_r \end{cases} \quad \text{- función unitaria}$$

$t_T$  - es el momento de la inflamación de la carga.

A pesar de la sencillez de la función 3.17 su utilización práctica tiene una serie de dificultades considerables.

La determinación del momento  $t_T$  es difícil debido a la indeterminación del criterio de encendido y de la complejidad del cálculo del régimen técnico de la carga en el periodo de inflamación. Debido a estas dificultades el tiempo de retardo de la inflamación  $t_T$  debemos determinar partiendo de un planteamiento muy significativo del problema.

La determinación de la función de la magnitud de la superficie que se quema  $S_T$  respecto al tiempo es un problema individual de alta dificultad, ya que la velocidad de propagación del frente de llama por la superficie de la carga para el nivel actual de conocimiento de la naturaleza de la inflamación de los combustibles sólidos y de los procesos termo gasodinámicos, que se producen en el motor en el periodo inicial de su trabajo, puede ser calculada teóricamente muy aproximadamente. Anotaremos, que justamente la complejidad de la construcción o elaboración de la función  $S_T(t)$  obliga el uso de ciertos casos de simplificaciones sobre la instantaneidad de la inflamación de toda la superficie de la carga.

La velocidad de combustión del combustible  $u_B$ , como ya se señaló, deberá determinarse hablando rigurosamente tomando en cuenta los efectos no estacionarios, sobre todo en la fase inicial del proceso de inflamación de la carga. Sin embargo aquí debemos señalar, que debido a la insuficiencia de la teoría desarrollada de la combustión no estacionaria debemos basarnos en funciones simples de la velocidad de la combustión respecto a la presión.

Las dificultades señaladas conllevan a la necesidad de separar los problemas sobre la determinación del tiempo de retardo de la inflamación  $t_T$  y relacionar las funciones de la superficie inflamada respecto al tiempo  $S_T(t)$  a la categoría de difíciles o especial. Por esta razón vamos a limitarnos a las observaciones generales hechas y los métodos simplificados de solución de estos problemas los

vamos a analizar mas adelante durante, el transcurso de descripción de los métodos de ingeniería de cálculo del proceso de inflamación.

La expresión para la velocidad de la combustión del combustible lo vamos a considerar en forma de funciones conocidas de la teoría estacionaria, construidas sin considerar el efecto de la combustión turbulenta

$$\left. \begin{aligned} u_T &= u_{1T} (p/p_{aTM})^{V_T} \quad \text{Función exponencial} \\ u_t &= \frac{u_{1t} (p/p_{aTM})}{1 + u_{2t} (p/p_{aTM})^{V_T}} \quad \text{Función generalizada} \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

### 3.5 ECUACION DEL GASTO DEL CAUDAL DE LOS PRODUCTOS DESCARGADOS DE LA CAMARA

Mas adelante vamos a utilizar la suposición que el régimen de descarga de los productos, que se encuentran en la cámara del motor, a través de la tobera durante todo el periodo de inflamación es casi estacionario y súper critico. Correspondientemente a la expresión para el gasto o caudal masico de los productos de descarga tiene la forma:

$$G_{KP} = \varphi_2 \sqrt{k_c} \left( \frac{2}{k_c + 1} \right)^{\frac{k_c + 1}{2(k_c - 1)}} \frac{p F_{kp}}{\sqrt{R_c T_c}} 1(p_3) \quad (3.19)$$

La función unitaria  $1(P_3)$  es igual a 1 cuando  $t \geq t_c$  y es igual a 0 cuando  $t \leq t_c$ , esta función unitaria se introduce con la finalidad de reflejar aquella situación, de que la descarga a través de la tobera comience en el momento  $t_c$ , cuando se rompe el tapón, que inicialmente cerraba la tobera. La condición de rotura del tapón vamos a considerar cuando se alcanza la magnitud crítica de la presión  $p_3$  en la cámara del motor, que se determina con cálculos o experimentalmente.

### 3.6 ECUACIÓN DEL ESTADO

Partiendo de la división del volumen de la carga en  $n$  elementos, en cada uno de los cuales se encuentra un producto homogéneo en composición, vamos a suponer, que a cada uno de estos productos en el volumen elemental se aplica la ecuación del estado del gas ideal en la forma:

$$p_i = \rho_i R_i T_i \quad (3.20)$$

De la ecuación 3.20 se deduce, que

$$\sum_{i=1}^n p_i V_i = \sum_{i=1}^n \rho_i R_i T_i V_i$$

suponiendo que la presión es igual en todo el volumen libre  $V_K$  obtenemos

$$p V_K = \sum_{i=1}^n \rho_i R_i T_i V_i \quad (3.21)$$

Vamos a determinar la magnitud media de  $RT$  en todo el volumen libre  $V_K$  de la relación

$$RT = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i R_i T_i V_i}{\sum_{i=1}^n \rho_i V_i} = \frac{V_K}{\sum_{i=1}^n \frac{V_i}{R_i T_i}} \quad (3.22)$$

(la segunda igualdad se deduce de la primera debido a que  $p_i = \rho_i R_i T_i$  y  $p_i = p$ ). Entonces de las relaciones 3.22 y 3.23 que determinan la densidad media o promedio  $\rho$  en el volumen  $V_K$  obtenemos la ecuación del estado para las magnitudes promediadas

$$p = \rho RT \quad (3.23)$$

Vamos a reducir las relaciones obtenidas en un sistema único de ecuaciones. En una forma generalizada este sistema puede ser presentado por relaciones, en las cuales las particularidades individuales de los diferentes tipos de los motores, de las cargas y de los dispositivos inflamadores van a realizar solamente que halla una pequeña distorsión. Al final obtenemos el siguiente sistema de ecuación, que describe la variación de las magnitudes medias o promedios de la presión de la densidad y de la temperatura y de otros parámetros físicos durante el periodo de inflamación en el volumen libre de la cámara de combustión

$$\begin{aligned}
 1.- & V_k \frac{d\rho}{dt} = Q_B + Q_T - G_{kp} \\
 2.- & V_k \frac{d}{dt} \left( \frac{p}{k-1} \right) = \frac{k_B}{k_B-1} Q_B X R_B T_{r.B} + \frac{k_T}{k_T-1} Q_T X R_r T_{r.T} - \frac{k_c}{k_c-1} G_{kp} R_c T_c \\
 3.- & p = \rho R T \\
 4.- & Q_B = \rho_B S_B u_B \\
 5.- & Q_T = \rho_T S_T(t) u_T 1(t_T) \\
 6.- & G_{KP} = \varphi_2 \Gamma \frac{p F_{kp}}{\sqrt{R_c T_c}} 1(p_3) \\
 7.- & u_B = u_B(p_B) = u_{1B} \left( \frac{p_B}{p_{aTM}} \right)^{V_B} \\
 8.- & u_T = u_T(p) = u_{1T} (p / p_{aTM})^{V_T} \\
 9.- & k = 1 + \frac{V_k}{\sum_{i=1}^n \frac{V_i}{k_i - 1}}
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

La descripción matemática del proceso de inflamación con ayuda del sistema (3.24) debido a su formula muy generalizada no refleja, naturalmente, las particularidades individuales del proceso, pre determinadas por las condiciones de un motor específico, correspondientemente este propio sistema de ecuaciones en un caso general es abierto.



Efectivamente, el sistema mostrado de ecuaciones refleja la interacción entre el conjunto de variables  $p$ ,  $\rho$ ,  $RT$ ,  $k$ ,  $Q_T$ ,  $Q_B$ ,  $G_{Kp}$ ,  $u_B$ ,  $u_T$ , y las demás variables, como son  $S_B$ ,  $S_T$ ,  $k_c$ ,  $R_c$ ,  $T_c$ ,  $p_B$ ,  $V_i$ , deberán estar relacionados con las relaciones adicionales primeras y se suponen conocidas en función del tiempo. De esta manera, el empleo del sistema 3.24 para el cálculo del proceso de inflamación y de entrada del motor al régimen en cada caso específico requiere la introducción de relaciones adicionales, que reflejen las particularidades específicas de la construcción examinada, del cuadro físico de los procesos y del método adoptado de división en volúmenes físicos o característicos, que contienen productos homogéneos. Los métodos de construcción del sistema cerrado de ecuaciones para el cálculo de proceso de inflamación se analizan más adelante aplicable a las configuraciones características de las plantas motrices o de poder y de los dispositivos inflamadores.

### **3.7 METODO DE INGENIERIA PARA EL CALCULO DE INFLAMACIÓN EN EL MOTOR POR UNA CARGA QUE ARDE DESDE EL CANAL Y CON UN INFLAMADOR EN LA PARTE DE LA CABEZA**

Examinaremos la configuración del motor equipado con una carga de un solo canal o de varios canales con un dispositivo inflamador ubicado del fondo delantero ver fig. 2.2

Antes de pasar a elaborar el sistema de ecuaciones para el cálculo del periodo inflamatorio, nos detendremos en forma corta sobre las particularidades del desarrollo del proceso de inflamación en un motor similar. Para este fin examinaremos la curva de la presión en la parte inicial de trabajo del motor resaltando los momentos más característicos Fig. 3.1

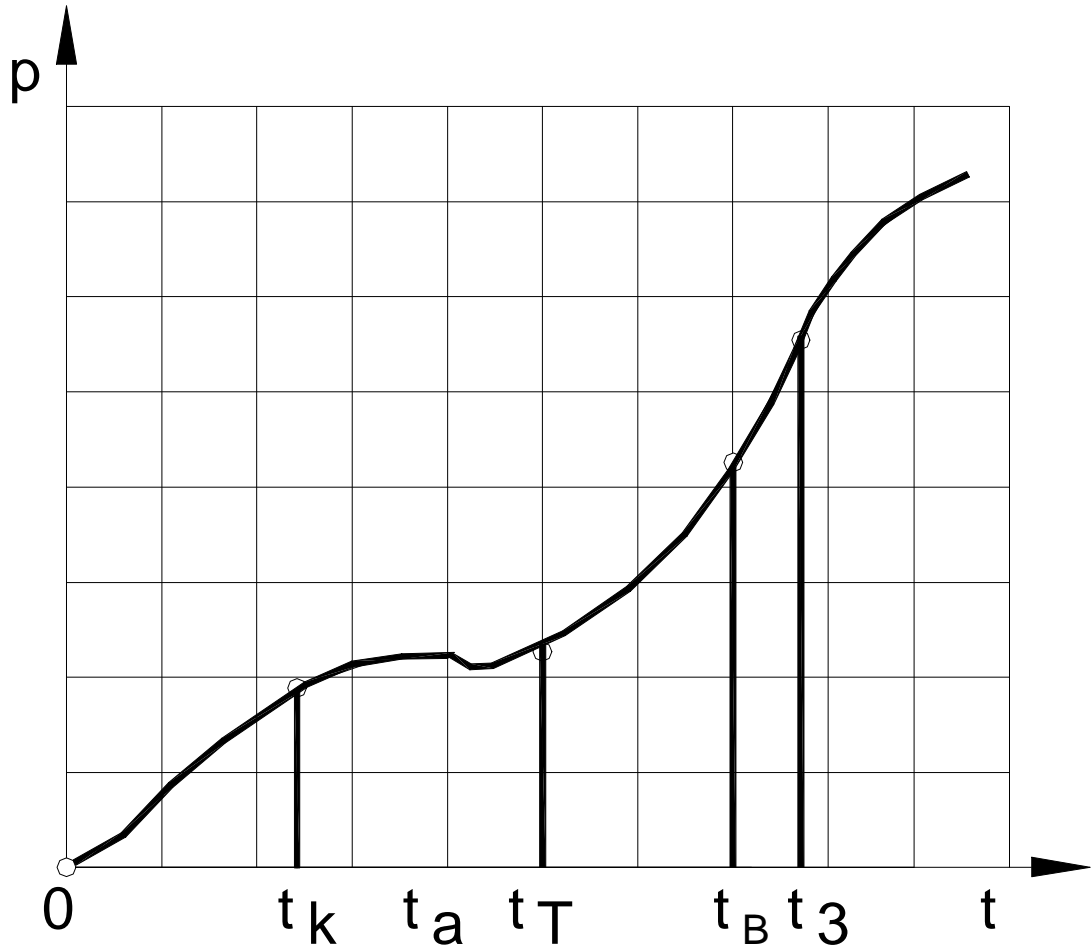


Figura 3.1 CURVA DE LA PRESIÓN EN LA PARTE INICIAL DE TRABAJO DEL MOTOR

El momento  $t = 0$  corresponde al inicio de ingreso de los productos de la combustión de la composición inflamadora al volumen libre de la cámara de combustión.

Desde el momento  $t = 0$  hasta el momento  $t = t_K$  se produce el llenado de la cámara por productos de la combustión del inflamador y la compresión del aire.

En el momento  $t = t_K$  para una presión igual  $p = p_3$  se rompe el tapón que cerraba la tobera y comienza la descarga del aire, que continua hasta el momento  $t = t_a$ .

En este momento de la cámara se bota todo el aire y comienza la descarga de los productos de la combustión del inflamador hacia la atmósfera.

El momento  $t = t_T$  le corresponde al inicio de inflamación de la carga, generalmente desde este momento se observa el aumento de la curvatura de crecimiento de la curva de la presión.

En el periodo desde  $t = t_T$  hasta  $t = t_B$  tiene lugar el empuje o botado desde la cámara de los productos de la combustión del compuesto inflamador, que se encontraba en la cámara en el momento  $t = t_T$ , cuanto  $t > t_B$  de la cámara comienza a descargarse la mezcla de los productos de la combustión del inflamador y del combustible.

El momento  $t_3$  le corresponde a la propagación del frente de llama en toda la superficie de la carga, ósea a la inflamación total, después del cual se produce el llenado de la cámara por los productos de la combustión del combustible y entrada del motor al régimen.

Obtendremos aplicable a la configuración examinada el conjunto de ecuaciones diferenciales y algebraicas, con cuyas soluciones numéricas o analíticas pueden ser halladas las funciones que buscamos respecto al tiempo de las magnitudes físicas, que caracterizan el proceso dentro de la cámara.

En calidad de sistema base de ecuaciones en cuya fundamentación se construye la metodología de calculo, adoptaremos el sistema de calculo 3.24. Añadiremos y transformaremos esta ecuación aplicable al problema examinado, formando un sistema cerrado relativamente simple.

Siguiendo la idea general del principio de la promediación parcial de las magnitudes físicas por los volúmenes de las zonas características, dividiremos el volumen libre de la cámara en tres volúmenes individuales Fig. 3.2

Adoptando esta configuración nosotros partimos del modelo físico antes descrito del proceso, de acuerdo al cual, de la cámara de combustión al inicio se bota aire y luego, los productos de la combustión de la composición inflamadora que se forma antes de la inflamación de la carga, y más adelante la mezcla de los productos de la combustión de la composición inflamadora y de la carga. En un caso general existen todos esos tres volúmenes; en determinados periodos del proceso uno u otro de estos volúmenes pueden no existir.

Obtendremos las expresiones para determinar los volúmenes libres de  $V_a$ ,  $V_B$  y  $V_{cM}$ . el valor del volumen libre  $V_a$ , ocupado por el aire se expresa por la función

$$V_a = \left(\frac{P_H}{P_a}\right)^{\frac{1}{K_a}} \left( V_k - \frac{1}{\rho_{aH}} \int_{t_k}^t G_{kp} dt \right) [1 - l(t_a)] \quad (3.25)$$

que se deduce de la condición de conservación de la masa del aire en la cámara y la suposición que el proceso de compresión del aire es isoentrópico debido al cual la ecuación

$$\rho_a = \rho_{aH} \left(\frac{p}{p_H}\right)^{\frac{1}{K_a}}$$

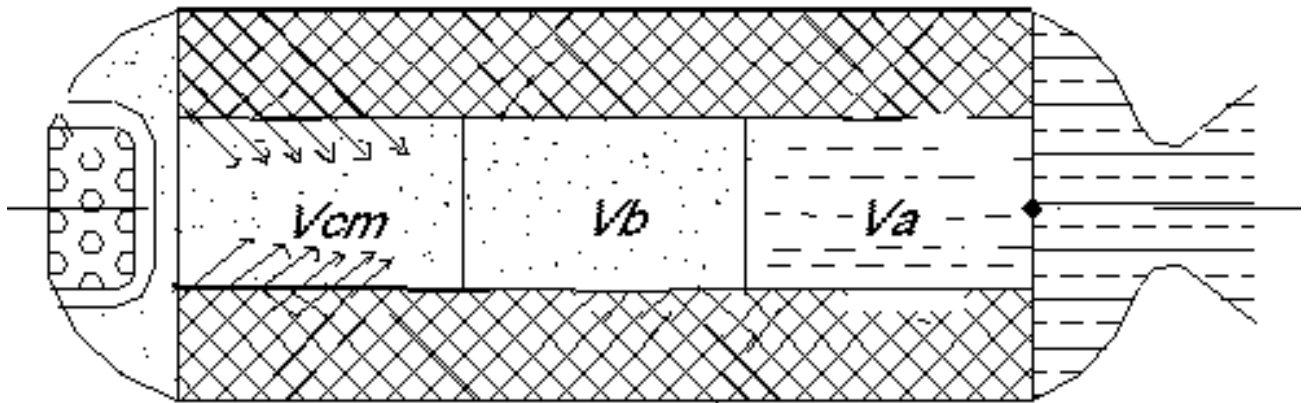


Figura 3.2 VOLUMEN LIBRE DE LA CÁMARA DIVIDIDO EN VOLÚMENES INDIVIDUALES

- a) VOLUMEN  $V_a$ .- ocupado por el aire atmosférico que se bota de la cámara
- b) VOLUMEN  $V_b$ .- ocupado por los productos de la combustión de la C.I.
- c) VOLUMEN  $V_{CM}$ .- ocupado por la mezcla de los productos de la combustión del inflamador y del combustible

La función unitaria  $1(t_a)$ , que fija la finalización de la descarga del aire se determina por la condición

$$1(t_a) = \begin{cases} 1..cuando...t \geq t_a \\ 0..cuando...t < t_a \end{cases} \quad (3.26)$$

El momento del tiempo  $t_a$  le corresponde al término de la descarga del aire se determina de la función

$$\int_{t_k}^{t_a} G_{kp} dt = \rho_{a.H} V_k \quad (3.27)$$

Más adelante determinaremos el valor del volumen libre, ocupado por los productos de la combustión de la composición inflamadora. Hasta el momento del tiempo  $t_T$ , que le corresponde al inicio de la inflamación del combustible, el volumen  $V_B$  se determina como la diferencia del volumen libre de la cámara  $V_K$  y del volumen libre  $V_a$ , ocupado por el aire.

Comenzando desde el momento  $t_T$ , a la cámara ingresan productos de la combustión del combustible, que (en la suposición, que al inicio se inflaman la parte de la carga en el fondo delantero) botan de la cámara los productos de la combustión de la composición inflamadora; en este periodo el volumen  $V_B$  se calcula como parcial de la división de la masa de los productos entre su densidad  $\rho_{r.B}$

$$V_B = (V_K - V_a)[1 - 1(t_T)] + \frac{1}{\rho_{r.B}} \left( \int_0^{t_T} Q_B dt - \int_{t_a}^t G_{kp} dt \right) 1(t_T)[1 - 1(t_B)] \quad (3.28)$$

Las funciones unitarias  $1(t_T)$  y  $1(t_B)$  que caracterizan el inicio de la inflamación de la carga y el término de descarga de los productos de la inflamación se determinan por las funciones

$$1(t_T) = \begin{cases} 1 & \text{cuando } t \geq t_T; \\ 0 & \text{cuando } t < t_T \end{cases} \quad 1(t_B) = \begin{cases} 1 & \text{cuando } t \geq t_B; \\ 0 & \text{cuando } t < t_B. \end{cases} \quad (3.29)$$

El momento  $t_B$  de finalización de descarga de los productos de la combustión de la composición inflamadora se determina por la fusión

$$\int_0^{t_T} Q_B dt = \int_{t_a}^{t_B} G_{kp} dt. \quad (3.30)$$

El volumen  $V_{CM}$  ocupada por la mezcla de los productos de la combustión del combustible y de la composición inflamadora se calcula según la formula ecuación 3.31

$$V_{CM} = V_k - V_a - V_B. \quad (3.31)$$

Pasamos mas adelante a determinar las características termodinámicas de los productos ocupados por los volúmenes libres  $V_a$   $V_B$   $V_{CM}$ .

Durante un enfoque riguroso las constantes termodinámicas  $C_p$ ,  $C_v$ ,  $k$ ,  $R$  de los productos deberán calcularse mediante el calculo termodinámico suponiendo el equilibrio y la temperatura de los productos se debe terminar partiendo de las relaciones diferenciales obtenidas mediante el empleo de la ley de la conservación de la energía a la masa de los productos que se encuentran en los volúmenes libres  $V_a$ ,  $V_B$  y  $V_{CM}$ .

Para excluir las dificultades del carácter matemático utilizaremos un enfoque aproximado que consiste en usar funciones mas aproximadas pero simples para describir las interacciones entre las características termo gasodinamicas de los productos.

Para el aire que ocupa el volumen  $V_a$ , suponiendo que el proceso de compresión es isentrópico durante su botado de la cámara obtenemos ecuación 3.32

$$(RT)_a = R_a T_{a.H} \left( \frac{P}{P_H} \right)^{\frac{ka-1}{ka}} \quad (3.32)$$

Respectivamente las constantes  $C_{pa}$ ,  $C_{va}$ ,  $k_a$ ,  $R_a$  del aire vamos a suponer que no varían en el tiempo.

Para los productos de la combustión de la composición inflamadora en el volumen  $V_B$  adoptaremos la ecuación 3.33

$$(RT)_B = x R_B T_{r.B}. \quad (3.33)$$

Respectivamente las constantes termodinámicas  $c_{pB}$ ,  $c_{vB}$ ,  $k_B$ ,  $R_B$  de los productos de la combustión de la composición inflamadora también vamos a suponer que no varían en el tiempo.

Un poco más complicado esta el hecho de que las características termo gasodinámicas de la mezcla de los productos de la combustión que llenan el volumen libre  $V_{CM}$  ya que inclusive en la suposición de una completa mezcla de los productos estas características se debe determinar partiendo de un sistema de ecuaciones que incluye ecuaciones diferenciales para determinar los porcentajes masicos  $g_B$  y  $g_T$  de los productos de la combustión de la composición inflamadora y del combustible en la mezcla.

Se puede suponer en forma menos rigurosa que un enfoque más simple de acuerdo al cual las magnitudes que se buscan se determinan de relaciones finales del tipo ecuación 3.34

$$\left. \begin{aligned} (RT)_{CM} &= g_B x R_B T_{r.B} + g_T x R_T T_{r.T}; \\ k_{CM} &= g_B k_B + g_T k_T; \\ g_B &= \frac{Q_B}{Q_B + Q_T}; g_T = \frac{Q_T}{Q_B + Q_T}. \end{aligned} \right\} \quad (3.34)$$



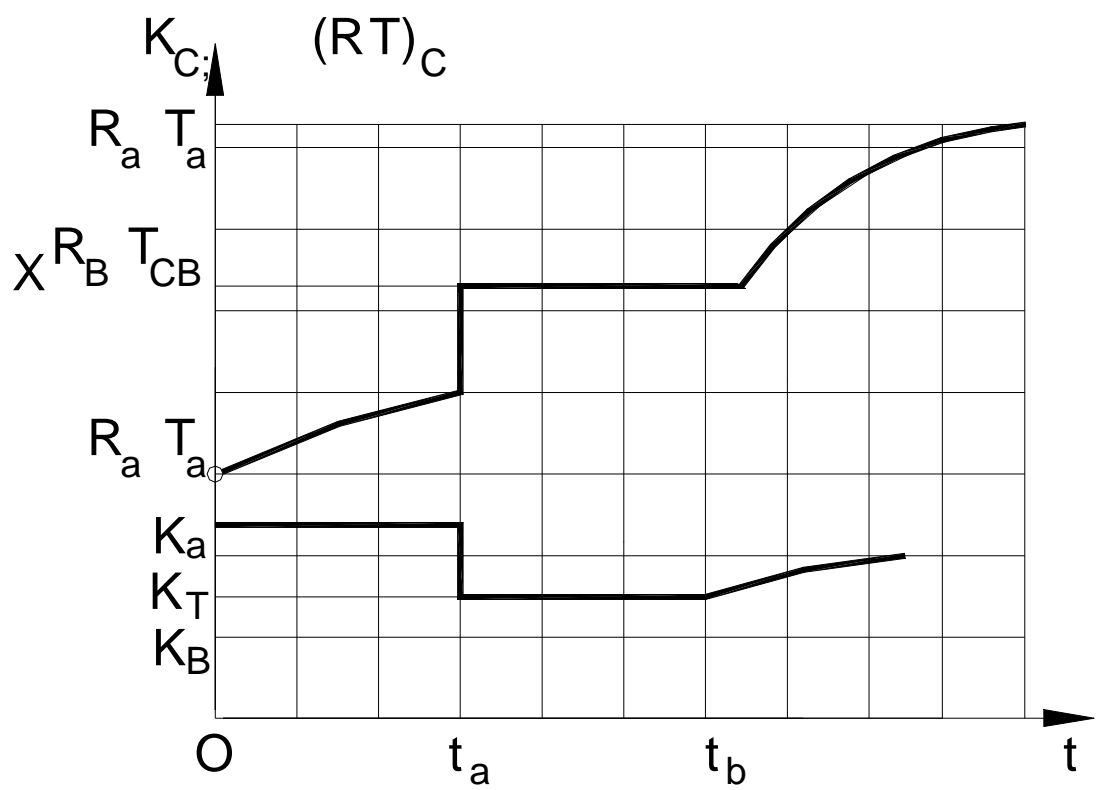


Figura 3.3 CURVA TÍPICA DE VARIACIÓN DE LA MAGNITUD  $(RT)_c$  y  $k_c$  EN EL TIEMPO

Para un enfoque aun más simple considerando que el porcentaje masico de los productos de la combustión del combustible tiende a 1, se puede considerar que  $g_T = 1$  y de esta manera obtenemos la ecuación

$$(RT)_{CM} = xR_t T_{r.T.}; k_{CM} = k_T \quad (3.35)$$

Pasaremos a elaborar o a construir las funciones para las características termo gasodinamicas de los productos que se descargan del motor. De acuerdo con el modelo físico del proceso y con las suposiciones físicas adoptadas

$$\left. \begin{aligned} (RT)_c &= R_a T_a; & k_c &= k_a \text{ cuando } t_k \leq t \leq t_a; \\ (RT)_c &= xR_B T_{r.B.} & k_c &= k_B \text{ cuando } t_a < t \leq t_a \\ (RT)_c &= (RT)_{CM}, & k_c &= k_{CM} \text{ cuando } t_B < t \end{aligned} \right\} \quad 3.3.6$$

Una curva típica de variación de la magnitud  $(RT)_c$  y  $k_c$  en el tiempo se muestra en la Fig. 3.3

La expresión 3.36 se puede generalizar, introduciendo funciones unitarias  $1(t_a)$ ,  $1(t_B)$  de las relaciones 3.26 y 3.29

$$\begin{aligned} (RT)_c &= (RT)_a [1 - 1(t_a)] + xR_B T_{r.B.} 1(t_a) [1 - 1(t_B)] + (RT)_{CM} 1(t_B); \\ k_c &= k_a [1 - 1(t_a)] + k_B 1(t_a) [1 - 1(t_B)] + k_{CM} 1(t_B) \end{aligned} \quad (3.37)$$

Pasaremos a examinar una de las preguntas mas complicadas la determinación de la función  $S_T(t)$  de la superficie que se inflama del combustible respecto al tiempo. Este problema se divide en dos:

- Primero la determinación del momento del tiempo  $t_T$  que corresponde al inicio de la inflamación de la carga (tiempo de retardo de la inflamación).
- Segundo la determinación del tipo de la función  $S_T(t)$ .

El tipo de retardo de la inflamación se debe determinar partiendo de un mecanismo determinado de inflamación y su correspondiente aparato matemático. En los límites del enfoque simplificado, utilizado al inicio de este sub capítulo, la expresión aproximada para el tiempo de retardo de la inflamación  $t_T$  lo obtenemos, considerando en calidad de condición de inflamación, que la temperatura de la superficie alcanza el valor  $\theta_0$  igual a la temperatura crítica  $\theta_*$

La variación de la temperatura de la superficie del combustible en el tiempo lo vamos a determinar mediante la solución de la ecuación de conductividad de calor no estacionaria para la carga del combustible sólido, examinado en forma de un cuerpo inerte homogéneo semi limitado con características termo físicas constantes.

Cuando el coeficiente de irradiación de calor  $\alpha$  es constante desde los productos de la combustión de la composición inflamadora hacia el combustible y una distribución uniforme en el periodo inicial la solución de la ecuación de la conductividad del calor, se caracteriza la distribución estacionaria de la temperatura en la profundidad de la carga, debe ser expresada por la función

$$\frac{\theta(y,t) - \theta_h}{T_{r.B} - \theta_h} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{y}{2\sqrt{x_{rt}}}\right) - \exp\left(\frac{X_r y}{\eta_r} + \frac{\alpha^2 x_{rt}}{\eta_r^2}\right) \left[ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{y}{2\sqrt{x_{rt}}} + \frac{\alpha}{\eta_r} \sqrt{x_{rt}}\right) \right] \quad (3.38)$$

Donde  $X_r = \frac{\eta_r}{C_r \rho_r}$  es la conductividad térmica del combustible.

$$1 - \operatorname{erf}z = \operatorname{erfc}z = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-u^2} du$$

la temperatura  $\theta_0$  de la superficie de la carga como se deduce (3.38) cuando  $y = 0$  se determina por la relación

$$\frac{\theta_0 - \theta_{0H}}{T_{r.B} - \theta_{0H}} = 1 = (1 - \text{erf}Ti) \exp Ti^2, \quad (3.39)$$

Donde  $Ti = \frac{a\sqrt{t}}{\sqrt{n_T c_T \rho_T}}$  es el criterio Tijonov.

Cuando  $Ti \ll 1$  la relación 3.39 se puede reemplazar por una función más simple

$$\frac{\theta_0 - \theta_{0H}}{T_{r.B} - \theta_{0H}} = \frac{2a}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{t}{c_T \rho_T n_T}}. \quad (3.40)$$

Como la condición de inflamación tiene la forma  $\theta_0 = \theta_*$  de las funciones 3.40 obtenemos la expresión para el tiempo de retardo de la inflamación que estábamos buscando:

$$t_T = \frac{\pi}{4} \frac{n_T c_T \rho_T}{a^2} \left( \frac{\theta_* - \theta_{0H}}{T_{r.B} - \theta_{0H}} \right)^2 \quad (3.41)$$

Para calcular  $t_T$  se necesita conocer la magnitud del coeficiente de irradiación de calor  $\alpha$ . En calidad de este último vamos a considerar el calor medio del coeficiente  $\alpha$  en el tiempo para la inflamación, que se encuentra en la entrada del canal. Expresando  $\alpha$  por una función que se deduce de la expresión 2.12 y considerando en calidad de medida típica o característica el diámetro  $d_0$  de canal después de ciertas transformaciones no complicadas obtenemos la ecuación

$$\alpha_{cp} = b_{ko} \frac{\eta_{r.B}}{d_0} \frac{1}{t} \int_0^t \left( \frac{\rho_o v_o d_o}{\mu_{r.B}} \right)^m dt = b_{ko} \frac{\eta_{r.B}}{d_o} \frac{1}{t} \int_0^t \left( \frac{Q_B d_o}{\mu_{r.B} F_O} \right)^m dt. \quad (3.42)$$

donde se ha utilizado la igualdad aproximada

$$Q_B = \rho_o F_o v_o$$

Colocando la expresión 3.42 el valor medio del coeficiente de irradiación de calor  $\alpha$ , obtenemos la ecuación para calcular el tiempo de retardo de la inflamación  $t_T$ :

$$\frac{\theta_0 - \theta_H}{T_{r.B} - \theta_H} = \frac{2b_{k0}\eta_{r.B}}{\sqrt{\pi d_0 t_T}} \sqrt{\frac{t_T}{c_T \rho_T n_T}} \int_0^{t_T} \left( \frac{Q_B d_o}{\mu_{r.B} F_O} \right)^m dt. \quad (3.43)$$

la parte de la izquierda de esta igualdad para las suposiciones adoptadas es constante.

El valor buscado  $t_T$  le corresponde al tiempo, durante el cual la parte derecha de la ecuación 3.43 llega a igualarse a la izquierda. Naturalmente, que para calcular el tiempo de retardo de la inflamación  $t_T$  se necesita conocer la variación en el tiempo del ingreso masico  $Q_B$  de los productos de la combustión de la composición inflamadora, ósea que la determinación de  $t_T$  sé efectúa en el transcurso del cálculo de todo el proceso. Si es que la magnitud  $Q_B$  en el periodo hasta la inflamación de la carga principal se puede considerar constante, entonces de la ecuación 3.43 obtenemos la expresión final para el tiempo  $t_T$ :

$$t_T = \frac{\pi \eta_T c_T \rho_T d_0^2}{4 b_{k0}^2 \eta_{r.B}^2} \left( \frac{F_0 \mu_{r.B}}{Q_B d_0} \right)^{2m} \left( \frac{\theta_* - \theta_H}{T_{r.B} - \theta_H} \right)^2 \quad (3.44)$$

El tiempo de retardo de la inflamación se determina aun más simple si en calidad de criterio de inflamación adoptamos la acumulación de la cantidad critica del calor  $W_*$  en él calculo en la unidad de área de la superficie de la carga. En este caso la condición de inflamación tiene la forma:

$$W_* = \int_0^{t_T} \alpha (T_{r.B} - \theta_o) dt,$$

De donde, colocando el valor  $\alpha$  y suponiendo que  $\theta_0 \approx \theta_H$ , vamos a llegar a la ecuación, de la cual se puede determinar la magnitud  $t_T$  :

$$W_* \cong \frac{b_{ko} \eta_{r,B}}{d_o} (T_{r,B} - \theta_H) \int_0^{t_T} \left( \frac{Q_B d_o}{\mu_{r,B} F_o} \right)^m dt. \quad (3.45)$$

Cuando la magnitud  $Q_B$  es constante de la ultima relación obtenemos una función clara para determinar el tiempo  $t_T$ :

$$t_T = \frac{W_* d_o}{b_{ko} \eta_{r,B} (T_{r,B} - \theta_H)} \left( \frac{F_o \mu_{r,B}}{Q_B d_o} \right)^m. \quad (3.46)$$

Pasaremos a la pregunta sobre el establecimiento de la forma de la función de la magnitud de la superficie inflamada de la carga respecto al tiempo  $S_T(t)$

Vamos a partir de la posición en el momento del tiempo  $t_T$  instantáneamente se inflama la superficie que arde  $S_D$ , indicada ante la sección de entrada al canal ( el extremo, la ranura, etc). Mas adelante el frente de la combustión se propaga por el canal con una velocidad  $v_\phi$  en el momento  $t_3$ , cuando el frente alcanza la presión de salida del canal instantáneamente se inflama la superficie de la carga ubicada después de la sección de salida del canal, ósea el extremo posterior y de esta manera se inflama toda la superficie de la conducción  $S_T = S_D + S_K + S_c$ . De acuerdo con el cuadro adoptado obtenemos la siguiente expresión para la función dictada  $S_T(t)$

$$S_T = \left( S + \int_{t_T}^t h v_\phi dt \right) l(t_T) [1 - l(t_3)] + S_3 l(t_3) \quad (3.47)$$

donde

$$l(t_3) = \begin{cases} 1..cuando..t \geq t_3 \\ 0..cuando..t < t_3 \end{cases}$$

El tiempo  $t_3$  se calcula de la función

$$\int_{t_T}^{t_3} v_{\phi} dt = 1 \quad (3.48)$$

para utilizar la función 3.48, se necesita conocer la función de variación en el tiempo de la velocidad  $v_{\phi}$  de propagación del frente de llama a lo largo de la longitud del canal. El enfoque general teórico para el caso de la velocidad  $v_{\phi}$  esta descrita, por ejemplo, en el trabajo [14]. Tomando en cuenta que los valores teóricos de  $v_{\phi}$  pueden ser hallados muy aproximadamente, para la práctica de ingeniería vamos a suponer que es conveniente utilizar la siguiente función simplificada de la magnitud de la superficie inflamada  $S_T$  respecto al tiempo,

$$S_T = S_3 \left( \frac{t - t_T}{t_3 - t_T} \right)^2 1(t_T) [1 - 1(t_3)] + S_3 1(t_3). \quad (3.49)$$

Para determinar el tiempo  $t_3$  debe utilizarse el enfoque que es aplicable para el calculo del tiempo  $t_T$ , se necesita solamente tomar en cuenta que el calentamiento de la superficie de la carga en la sección  $x = l$  comienza desde el momento del tiempo  $t_1$ , cuando desde el canal de la carga completamente se bota el aire.

Suponiendo que el caudal o gasto de los productos a través de sección de la salida del canal es igual al gasto a través de la tobera y basándonos en una función aproximada 3.43 vamos a llegar a la siguiente relación para determinar el tiempo  $t_3$ , que corresponde a la inflamación total de la carga:

$$\frac{\theta_* - \theta_H}{T_{r.B} - \theta_H} = \frac{2b_k \ln \eta_{r.B}}{\sqrt{\pi d_0 t_3}} \sqrt{c_T \rho_T \eta_T} \int_{t_1}^{t_3} \left( \frac{G_{kp} dt}{\mu_{r.B} F_l} \right)^m dt \quad (3.50)$$

Se tiene que tener en cuenta, que el coeficiente  $b_{kl}$  en la función 3.50 se diferencia del coeficiente  $b_{k0}$  en la función 3.43, ya que el primero caracteriza las condiciones de calentamiento en la salida, mientras que el segundo las caracteriza en la sección de entrada del canal; en un caso general  $b_{k0} > b_{kl}$ , lo que ya se hablo en el sub capitulo 2.3

La magnitud  $t_1$  se determina de la condición: cuando  $t = t_1$ ;  $V_a = V_c$ . Utilizando esta condición y la expresión 3.28, obtenemos la relación para determinar la magnitud  $a_1$  en la forma

$$\left[ \frac{P_H}{p(t_1)} \right]^{k_a} \left( V_K - \frac{1}{\rho_{a.H}} \int_{t_c}^{t_1} G_{kp} dt \right) = V_c \quad (3.51)$$

El empleo de las funciones 3.50 y 3.51 para determinar el tiempo  $t_3$  es difícil debido a que la magnitud  $G_{kp}$  depende  $t_3$ , por esta razón es más fácil calcular debido a que su primera aproximación calcular  $t_3$  en la suposición que  $S_T = 0$  y el calentamiento de las cargas se produce solamente cuando el producto de la combustión de la composición inflamatoria, mas adelante el valor de  $t_3$  se debe precisar mediante la consideración de los productos sobre el caudal  $G_{kp}$  y nuevamente sobre el calentamiento de la carga de los productos de la combustión de la parte inflamada de la carga, cuyo ingreso se determina en función a una primera aproximación.

Las funciones obtenidas 3.25, 3.28, 3.31, 3.34, 3.37, 3.43, 3.49 y 3.50 complementan al sistema general 3.24 de las situaciones del proceso de inflamación conjuntamente con el forman un conjunto cerrado de relaciones que permiten aproximadamente calcular la variación en el tiempo de las características principales de la balística interna del motor con un inflamador en la parte cabezal en el periodo de inflamación y de entrada al régimen estacionario del funcionamiento.

Las condiciones iniciales para integrar el sistema de ecuaciones en la suposición, que el motor al inicio se llena con aire a una presión atmosférica, pueden ser presentadas en la siguiente forma simple

$$p_H = p_{aTM}; \quad \rho_H = \rho_{aTM}, \quad \text{cuando } t = 0 \quad (3.52)$$



El método desarrollado de cálculo del proceso de inflamación del motor con un inflamador en la parte delantera cabezal, a parte de resolver el problema propuesto, caracteriza simultáneamente un enfoque general, en cuya base no es tan difícil construir métodos de ingeniería para el cálculo del periodo de inflamación en los motores con otras ubicaciones de leyes positivas de inflamación.

### **3.8 CALCULO DE LA MASA REQUERIDA Y DE LAS MEDIDAS INICIALES DE LOS GRANOS DE LA COMPOSICIÓN INFLAMATORIA**

En el proceso de diseño y de procesamiento de los sistemas inflamatorios para los Motores de Cohetes de Combustible Sólido se requiere determinar la masa y las medidas de los granos de la composición inflamatoria, que garanticen un funcionamiento seguro o confiable y normal del motor.

Para los motores pequeños este problema se resuelve experimentalmente mediante la realización de una serie de encendidos en base a cuyos resultados se elige la masa óptima de la composición inflamatoria. Este enfoque será difícil de utilizarse para los motores grandes debido a los artículos gaseosos y altos costos.

El problema sobre la determinación de la masa óptima  $\omega_{B.H}$  y de la medida inicial del grano de la composición inflamatoria  $e_{B.H}$  puede ser resuelto de la siguiente manera: Dando los diferentes valores de las magnitudes encontradas  $\omega_{B.H}$ ,  $e_{B.H}$  y realizando una serie de cálculos correspondientes de los parámetros del proceso de inflamación, durante la integración del sistema inicial de ecuaciones, escogimos aquellos valores de  $\omega_{B.H}$ ,  $e_{B.H}$ , que garanticen la obtención de las características temporales aceptables y de la curva de la presión en la parte inicial del trabajo del motor. Este enfoque se debe reconocer como el más fundamentado y generado, sin embargo este requiere cálculos complicados y dificulta el análisis general.

Por esta razón tiene mayor interés la obtención de funciones de cálculos simples para determinar el peso requerido y la medida del grano de la composición inflamatoria, aunque en forma de relaciones muy aproximadas son aplicables en un rango amplio de condiciones. Estas funciones permiten determinar la masa y las medidas del grano de la composición inflamatoria mediante cálculos, después del cual las características óptimas se precisan de manera experimental.

Vamos a referirnos a las concepciones principales las cuales se basan en un método de cálculo del peso requerido y de la medida del grano de la composición inflamatoria, es decir vamos a adoptar determinadas condiciones de optimidad de las características desinflamadoras. Como se va a determinar dos magnitudes, entonces debemos formular dos condiciones:

- En calidad de primero de ellos adoptaremos la posición según el cual el peso mínimo de la composición inflamatoria deberá garantizarnos el inicio de la inflamación de la carga cuando se alcanza el máximo de la curva de la presión en la cámara de combustión del motor, generado por los productos de la combustión del inflamador. En este caso se alcanza tanto una inflamación estable como una suavidad de la curva de elevación de la presión en la etapa inicial (ver Fig. 3.4). (curva 1)
- Si la inflamación se produce para un valor del tiempo, sustancialmente menor al tiempo cuando se alcanza la máxima presión, entonces la curva de la presión va a tener un tipo (curva 2), si es que la inflamación se produce mucho más tarde entonces la entrada puede ser alargada y la inflamación va a ser inestable (curva 3). En este último caso, inclusive se producirá la inflamación de solo una dispersión considerada de los parámetros temporales de entrada del motor al régimen estacionario.

En condiciones cuando la inflamación de la carga se produce con el tapón cerrado el principio de selección óptima del peso de la composición inflamatoria se puede formular de otras formas:

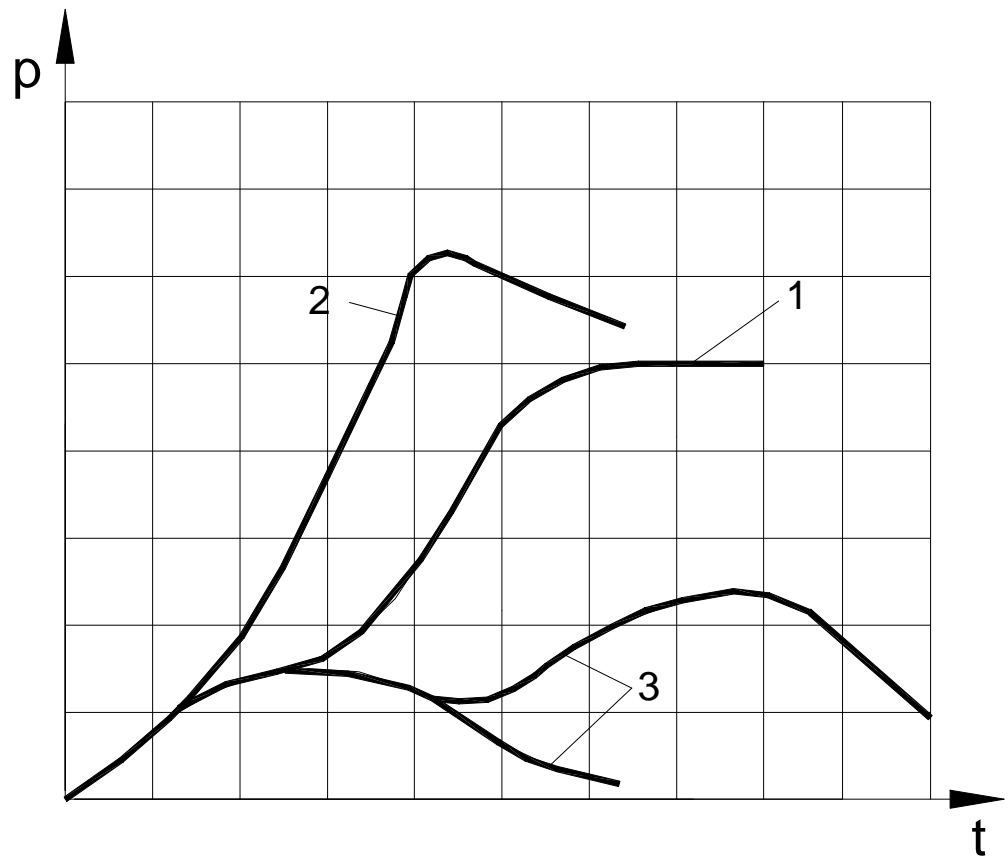


Figura 3.4 CURVA DE ELEVACIÓN DE LA PRESIÓN EN LA ETAPA INICIAL

- Al momento del inicio de la inflamación de la carga deberá arder determinándose el porcentaje de la masa inicial de la composición inflamatoria. En calidad de una condición adicional de la optimicidad del proceso puede ser adoptada la posición perimetral al régimen de calentamiento de la carga el cual deberá garantizar que se alcance simultáneamente la temperatura crítica de la inflamación sobre la superficie del combustible y la cantidad crítica de calor en la capa calentada.  
La idea de esta condición consiste en idealizar una transfusión desde el régimen de calentamiento al régimen de combustión casi estacionaria y una red de reestructuración sustancial de la capa calentada.
- En calidad de la segunda condición se puede adoptar determinada magnitud de la presión de los productos de la combustión del inflamador  $P_{K.B}$  en la cámara, durante el cual comienza la inflamación de la carga.

Estos son los principales principios sobre los cuales se puede fundamentar la base de la deducción de funciones simples para el cálculo de la masa requerida y de la medida inicial de los granos de la composición inflamatoria, señalaremos uno de los caminos posibles para realizar este principio, de esta manera fundamentaremos las secuencias posibles para el cálculo de variación del peso y de las medidas iniciales de los granos de la composición inflamatoria, aplicable a las consideraciones típicas de los motores de cohetes (ver fig. 2.2)

Elegiremos la magnitud aproximada de la presión  $P_{K.B}$  en la cámara de combustión durante el cual comienza la inflamación del combustible sólido. Mas adelante tendremos dos pasos:

- La presión  $P_{K.B}$  es mayor a la presión  $P_3$ , durante el cual se abre el tapón, que inicialmente cierra la tobera del motor, ósea la inflamación se produce en una cámara abierta.
- La presión  $P_{K.B}$  es menor a la presión  $P_3$ , ósea la inflamación se produce en una cámara cerrada.

**Vamos a examinar el inicio del caso de la inflamación en una cámara abierta.**

- Conocida la magnitud de la presión  $P_{K.B}$  y partiendo de la posición mediante, el cual la inflamación comienza en el momento, que le corresponde cuando se alcanza el máximo de la curva de la presión en la cámara, creado por los productos de la combustión de la composición inflamatoria, ósea cuando se iguala el ingreso y el gasto de la cámara, expresaremos la magnitud  $Q_B$  del ingreso masico de los productos de la combustión de la composición inflamatoria por la función

$$Q_B = \varphi_2 \Gamma \frac{P_{K.B} F_{KP}}{\sqrt{R_B \chi T_{r.B}}} \quad (3.53)$$

Adoptando la magnitud del ingreso de gas en calidad de promedio para todo el periodo inicial de la combustión de la composición inflamatoria, vamos a determinar el retardo de la inflamación  $t_T$ , igual al tiempo, que se desarrolla desde el ingreso de los productos de la combustión de la composición inflamatoria a la cámara y hasta el inicio de inflamación del combustible sólido. La magnitud buscada  $t_T$  se determina según las funciones 3.44 y 3.46 para el motor cargado con una carga que arde desde el canal y según la función 3.52 para el motor cargado para una carga que arde desde el extremo en el cual la magnitud  $\rho_{cp}$  sea  $P_{K.B} / \chi R_B T_{r.B}$

Mas adelante seguir la función  $\omega_B = Q_B t_T$  (3.54).

Hallando la masa de la composición inflamatoria, que arde hasta el inicio de la inflamación de la carga. El peso de la masa buscada  $\omega_{B.H}$  deberá separar un poco la magnitud  $\omega_B$ , ya que al momento del inicio de la inflamación deberá crearse un ingreso de los productos de la combustión de la composición inflamatoria, aproximadamente igual a su gasto o caudal de la cámara. De aquí se deduce

$$\omega_{B.H} = \zeta \omega_B, \quad (3.55)$$

donde  $\zeta$  es mayor que 1,

El valor de  $\zeta$  debe ser adoptado de 1.2 a 1.3

El espesor de la bóveda que arde de la composición inflamatoria al momento del inicio de la inflamación hallándose la función

$$e_B = u_B t_T \cong u_{1B} \left( \frac{P_{K.B}}{P_{aTM}} \right)^{V_B} t_T. \quad (3.56)$$

El espesor inicial total de la bóveda  $e_{B.H}$  de la composición inflamatoria deberá superar a  $e_B$  ya que parte de la composición arde después del momento  $t_T$ . Para cálculos evaluativos se puede considerar que  $e_{B.H} \approx 1.5 e_B$  para lograrlo de una forma cúbica o esférica,  $e_{B.H} \approx 1.2 e_B$ , para los granos con una superficie de la combustión aproximadamente constante.

**Para el caso de la inflamación en una cámara cerrada es conveniente:**

- Al inicio obtendremos la magnitud del tiempo  $t_T$  retardo de la inflamación, colocando el valor de  $t_T$  de la formula 3.44 en 3.46 y resolviendo las relaciones obtenidas con respecto a  $Q_B$ , hallamos la magnitud media del ingreso del gas masico de los productos de la combustión de la composición inflamatoria para el motor equipado con un carga que arde desde el canal, mas adelante se determina la masa  $\omega_B$  de la composición inflamatoria que arde hasta el inicio de la inflamación de la carga:

$$\omega_B \cong Q_B t_T \quad (3.57)$$

Para el motor equipado con una carga que arde desde el extremo según la magnitud conocida  $t_T$  se determina el flujo calorífico térmico  $q_{cp}$  y luego se halla la densidad media  $\rho_{cp}$  de los productos de la combustión de la composición inflamatoria en la cámara, la magnitud de  $\omega_B$  se determina de una función simple

$$\omega_B \cong 2p_{cp} V_K \quad (3.58)$$

El peso total de  $\omega_{B,H}$  de la composición inflamatoria puede hallarse según la fórmula 3.55. Para calcular el espesor inicial  $e_{B,H}$  de la bóveda que arde se determina al inicio la presión  $p_{K,B}$ , durante el cual comienza la inflamación de la carga

$$p_{K,B} = \frac{\omega_B x R_{r,B} T_{r,B}}{V_K} \quad (3.59)$$

Más adelante hallamos el valor aproximado del espesor  $e_B$  de la bóveda, que arde al inicio de la inflamación de la carga, utilizando la función 3.56 observaremos, que del valor  $e_B$  en el caso examinado se determina considerablemente mayor, ya que la velocidad de la combustión  $u_B$  está calculado para el máximo valor de la presión en el momento del tiempo  $t_T$ , igual a  $P_{K,B}$ .

Por esta razón el valor del espesor inicial especial total de la bóveda  $e_{BH}$  puede ser adoptado solamente un poco mayor al valor  $e_B$ , calculado según la fórmula 3.56

En conclusión otra vez podemos conocer, los métodos descritos de cálculo de la masa requerida y del espesor inicial de la bóveda que arde con la composición inflamatoria es simplemente evaluativo. Un cálculo más fundamental y más preciso o exacto requiere de uso de todo el conjunto de ecuaciones, que describen la dinámica del proceso de inflamación.

Utilizando la metodología arriba descrita, I.D. Skvartsov [2] halló las funciones para el cálculo de la masa de la composición inflamatoria de pólvora de humo y de la composición cuando está ubicado el dispositivo inflamador en el fondo delantero.

Para la composición inflamadora de pólvora de humo:

$$\omega_b = c_1 \bar{a}_{1b} \bar{a}_{1T} \frac{F_0 W_K^{0,3}}{\Pi_0^{0,2}} + c_2 \bar{a}_{2b} F_{kp} \quad (3.60)$$

donde  $C_1$  y  $C_2$  son coeficientes constantes ( $C_1 = 1,8 \cdot 10^{-4}$ ,  $C_2 = 0,45 \cdot 10^{-2}$ )

$\bar{a}_{1b}$ ,  $\bar{a}_{2b}$  son coeficientes que dependen de la marca de la pólvora de humo ver tabla N° 1

$F_0$  -es el área de la sección del canal de al carga

$\Pi_0$  -es el perímetro mojado de la sección del ducto de la carga

$W_K$  -es el volumen libre inicial del motor

$F_{kp}$  -es el área de la sección crítica de la tobera

TABLA N° 1

Valores de los Coeficientes  $\bar{a}_{1b}$ ,  $\bar{a}_{2b}$  para diferentes marcas de la Pólvora de Humo

Marca de la pólvora de humo	ИЗДР-1	ИЗДР-2	ДРП-1	ДРП-2	ДРП-3	ДРП-4
$\bar{a}_{1b}$	1,0	0,91	0,76	0,69	0,65	0,59
$\bar{a}_{2b}$	1,0	0,63	0,25	0,16	0,11	0,073

$a_{1T}$  - es el coeficiente que depende de la marca del combustible sólido el cual produce la carga.

Para los combustibles balísticos

$$a_{1T} = 0.74 \text{ hasta } 1.0$$

Para los combustibles híbridos

$$a_{1T} = 1.5 \text{ hasta } 2.0$$

Cuando se determine la masa de la composición inflamatoria las medidas geométricas se escogen en centímetros, mientras que las masas se pierden en kilogramos.



La formula para determinar la masa y el peso de inflamación de la composición inflamatoria se ve en la (formula 3.61)

$$\omega_b = c_{\pi} \bar{a}_{IT}^{-1.5} \frac{F_0 W_K^{0.6} e_{BH}^{0.2}}{\Pi^{0.55}} \quad (3.61)$$

- donde  $c_{\pi}$  es un coeficiente constante ( $c_{\pi} = 2.25 \times 10^{-4}$ )
- $e_{B.H}$  es la bóveda que arde inicial de la pastilla pirotécnica.
- $F_0$  es el área de la sección del canal de al carga
- $\Pi_0$  es el perímetro mojado de la sección del ducto de la carga
- $W_K$  es el volumen libre inicial del motor
- $F_{kp}$  es el área de la sección critica de la tobera

En la ultima formula los parámetros geométricos también se dan en cm y como resultados se obtienen Km. A diferencia de las formulas anteriormente desarrolladas empíricas o semi empíricas, para determinar el peso de la composición inflamatoria, estas dos formulas dan buenos resultados en un rango amplio de variación de los parámetros del motor de la carga y del combustible.

## CAPITULO IV

### CIERTOS RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES

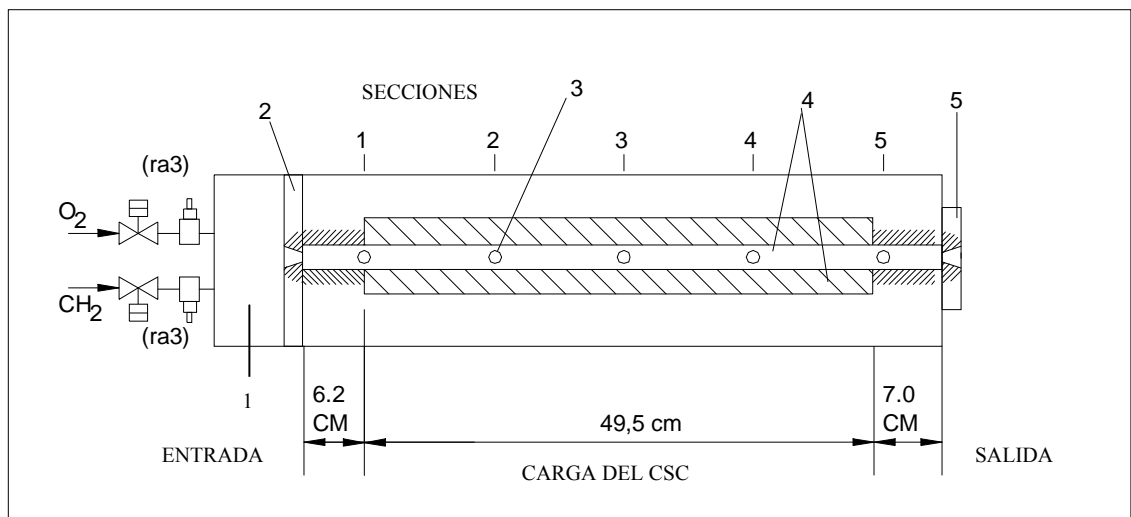
#### 4.1 Investigaciones en la cámara experimental

En una cámara plana especial se han realizado experimentos para modelar los procesos de la inflamación y de la combustión en el Motor Cohete de Combustible Sólido, la cámara esta equipada por diferentes ventanas para un fotografiado o filmado, ver Fig. 4.1.

La cámara esta compuesta, de una parte de entrada de la carga del combustible sólido del cohete y de la parte de salida. La carga del combustible sólido del cohete son dos bloques paralelos de combustible en forma de placas o laminas (ancho 25.4 mm y espesor 6.35 y la longitud 495 mm). La inflamación se produce con ayuda de un dispositivo periférico, y los gases de escape o ya quemados se descarguen a través de una tobera mezcladora. Las partes de entrada y salida, y también las paredes laterales de la cámara, que no están ocupadas con combustible, están cubiertas con una capa delgada de termo aislante en base a PBAH, con una concentración del 50% de oxido de titanio  $TiO_2$ . Después de que entre en funcionamiento la bujía eléctrica del inflamador el combustible arde y en el canal de la cámara se desarrolla un flujo de los productos de la combustión. A una baja presión de (0,1 – 0,3 Mpa.) en la cámara se establece un flujo subsónico con fricción y con intercambio de calor en la pared del canal. En el flujo de descarga puede alcanzarse o no alcanzarse la velocidad del sonido.

La primera fase del proceso transitorio es el periodo de inducción (retardo de la inflamación), que termina con la aparición de la llama en cierta parte de la superficie del combustible sólido del cohete.

El criterio adoptado de inflamación en el modelo consiste en que el combustible se inflama cuando alcanza cierta temperatura crítica  $T_{\text{inflamación}}$ . En la segunda fase comienza la propagación del frente de llama a lo largo de la carga. Durante el movimiento el frente de llama se acelera debido al incremento del flujo térmico, condicionado por un rápido incremento de la formación de gases.



**Figura 4.1** MCCS DE MODELACIÓN PARA ESTUDIAR LOS PROCESOS TRANSITORIOS DURANTE EL ARRANQUE

- 1.- CÁMARA INTERMEDIA DE COMBUSTIÓN DEL INFLAMADOR
- 2.-TOBERA DEL INFLAMADOR
- 3.-ORIFICIOS PARA LOS SENSORES DE PRESIÓN
- 4.-PLACAS DEL COMBUSTIBLE SÓLIDO DEL COHETE
- 5.-TOBERA DEL MOTOR

Como regla general, en la fase del proceso de arranque se establece un régimen crítico de descarga y la presión en la cámara rápidamente crece. La última fase del proceso es el periodo de llenado de la cámara con productos de la combustión, durante el cual puede aparecer la combustión erosiva, que facilita o condiciona la aparición de picos de presión. La combustión erosiva puede continuar cierto tiempo y se detiene solamente, cuando crece lo suficientemente la sección libre del canal de la cámara y cuando llega a darse el régimen casi estacionario de trabajo de funcionamiento del motor.

En los experimentos en los cuales se ha utilizado la cámara de moderación del motor propio de combustible sólido, una de cuyas paredes esta hecho en forma de una ventana de plexiglás de doble capa. Las pruebas de fuego con una extinción rápida con agua han mostrado, que en el periodo de arranque hasta que se alcance la presión pico de la cámara, la hablandación del plexiglás no se produce.

En cinco secciones a lo largo del canal con un intervalo de 127 mm. se han montado cinco sensores de presión de alta frecuencia, se ha previsto tres orificios adicionales para colocar termopares y sensores de los flujos térmicos. Para la inflamación de la carga se ha utilizado una mezcla de metano y de oxígeno, en composición parecido al estequeometrico.

La construcción del Motor de Cohetes de Combustible Sólido permite variar el caudal masico, la temperatura y el tiempo de funcionamiento del inflamador. Los experimentos se han hecho en un combustible, que contiene PXA y un aglutinante cuyas propiedades se dan en la tabla 2, para diferentes relaciones  $A_k/A_{kp}$  (1.06, 1.2, 1.5, 2).

Para obtener estas características, como función de  $p(T,x)$ , el retardo de la inflamación  $T_{\text{inflamación}}$ , y el control de estos procesos, como la propagación de la llama y la combustión erosiva, se han utilizado registros de la presión, el método de extinción por agua y la filmación veloz

TABLA 2  
PROPIEDADES DEL CSC

Composiciones 20% PBAK-EPON 828 80% PXA (30% 15 $\mu\text{m}$ - 70% 180 $\mu\text{m}$ )	
$p = 6,8\text{MPa}$ .....	0,804 cm/s
$n$ .....	0,4
$\lambda$ .....	$0,9 \times 10^{-3}$ Cal / Cm. seg $^{\circ}\text{K}$
$\rho_T$ .....	1.6 gr./cm <sup>3</sup>
$\alpha$ .....	$0.1875 \times 10^{-2}$ cm <sup>2</sup> /3
$W$ .....	22.01 gr/mol
$\gamma$ .....	1.24 gr/mol
$M$ .....	$0.87 \times 10^{-6} W^{0.5} T^{0.65} \Pi_3$
$q_D$ .....	0.4665 Cal/gr $^{\circ}\text{K}$
$R$ .....	0.09025 Cal/gr $^{\circ}\text{K}$
$T$ inflamación.....	700 $^{\circ}\text{K}$
$T$ combustión.....	2225 $^{\circ}\text{K}$
$T$ combustible.....	298 $^{\circ}\text{K}$
$k$ .....	5.72 Cm <sup>3</sup> $^{\circ}\text{K}$ /Cal
$\beta$ .....	105

## 4.2 RESULTADOS

En la Fig. 4.2 se muestra el proceso de transición de variación de la presión durante el arranque del Motor Cohete de Combustible Sólido según los registros en cinco secciones diferentes del canal.

En el periodo de retardo de la inflamación la presión en el canal es de 0,12Mpa. Después de 36 microsegundos del encendido del inflamador aparece la llama, lo que ha sido registrado con una filmación de alta velocidad. Debido a las bajas velocidades del gas en la parte de entrada del canal los registros de los sensores 1 y 2 se juntan. La presión en el lugar de ubicación del sensor 3 comienza a crecer un poco después, pero la curva es mas empinada. En la sección 1 la máxima presión se consigue después de 72 ms, y en la sección 5 después de 73.5 ms después de que se encienda el inflamador.

En la Fig. 4.3 se comparan las curvas experimentales y de calculo de la presión-tiempo en las secciones 1 y 5 en las fases de retardo de la inflamación se tiene una concordancia muy buena de los resultados. En la parte de propagación del frente de llama a lo largo de la carga se nota cierta correspondencia de los resultados cuando se considera el efecto de la combustión erosiva.

En la Fig. 4.4 se comparan las distribuciones de las presiones experimentales y de calculo a lo largo del canal de la carga en 4 diferentes momentos de tiempo cuando entra el motor al régimen y también se observan buena correspondencia de los resultados.

En la Fig. 4.5 se muestra las curvas de distribución de la velocidad axial del gas y de la temperatura a lo largo del canal de la carga calculada en los mismos momentos de tiempo.

En la Fig. 4.6 se muestra las variaciones y la posición calculada del frente de llama en función al tiempo que permiten juzgar también sobre la velocidad de propagación de la llama.

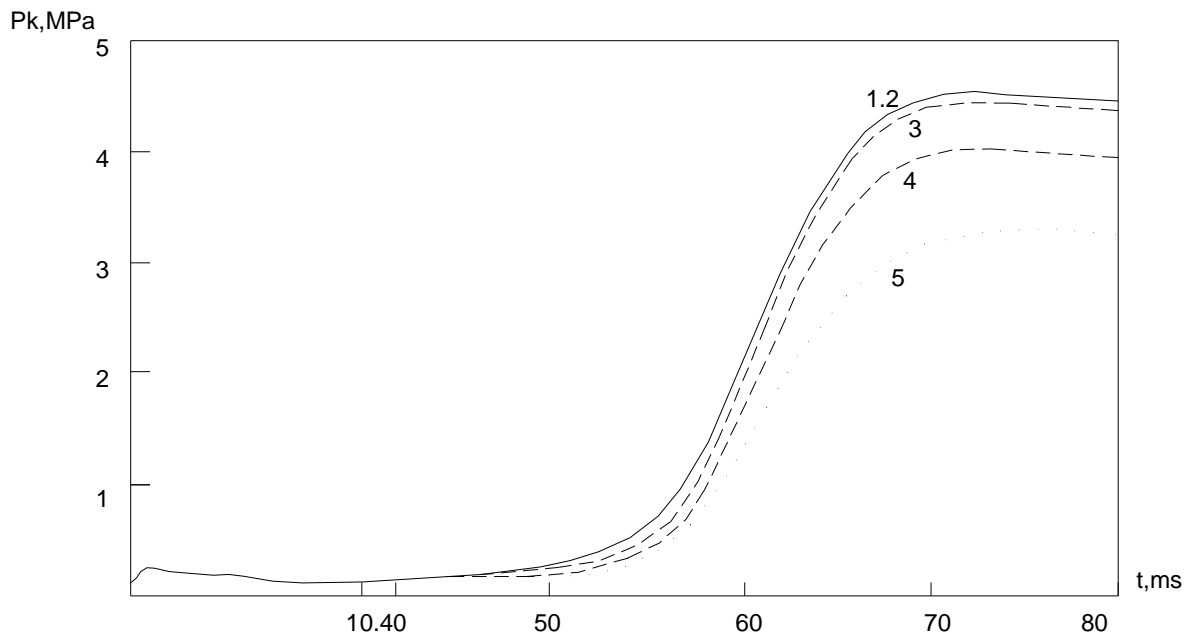
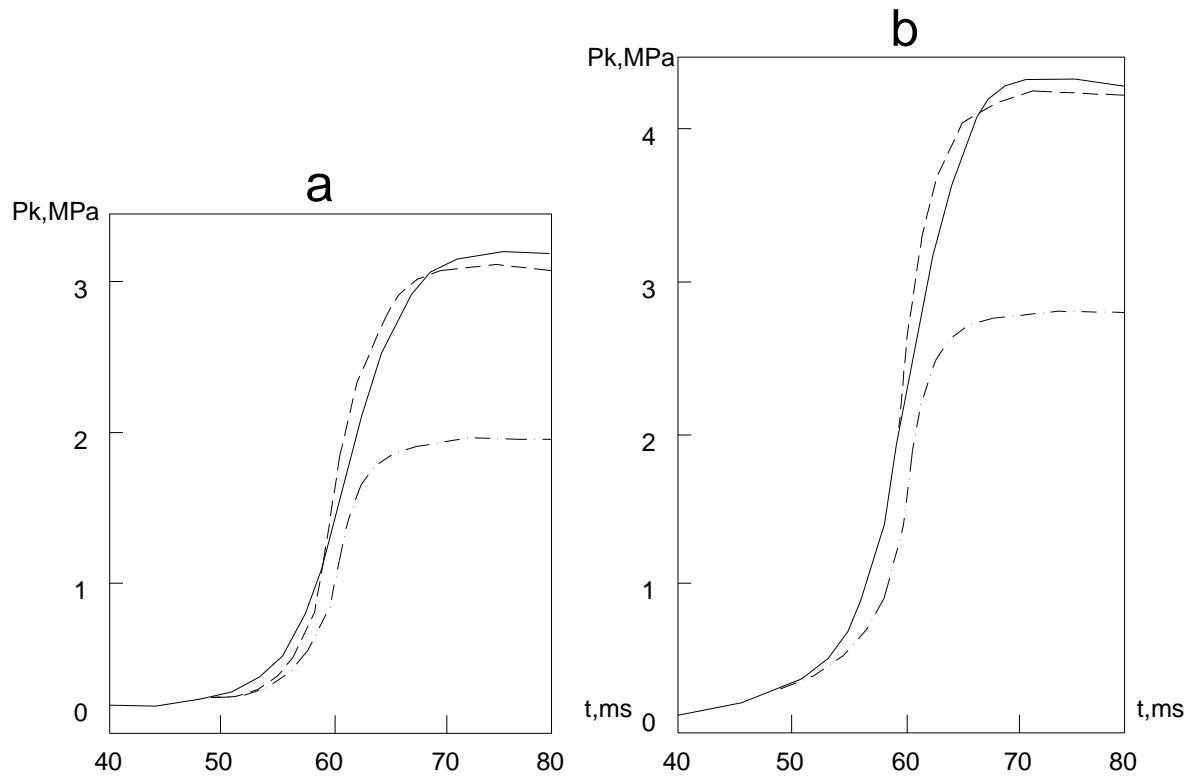


Figura 4.2 VARIACION DE LA PRESIÓN SEGÚN EL TIEMPO EN CINCO SECCIONES DEL CANAL DEL MCCS DURANTE EL ARRANQUE, QUE ILUSTRAN LA EXISTENCIA DEL GRADIENTE NEGATIVO DE LA PRESIÓN A LO LARGO DEL EJE DE LA CARGA.

$$A_K/A_{KP} = 1.2 \quad ; \quad \dot{m}_{infl} = 15.0 \text{ gr} / \text{s}$$

1,2,3,4,5 - Las cifras corresponden a los números de las secciones en la fig. 4.1



**Figura 4.3** COMPARACIÓN DE LOS DIAGRAMAS EXPERIMENTALES Y DE CALCULO DE LA PRESIÓN, TIEMPO PARA LAS PARTES DE ENTRADA a) Y SALIDA b) DEL MCCS

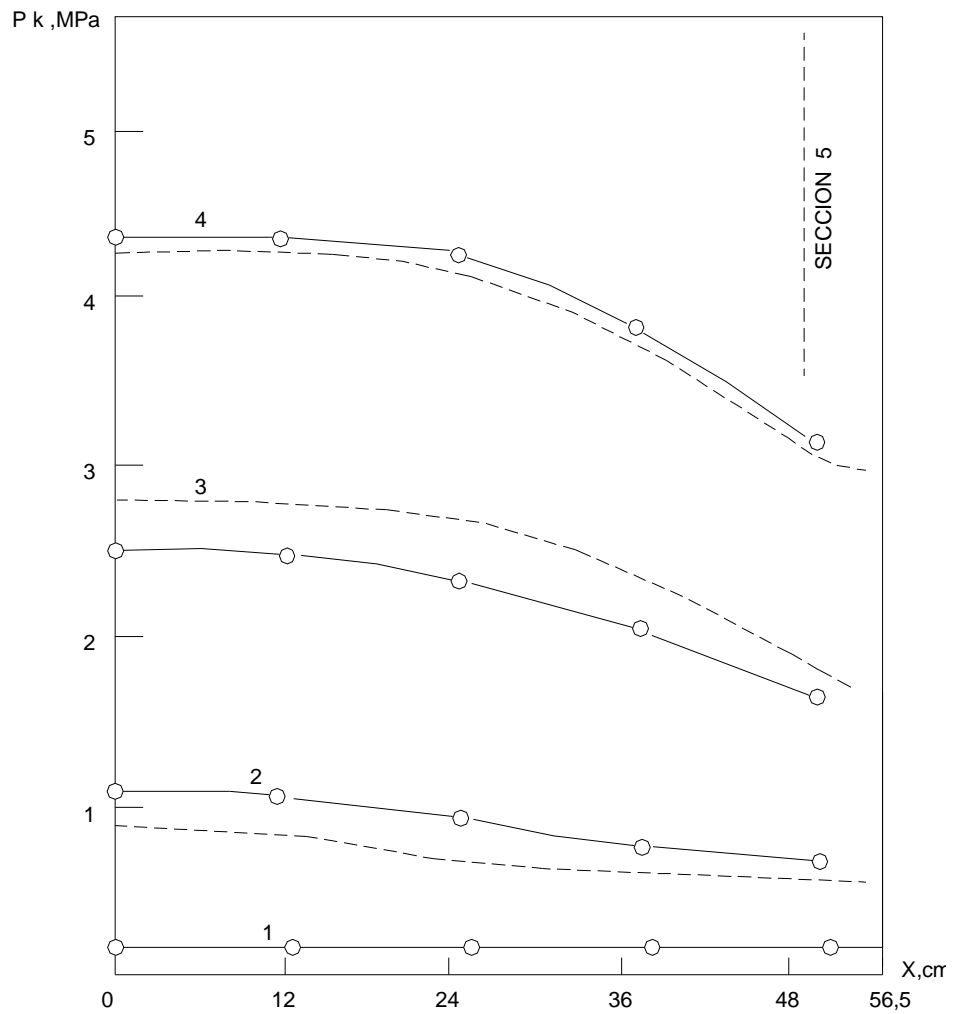
$$A_K/A_{KP} = 1.2 \quad ; \quad \dot{m}_{infl} = 15.0 \text{ gr} / \text{s} \quad ; \quad T_{infl} = 2410 \text{ }^\circ\text{K}$$

— datos experimentales

----- calculado

-.-.- calculado sin combustion erosiva





**Figura 4.4** COMPARACIÓN DE LAS DISTRIBUCIONES DE LA PRESIÓN EXPERIMENTALES Y CALCULADAS A LO LARGO DEL EJE DE LA CARGA PARA CUATRO INTERVALOS TÍPICOS DE LA PRESIÓN

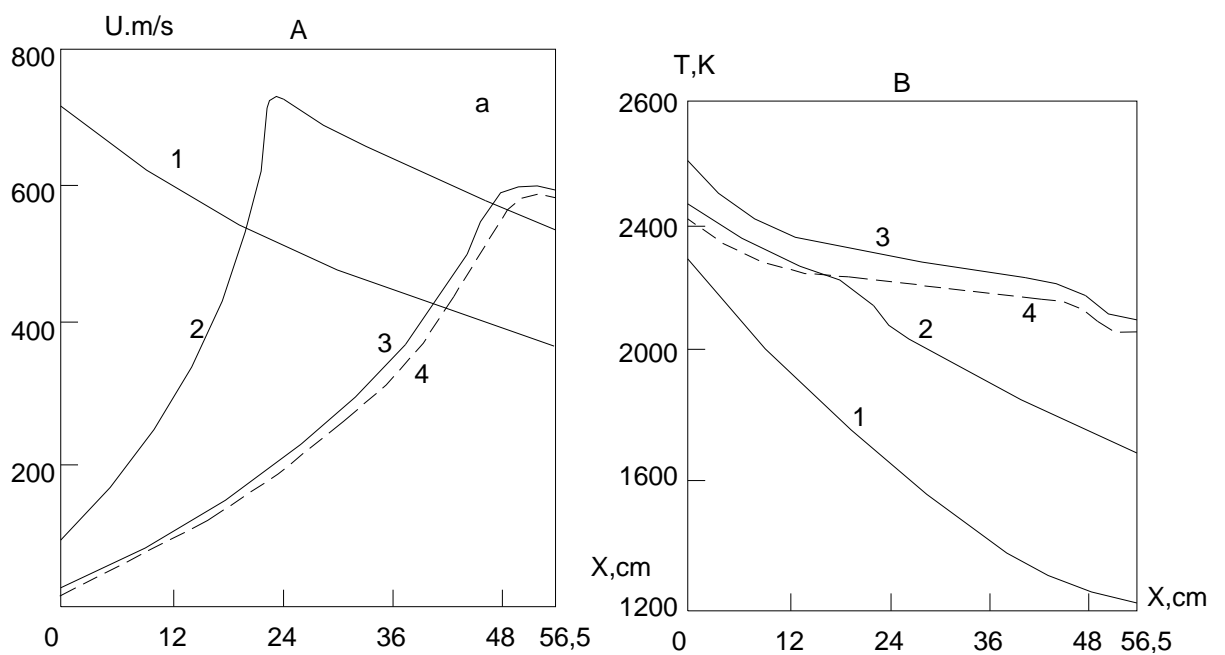
$$A_K/A_{KP} = 1.2 \quad ; \quad T_{infl} = 2410 \text{ } ^\circ\text{K}$$

— datos experimentales

----- calculado

Según los resultados de estos experimentos se puede hacer una deducción, de que con el aumento del caudal de los productos de la combustión del inflamador  $m_{\text{inflamación}}$  y la relación de las áreas  $A_k/A_{KP}$  la velocidad de propagación de la llama a lo largo de la carga aumenta. Cuando esta relación  $A_k/A_{KP} = 2$  y  $m_{\text{inflamación}} = 20$  g/seg la velocidad del frente de llama es de 10 a 200 m/s. Esta influencia de las relaciones de áreas es comprensible, para una combinación dada de los parámetros del motor y del Combustible Sólido de Cohetes la magnitud de esta relación de áreas  $A_k/A_{KP}$  aumenta cuando disminuye  $A_{kp}$  y por consiguiente cuando aumenta  $p_k$ . En este caso las reacciones químicas van a desarrollarse más rápido y va acrecer la intensidad de intercambio de calor.

En la Fig. 4.7 se ilustra la influencia del caudal en los productos de la combustión del inflamador sobre el periodo de retardo de la inflamación, que cae desde 60 hasta 20 ms cuando aumenta al doble la magnitud  $m_{\text{inflamación}}$ . La pendiente de la recta es muy parecida al valor calculado según las relaciones para el intercambio de calor turbulento.



**Figura 4.5** DISTRIBUCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL GAS A LO LARGO DEL CANAL DE LA CARGA Y DE LA TEMPERATURA CALCULADA PARA CUATRO INTERVALOS TÍPICOS DE TIEMPO.

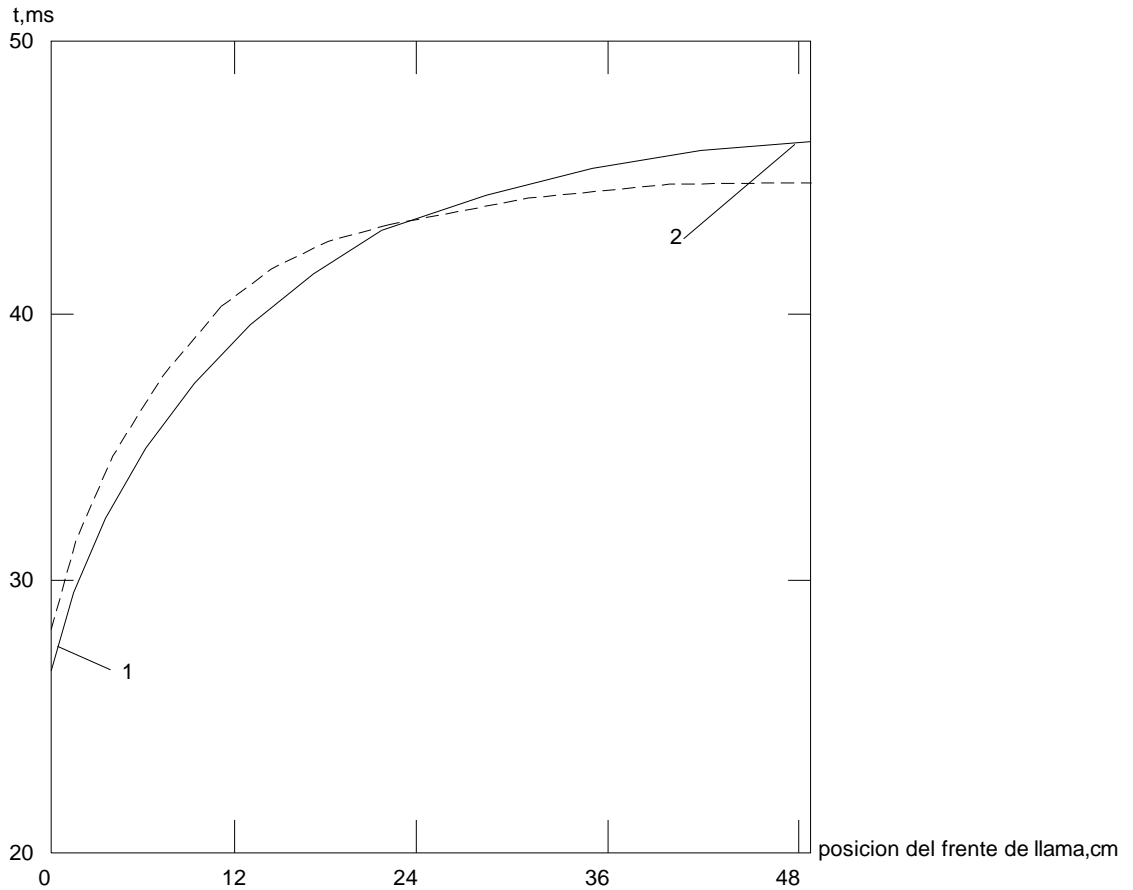
$$A_K/A_{KP} = 1.2 \quad ; \quad T_{infl} = 2410 \text{ °K}$$

1- Periodo de inducción, 25 ms

2- Propagación de la llama, 57 ms

3- Llenado de la cámara de combustión, 61 ms

4- Pico de la presión cerca al extremo delantero, 72 ms



**Figura 4.6** VARIACIONES Y LA POSICIÓN CALCULADA DEL FRENTE DE LLAMA EN FUNCIÓN AL TIEMPO QUE PERMITEN JUZGAR TAMBIÉN SOBRE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA LLAMA.

1. VELOCIDAD INICIAL DE PROPAGACIÓN DE LLAMA 8,3 m/s
2. VELOCIDAD FINAL DE PROPAGACIÓN DE LA LLAMA 126 m/s

$$A_K/A_{KP} = 1.5 \quad ; \quad \dot{m}_{infl} = 17.9 \text{ gr} / \text{s} \quad ; \quad T_{infl} = 2340 \text{ }^\circ\text{K}$$

\_\_\_\_\_ Experimental

----- calculado

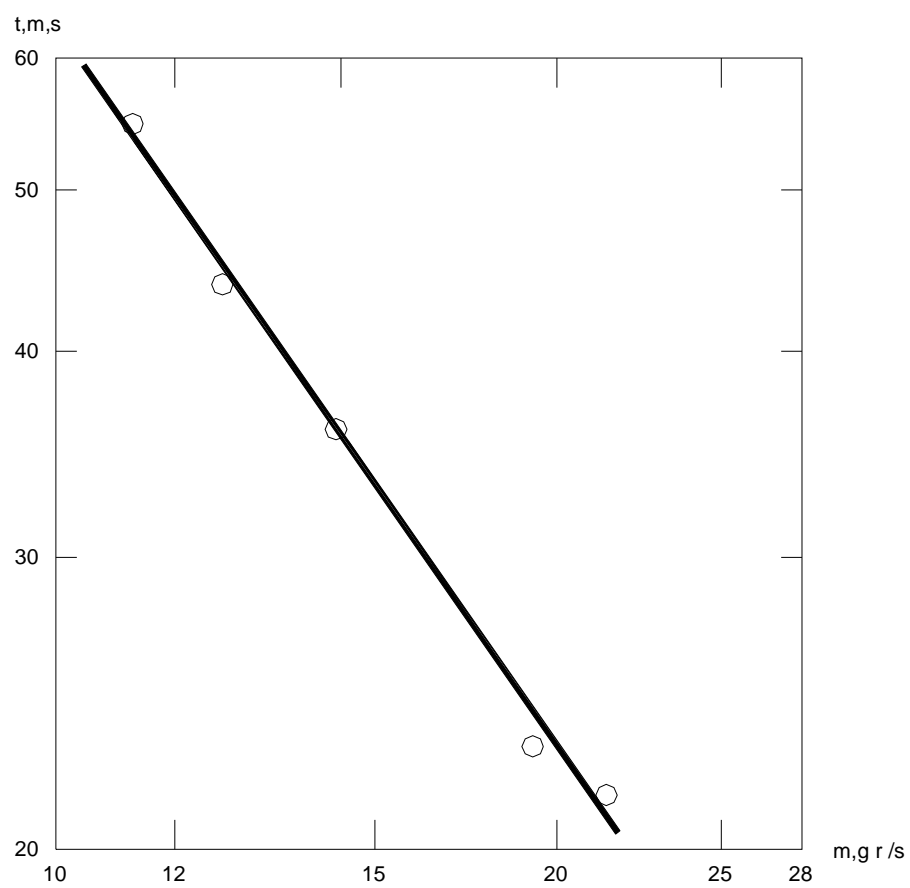


Figura 4.7 VALORES MEDIDOS DEL RETARDO DE LA INFLAMACIÓN DE LA CARGA

$$A_K/A_{KP} = 1.2 \quad ; \quad \text{pendiente de la recta } 1,5 \text{ s}^2/\text{Kg}$$

## CONCLUSIONES

- 1.- En base al estudio y análisis de la variedad de construcciones existentes de los dispositivos inflamadores se han determinado los medios pirotécnicos para la inflamación que se encuentran ubicados en el fondo delantero del Motor Cohete de Combustible Sólido ya que esta configuración crea las condiciones mas favorables para la inflamación de la carga de combustible sólido.
  
- 2.- Para aumentar la confiabilidad del encendido del Motores Cohetes de Combustible Sólido de los tipos existentes de dispositivos inflamadores se han seleccionado los inflamadores pirotécnicos tipo  $Zr + BaCrO_4$  con los siguientes dispositivos:
  - a. Dispositivos iniciadores con piró espoletas
  - b. La composición de transferencia compuesto de:
    - 1).El oxidantes Cromato de Bario ( $BaCrO_4$ ) en forma de granos
    - 2).El comburente Zirconio ( $Zr$ ) en forma de granos
  - c. La composición inflamatoria principal de la carga del Combustible sólido compuesta por Pólvora de Humo ya que este sistema es de fácil inflamabilidad.
  
- 3.- De las teorías existentes de la inflamación del combustible sólido se propone “La teoría de inflamación en una fase sólida”, ya que la inflamación estable se produce cuando se alcanza la temperatura critica en la superficie del combustible (Temperatura de inflamación).
  
- 4.- La base para construir el modelo matemático del proceso inflamatorio en la cámara de combustión del MCCA es:
  - El aparato de la teoría de los flujos unidimensionales en el canal de la carga,
  - Las relaciones que se deducen de las leyes de conservación de la masa y de la energía,
  - Las ecuaciones del intercambio de calor y la carga
  - y una serie de funciones específicas.

5.- En base al modelo matemático del proceso de inflamación se ha efectuado una optimización de las relaciones matemáticas obtenidas en un sistema único de ecuaciones que describen toda la variación de las magnitudes medias en el volumen libre de la cámara de combustión y de sus elementos:

- De la Presión, Densidad, Temperatura y otros parámetros físicos durante el periodo de inflamación.

6.- Considerando el principio de una promediación parcial de las magnitudes físicas y también utilizando la metodología del Dr. I.D. Skvartsov se ha obtenido una ecuación para el cálculo de la masa de la composición inflamadora de la pólvora de humo y de la composición pirotécnica cuando el dispositivo inflamador se ubica en el fondo delantero del Motor del Cohete de Combustible Sólido.

7.- En las investigaciones experimentales y teóricas básicas la influencia de diferentes factores sobre el retardo de la inflamación son los siguientes:

a) El aumento del retardo de la inflamación influye en:

- El aumento del flujo calorífico o térmico externo
- El aumento de la presión
- El aumento de contenido de oxígeno en la composición de combustible sólido de cohetes
- El aumento de la velocidad de reacción de la fase gaseosa
- El aumento de la temperatura inicial
- El aumento de la velocidad del gas

b) El crecimiento del retardo de la inflamación influye :

- Cuando aumenta la energía de activación del proceso de pirolisis
- Con el aumento de la relación de las densidades del gas y de la fase sólida o la relación de los coeficientes de conductividad de calor.
- Con el aumento de las medidas de las partículas del oxidante

## RECOMENDACIONES

Del análisis del estudio efectuado en la presente tesis se recomienda:

- 1.- El uso de los inflamadores pirotécnicos tipo  $Zr + BaCrO_4$  los cuales permiten aumentar la confiabilidad del encendido del Motores Cohetes de Combustible Sólido para lo cual debe estar asociado a los siguientes dispositivos:
  - Dispositivos iniciadores con piró espoletas
  - La composición de transferencia compuesto de:
    - 1).El oxidantes Cromato de Bario ( $BaCrO_4$ ) en forma de granos
    - 2).El comburente Zirconio (Zr) en forma de granos
  - La composición inflamatoria principal de la carga del Combustible sólido compuesta por Pólvora de Humo ya que este sistema es de fácil inflamabilidad.
- 2.- En la construcción de motores de cohetes los medios pirotécnicos para la inflamación deben ser ubicados en el fondo delantero del Motor Cohete de Combustible Sólido ya que esta configuración crea las condiciones más favorables para la inflamación de la carga de combustible sólido
- 3.- El uso de las relaciones matemáticas obtenidas mediante la optimización en un sistema único de ecuaciones que describen toda la variación de las magnitudes medias en el volumen libre de la cámara de combustión y de sus elementos (La presión, densidad, temperatura y otros parámetros físicos durante el periodo de inflamación) necesarios para la construcción de lo motores de cohetes de combustible sólido.
- 4.- La aplicación de la ecuación obtenida para el calculo de la masas de la composición inflamadora de la pólvora de humo y de la composición pirotécnica cuando el dispositivo inflamador se ubica en el fondo delantero del Motor del Cohete de Combustible Sólido la cual permitirá optimizar la inflamación del compuesto inflamador, el quemado homogéneo del combustible sólido y la entrada del motor al régimen estacionario .



## BIBLIOGRAFÍA

1. RAIZBERG B.A., YEROJIN BG, SAMSONOV KV, Fundamentos de la teoría de los procesos de trabajo en los sistemas coheteriles en base a combustible sólido. Moscú “Mashinoestroyenie” 1972, 836 paginas
2. Procesos no estacionarios de la combustión en los motores cohetes. Conclusiones de la ciencia y de la técnica. Motores aeronáuticos y de cohete. Bajo la redacción de AZ CHULKOV, Moscú Instituto de Investigación de la Academia de ciencias de la Unión Soviética. TOMO II 1977 199 paginas.
3. Siemienov N.N. Reacciones en cadena. Leningrado 1934 347paginas
4. Sielovich Y.B. Sobre la Teoría de la combustión de las pólvoras y los explosivos. RETF 1942 N° 12 251 paginas
5. Sielovich Y.B. sobre la Teoría del encendido. Academia de Ciencias de la Unión Soviética 1963 N° 2
6. Librovich V.B. Sobre la inflamación de las pólvoras en las sustancias explosivas RTMTF 1973 N° 6
7. Andreev k.k. Descomposición térmica y combustión de las sustancias explosivas. Moscú 1957
8. Freinsten JH , Hiks BL Thermal theory of ignition propellant physical and color kent 1950 volumen 54
9. MAC-ALENI R.F. y otros Mecanismos de Inflamación de los combustibles híbridos con gases calientes. Juego de tomos “Investigación de los motores cohetes en base ha combustible sólido” Moscú Instituto Científico 1983 861 paginas

10. Sorkin LE Gasotermodinamica de los motores cohete en base a combustible sólido Moscú 1967
11. Ludvicov AV Teoría de la conductividad de calor. Moscú 1967 970 paginas.
12. Pesov A, QO KK KDMiLH and Summerfiel Moscú 1963 Starting story propellant
13. IVKAD in Motores cohetes en base a combustible químico. Moscú "MIR" 1990 296 paginas.