

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE CIENCIAS

Sección de Post – Grado y 2da. Especialización Profesional



TESIS

Para Optar el Grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS
MENCION INGENIERIA AERONAUTICA
(VEHÍCULOS NO TRIPULADOS)**

***OPTIMIZACION DE LOS REGÍMENES DE TRABAJO DE LOS
MOTORES COHETE A COMBUSTIBLE SÓLIDO EN FUNCION AL
TIPO SELECCIONADO DEL CONJUNTO DE CORTE DEL EMPUJE***

PRESENTADA POR:

**Henry LAGUNA TORRES
MAY. FAP**

ASESORADO POR:

Dr. Nicolai PATRAKHALTSEV

**Lima, Perú
2002**

INDICE DE LA TESIS

PERTENECIENTE A: MAY. FAP. LAGUNA TORRES, Henry

Código del Alumno: 986125 I

Título de la Tesis: ***OPTIMIZACIÓN DE LOS REGÍMENES DE TRABAJO DE LOS MOTORES COHETE A COMBUSTIBLE SÓLIDO EN FUNCIÓN AL TIPO SELECCIONADO DEL CONJUNTO DE CORTE DEL EMPUJE***

Portada

Dedicatoria

Agradecimiento

Simbología

Índice

Introducción

Capítulo I

CONSTRUCCIONES DE LOS CONJUNTOS DE CORTE DEL EMPUJE (CCE)

Capítulo II

ANÁLISIS DEL REGIMEN DE TRABAJO DEL MCCS EN EL PERIODO DE ABERTURA DE LOS ORIFICIOS ADICIONALES

2.1.- Procesos físicos que ocurren en la Cámara de Combustión del MCCS. durante la abertura de los orificios adicionales

2.2.- Sobre las particularidades de la combustión del combustible sólido en el régimen de intensa caída de la presión y en el régimen de presión reducida en la cámara de combustión

2.3.- Descripción matemática del proceso, que se sucede en la cámara de combustión después de la abertura de los orificios adicionales

2.4.- sobre la extinción de la carga de combustible sólido durante una brusca caída de la presión en la cámara de combustión

Capitulo III

PROCESO DE EXTINCIÓN DE LA CARGA DEL COMBUSTIBLE SÓLIDO MEDIANTE LA INTRODUCCIÓN DE AGENTE REFRIGERANTE LÍQUIDO A LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

3.1 Fundamentos físicos

3.2. Descripción matemática de los procesos en la cámara de combustión durante la extinción de la carga mediante la inyección del liquido refrigerante

Capitulo IV

ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA PRESIÓN EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN DURANTE LA EXTINCIÓN DE LA CARGA CON INYECCIÓN DEL LIQUIDO REFRIGERANTE

4.1 Fundamentos físicos

4.2. Sobre las condiciones que garantizan la extinción de la carga con inyección del liquido refrigerante

4.3 .Ejemplo de calculo de determinación de la masa del liquido necesario para el extinguido de los productos de la combustión

Conclusiones

Bibliografía

Lima, 28/01/2002



Asesor de Tesis
DOCTOR EN CIENCIAS
NICOLAI PATRAKHALTSEV



Autor de Tesis
MAYOR FAP
HENRY LAGUNA TORRES

OPTIMIZACIÓN DE LOS REGÍMENES DE TRABAJO DE LOS MOTORES COHETE A COMBUSTIBLE SÓLIDO EN FUNCIÓN AL TIPO SELECCIONADO DEL CONJUNTO DE CORTE DEL EMPUJE.

Resumen del Tema de Tesis:

Una parte componente de las plantas de poder de los misiles en base a combustible sólido es el dispositivo de corte de empuje (apagado, reversa, anulación). A diferencia de los motores cohetes de combustible líquido, donde el principio de corte de empuje es sencillo y necesita solamente la presencia de válvulas de corte, en los motores cohetes de combustible sólido (MCCS) se debe prever dispositivos especiales.

El presente trabajo está dedicado a la descripción y al análisis de las diferentes construcciones de los conjuntos de corte del empuje, a la fundamentación física y a la descripción matemática de los procesos que suceden en la cámara de combustión de los MCCS durante el corte del empuje. Se muestran las metodologías de cálculo de los principales parámetros de los conjuntos de corte de empuje y antes que nada de la determinación de la medida de los orificios adicionales abiertos en el motor para la extinción de la carga del combustible sólido.

En base a los datos bibliográficos estudiados sobre los dispositivos de corte del empuje de los motores de cohete de combustible sólido, en el trabajo de tesis se han planteado los siguientes problemas

- Analizar las construcciones existentes de los conjuntos de corte del empuje del MCCS con la finalidad de elegir la variante óptima para obtener el máximo alcance del misil.
- Analizar los regímenes del trabajo del MCCS en el período de apertura de los orificios adicionales de los dispositivos de corte y determinar la mejor configuración constructiva de ubicación de los orificios.

- Sobre la base de los fundamentos físicos del proceso de extinción de la carga, elegir la variante óptima para el propuesto.
- Analizar la variación de la presión en la cámara de combustión durante la extinción de la carga del líquido de enfriamiento de inyección.
- Realizar el cálculo aproximado de la cantidad de líquido refrigerante que se necesita para el enfriamiento

A handwritten signature in black ink, consisting of several stylized, overlapping loops and lines, positioned in the lower right quadrant of the page.

SIMBOLOGIA

- F_{Δ} - Área de los orificios adicionales en el tiempo
- $\varphi_{2\Delta}$ - Coeficiente de caudal a través de los orificios adicionales.
- p_{1CT}, p_{2CT} - Valores de la presión estacionaria en la cámara de combustión en el régimen inicial y secundario estacionari respectivamente.
- ΔP_E - Empuje resultante determinado como la diferencia del empuje directo P y del empuje de las toberas de reversa P_{peb} en la proyección sobre el eje longitudinal del motor
- φ - Angulo de inclinación del eje de las toberas de reversa respecto al eje de la tobera directa
- \mathcal{E}^* - Coeficiente que toma en cuenta la influencia de la sección oblicua de la tobera de reversa sobre el empuje
- \bar{d}_{OT} - Grado geométrico de expansión de las toberas de reversa (línea punteada en la fig. VIII)
- $p_1 p_{OT}$ - Presión en la cámara y en la salida de las toberas de reversa
- β - Angulo determinado por la inclinación de la directriz del segmento de unión respecto al eje del motor $(\beta + \gamma + \vartheta) = 90^\circ$.
- θ_a - Angulo de semi abertura de las toberas de reversa.
- I_1^*, I_1 - Impulso específico del MCCS después y antes de la abertura de la toberas de reversa respectivamente.
- σ_{OT}, σ_{KP} - Áreas de la secciones críticas de las toberas de reversa y directa respectivamente.
- t_{pe} - Tiempo de relajación de la capa caliente del combustible.
- χ_T - Conductividad térmica del combustible
- p_T - Presión durante la cual el combustible se apaga.
- θ_*, θ_H - Temperatura de gasificación y la temperatura inicial del combustible respectivamente.

- d_H - Diámetro inicial de la gota
- ξ - Constante de evaporización.
- D - Coeficiente de difusión de los vapores del refrigerante
- ρ_η - Densidad de los vapores en la superficie de la gota
- Sh - Numero de Sherwood (número de difusión de Nusselt)
- Re - Número de Reynolds para el flujo que recorre la gota.
- b - Coeficiente constante ($b \approx 0,3$)

$$b = B(\theta_* - \theta_H)$$

- Δt_{MS} - Duración del movimiento en la zona de los vapores saturados.
- $\Delta t_{uc\eta}$ - Tiempo de evaporización
- l - Extensión de la zona
- v_{op} - Velocidad media de movimiento de la gota, calculado considerando el frenado,
- G_{*p} - gasto calculado del líquido desde el sistema de eliminación hacia la cámara de combustión.
- v_* - Velocidad de la gota líquida (velocidad de la inyección)
- χ_n - Coordenada de la descripción de contacto que divide la zona de vapor-gas y la zona de los productos de la combustión del combustible.

- p_B, p - Presión en la cámara de eliminación y en la cámara de combustión respectivamente.

- F_B - Es el área del orificio a través del cual se inyecta líquido.
- ρ_* - Es la densidad del líquido

- φ_{2*} - Es el coeficiente de gasto del líquido a través del orificio de salida en el sistema de inyección.

- T_n, T_*, T_{CM} - Es la temperatura del componente (del vapor saturado, del líquido y de la mezcla respectivamente).

- G - Es el ingreso por segundo del componente.
- U_n - Es el calor específico de formación de vapor del líquido inyectado.
- c - Es el calor específico del componente.
- G_T - es el ingreso de masa de los productos de la combustión del combustible desde la parte no apagada de la carga.
- G_C - es el gasto másico de los productos de la combustión del combustible a través de la tobera
- P_H - es la presión en el momento de inicio de la descarga de la mezcla vapor-gas.
- k_n - es el exponente isotrópico de la mezcla vapor-gas
- ω^* - es la masa total del líquido refrigerante, introducido a la cámara de combustión
- ω_Γ - es la masa de los productos de la combustión que se encuentran inicialmente en la cámara
- $\mu_{OT}, \mu_C - \varphi_{OT}, \varphi_C$ - Coeficientes de caudal y de pérdidas en las toberas de reversa y directa respectivamente

INDICE

	Pág.
Portada	i
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Simbología	iv
Índice	vii
Introducción	1
Capítulo I	
CONSTRUCCIONES DE LOS CONJUNTOS DE CORTE DEL EMPUJE (CCE)	11
Capítulo II	
ANÁLISIS DEL REGIMEN DE TRABAJO DEL MCCS EN EL PERIODO DE ABERTURA DE LOS ORIFICIOS ADICIONALES	20
2.1.- Procesos físicos que ocurren en la Cámara de Combustión del MCCS. durante la abertura de los orificios adicionales	20
2.2.- Sobre las particularidades de la combustión del combustible sólido en el régimen de intensa caída de la presión y en el régimen de presión reducida en la cámara de combustión	23
2.3.- Descripción matemática del proceso, que se sucede en la cámara de combustión después de la abertura de los orificios adicionales	30
2.4.- Sobre la extinción de la carga de combustible sólido durante una brusca caída de la presión en la cámara de combustión	42

Capitulo III	
PROCESO DE EXTINCIÓN DE LA CARGA DEL COMBUSTIBLE SÓLIDO MEDIANTE LA INTRODUCCIÓN DE AGENTE REFRIGERANTE LÍQUIDO A LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN	48
3.1 Fundamentos físicos	48
3.2. Descripción matemática de los procesos en la cámara de combustión durante la extinción de la carga mediante la inyección del líquido refrigerante	57
Capitulo IV	
ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA PRESIÓN EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN DURANTE LA EXTINCIÓN DE LA CARGA CON INYECCIÓN DEL LIQUIDO REFRIGERANTE	77
4.1 Fundamentos físicos	77
4.2. Sobre las condiciones que garantizan la extinción de la carga con inyección del líquido refrigerante	82
4.3 .Ejemplo de cálculo de determinación de la masa del líquido necesario para el extinguido de los productos de la combustión	85
Conclusiones	90
Bibliografía	92

INTRODUCCIÓN

La teoría de los misiles en base a combustible sólido, es un elemento intermedio entre las ciencias fundamentales (química, mecánica, matemática, etc.) y las disciplinas estrictamente practicas que son la base del diseño y de la producción de los misiles de combustible sólido.

Se puede resaltar las principales direcciones del desarrollo de la teoría de los misiles de combustible sólido:

- La termoquímica y la termodinámica del motor de combustible sólido
- La balística interna del MCCS.
- La teoría de la combustión de los combustibles coheteriles sólidos.
- La balística externa o la teoría de vuelo de los misiles.

Los misiles estratégicos (ME), son una forma de armamento coheteril nuclear, osea del armamento en el cual el medio de destrucción de los blancos son las municiones

nucleares, mientras que sus portadores son los misiles. Los ME poseen especiales propiedades de combate:

- Una gran potencia destructiva.
- Una alta disponibilidad.
- Un alcance prácticamente ilimitado.
- Una capacidad de realizar ataques simultáneamente a muchos blancos y realizar misiones de combate en plazos muy cortos.
- Una independencia del día, año y al estado del clima.
- Una posibilidad amplia de maniobra de los ataques coheteriles nucleares.
- Una dificultad de protección del enemigo de estos ataques.

Las propiedades enumeradas de los ME, determinan aquella alta importancia que se les da en los planes de una guerra nuclear.

Sobre todo en el proceso de desarrollo de los ME, estuvo el problema de control de su vuelo en la parte activa de la trayectoria. Este problema no apareció en forma total durante el empleo de los proyectiles coheteriles de las generaciones anteriores.

En los ME se necesitaba resolver dos problemas:

- Detener la acción (apagado) del motor de la última etapa del misil en el momento que se alcance el valor requerido de la velocidad.
- El control de la posición del misil en la trayectoria.

Para los misiles con motores de combustible líquido, el primer problema se resuelve sencillamente con el detenimiento de la alimentación del combustible a la cámara de combustión. El apagado del MCCS se puede conseguir deteniendo la combustión de su carga.

Uno de estos métodos es la brusca y la considerable disminución de la presión en la cámara. Esto puede ser conseguido abriendo unos orificios en las paredes del motor en el momento necesario. La solución del problema se alivia en el caso si es que estos orificios se han hecho en el fondo delantero de la cámara y están equipados con bocas de tobera.

Durante esto, la abertura de los orificios provoca la aparición de un empuje dirigido en sentido contrario al movimiento del misil. Si es que este empuje es mayor que el empuje de las principales toberas (reversa del empuje), entonces desunido el cabezal de la última etapa del misil, se puede “frenar” el misil y conseguir de esta manera la separación de la cabeza. No es necesario que el motor se detenga completamente en este caso.

El desarrollo de los métodos y de los sistemas de control de vuelo de los ME, hizo posible que se consiga el alcance necesario, para esto se efectuaba el detenimiento del trabajo del motor de la última etapa y sin apagar el motor, osea para la conducción del quemado completo de su combustible. Debido a esto los conjuntos de reversa del empuje llegaron a ser obligatorios.

La creación de los esfuerzos, necesarios para el control de la posición angular del misil en la trayectoria, se efectúa para los ME de combustible sólido mediante diferentes métodos. Enumeraremos solamente los principales de ellos:

- El empleo de toberas giratorias; en la región de la sección crítica de la tobera, se coloca una unión hermética flexible, como resultado del cual el cono de salida por acción de un actuador especial, puede inclinarse en un determinado ángulo, aparece un componente lateral de la fuerza del empuje.
- El empleo de deflectores, de anillos y tubos, colocados en la salida de la tobera y que se inclinan en caso de necesidad con respecto a dos ejes perpendiculares entre si, durante la inclinación del deflector una parte de él ingresa en el flujo

de gases que salen de la tobera, lo que provoca la aparición de un esfuerzo que gira la cámara y por consiguiente el misil.

- El empleo de toberas adicionales de control, a través de las cuales pueden salir los productos de la combustión del combustible de los motores o de un generador de gas especial. Este método es bueno para pequeños esfuerzos necesarios de control.
- Las toberas de control a veces se denominan timones de chorro de gas. Con la adición (generalmente freón) a la parte supercrítica de la tobera de los productos de la combustión del combustible sólido – líquido, se forma una onda de choque de los gases que se mueve por la tobera, se distorsiona la simetría del campo de presiones en el cono y aparece una fuerza lateral que se utiliza para girar al misil.

La elección del método de control del misil se determina por la tendencia de conseguir la creación de los esfuerzos para unos mínimos gastos de masa en los órganos de control y alcanzar una alta confiabilidad.

Para controlar el movimiento del misil de acuerdo con la trayectoria exigida, se necesita tener la posibilidad de cambiar en vuelo la magnitud y la dirección del vector de velocidad y también la orientación de los ejes del misil en vuelo.

Con esta finalidad se utilizan motores de reacción y diferentes órganos de control, cuya acción crea las fuerzas y momentos necesarios.

Los esfuerzos de control R_y están dirigidos normalmente a la trayectoria de vuelo y sirven para cambiar la trayectoria de vuelo.

Los momentos de control M_y , son necesarios tanto para controlar el vector del empuje, como para mantener la orientación angular necesaria del cuerpo del misil en el

espacio, o sea para su estabilización angular. Por esta razón los órganos que crean momentos de control generalmente se denominan “órganos de control y estabilización”

El control de misil se efectúa con la ayuda de estos órganos de control, basados en el empleo de las fuerzas aerodinámicas ó de la energía del chorro de descarga del motor. En algunos casos se utilizan órganos de control combinados, en los cuales se utilizan la fuerza aerodinámica y la fuerza del chorro de descarga de los gases.

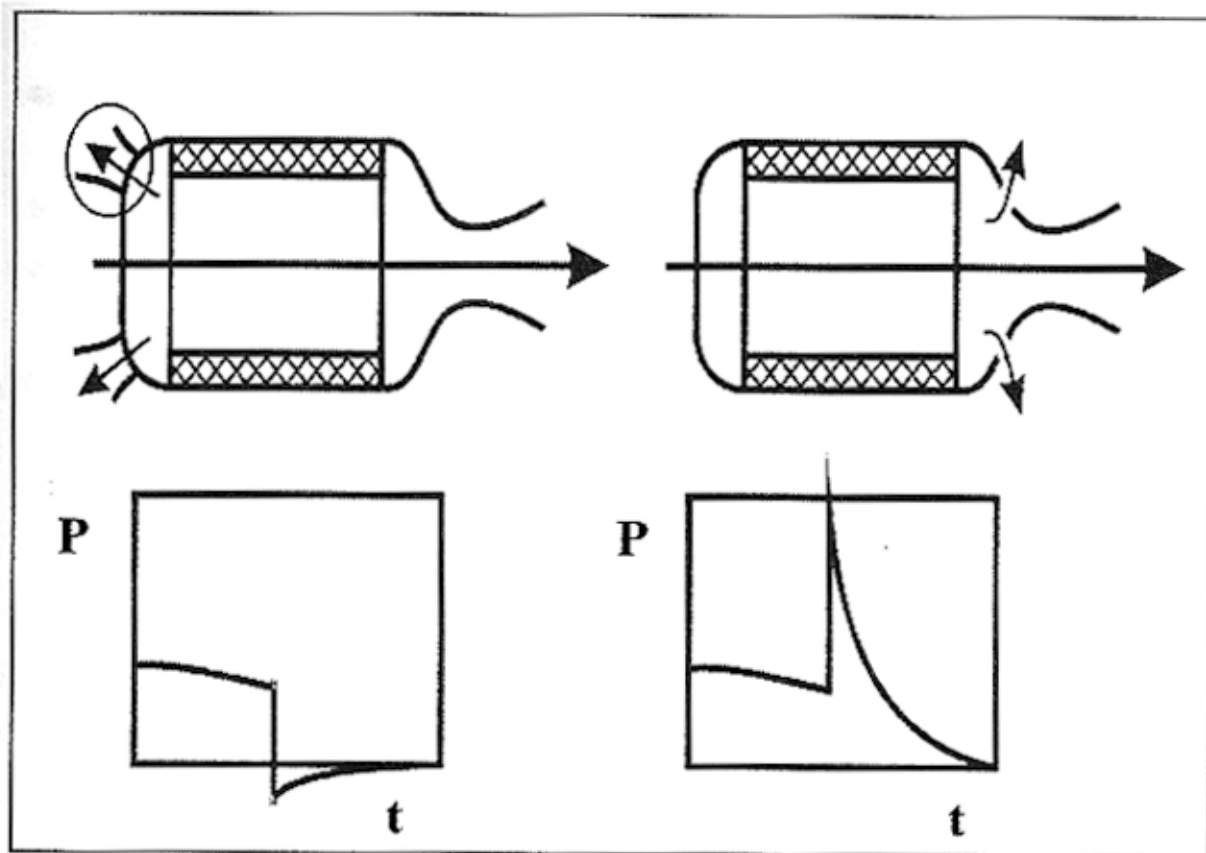
El método de control se selecciona en las fases iniciales del diseño del misil en base a un análisis multilateral de las diferentes configuraciones, tratando de alcanzar una máxima efectividad del misil y de sus propiedades según el criterio de efectividad adoptado.

Una parte componente de las plantas de poder de los misiles en base a combustible sólido es el dispositivo de corte de empuje (apagado, reversa, anulación).

A diferencia de los motores cohetes de combustible líquido, donde el principio de corte de empuje es sencillo y necesita solamente la presencia de válvulas de corte, en los motores cohetes de combustible sólido (MCCS) se debe prever dispositivos especiales.

Los sistemas de corte de empuje básicamente cumplen las siguientes tareas:

- Lograr el alcance necesario de vuelo del misil
- Anular el empuje en los motores con un arranque repetitivo.
- Garantizar la seguridad en caso de situaciones de emergencia durante el vuelo del misil.
- Evitar impactos de la ultima etapa del misil con una carga útil (aquí como regla general se requiere la reversa del empuje).
- Garantizar condiciones iniciales exactas para la parte pasiva de vuelo.



(a)

(b)

Fig (1)

(a) - Corte del empuje del MCCS con la abertura de toberas cabezales

(b) - adicionales o con la separación de la parte de tobera

El corte del empuje puede ser realizado mediante diferentes medios: [8]

- Con la extinción de la carga como resultado de:
 - a) La abertura de toberas adicionales. (de cabeza Fig. I a, y en la parte de tobera Fig. I b o laterales).
 - b) La inyección del refrigerante a la cámara de cohete. (fig.V)
 - c) La inyección del refrigerante después de la abertura de las toberas adicionales.
- Con el uso de dispositivos mecánicos móviles.
- Con la separación del motor principal mediante el arranque de los motores de freno, que comunican al motor principal un empuje fuerte de corta duración en dirección y en sentido contrario.

Es posible también el corte del empuje del MCCS con ayuda de una combinación de algunos de los métodos enumerados, el empleo de estos dependerá de los requerimientos del misil en vuelo determinado por los diseñadores.

Los principales requisitos del sistema de corte de empuje del MCCS de los misiles balístico consisten en garantizar: [8]

- Determinado impulso de freno de la última etapa del misil.
- Una mínima dispersión de la velocidad final.
- La posibilidad de lanzar el misil balístico en un intervalo determinado de variación del alcance.

Durante esto los productos de la combustión del combustible que salen de los orificios de corte no deberán perturbar la parte cabezal que se separa.

El primer requisito se realiza con la selección del área de los orificios del ducto de las toberas de corte considerando su inclinación respecto al eje del misil. Para una separación confiable de la parte cabezal se necesita que el contraempuje total de todas las toberas de corte sea aproximadamente de 10% superior al empuje de la tobera principal.

La mínima dispersión de la velocidad final se garantiza por la construcción del conjunto de corte del empuje, que prevé su rápida apertura con el método de explosión (rotura de los piropernos o de las cargas detonantes) y también con el uso de corte de doble etapa del empuje del M CCS.

Este sistema está basado en la apertura secuencial de las toberas de reversa con un intervalo temporal determinado.

Para disminuir las perturbaciones de la acción de los productos de la combustión del combustible que salen de las toberas de corte sobre la parte cabezal que se separa, las toberas de corte se ubican en el fondo delantero con un ángulo respecto al eje del misil.

La posibilidad del disparo del misil en un determinado margen de variación del alcance se consigue con la construcción de la carga. Hay posibles variantes de ubicación de los conjuntos de corte de empuje en la superficie lateral del M CCS.

En base a los datos bibliográficos estudiados sobre los dispositivos de corte del empuje de los motores de cohete de combustible sólido, en el trabajo de tesis se han planteado los siguientes problemas

Analizar las construcciones existentes de los conjuntos de corte del empuje del M CCS con la finalidad de elegir la variante óptima para obtener el máximo alcance del misil.

- Analizar los regímenes del trabajo del MCCS en el período de apertura de los orificios adicionales de los dispositivos de corte y determinar la mejor configuración constructiva de ubicación de los orificios.
- Sobre la base de los fundamentos físicos del proceso de extinción de la carga, elegir la variante óptima para el propósito.
- Analizar la variación de la presión en la cámara de combustión durante la extinción de la carga del líquido de enfriamiento de inyección.
- Realizar el cálculo aproximado de la cantidad de líquido refrigerante que se necesita para el enfriamiento de los gases de la combustión del combustible sólido

En la presente tesis se incluye los siguientes capítulos:

- Capítulo 1: **“Construcciones de los conjuntos de corte del empuje”**. Se da la descripción de las diferentes construcciones de los conjuntos de corte de empuje de los más difundidos en la actualidad.
- Capítulo 2: **“Análisis del régimen de trabajo del MCCS en el periodo de abertura de los orificios adicionales”**. Dedicado a los procesos físicos que se producen en la cámara de combustión cuando se abre los orificios adicionales y a la descripción matemática de estos procesos.
- Capítulo 3: **“Proceso de extinción de la carga del combustible sólido mediante la introducción del agente refrigerante líquido a la cámara de combustión”**. Se desarrollan los fundamentos físicos del proceso de extinción de la carga del combustible sólido mediante la introducción del agente refrigerante a la cámara de combustión y se da el método aproximado de cálculo de la presión.

Se describen las condiciones que garantizan la extinción de la carga con la inyección del líquido refrigerante.

El capítulo 4: **“Análisis de la variación de la presión en la cámara de combustión durante la extinción de la carga con inyección de líquido refrigerante”**. Basándose en las relaciones de cálculo obtenidas en los capítulos anteriores y en el análisis de los procesos físicos que tienen lugar durante la inyección del refrigerante líquido, se evalúa la cantidad total y el caudal del líquido por segundo necesario para la extinción de la carga.

CAPITULO I

CONSTRUCCIONES DE LOS CONJUNTOS **DE CORTE DEL EMPUJE**

El corte del empuje con la abertura de orificios adicionales ha obtenido una gran difusión y con mayor frecuencia se utiliza en las construcciones de las plantas de poder.

La ubicación de los conjuntos de corte del empuje (CCE) pueden ser en el fondo delantero, en el carenado, en el fondo posterior y en la parte fija de la tobera. Fig. (II)

Las ventajas de las construcciones de CCE se relacionan a su sencillez, a la rapidez de accionamiento, a la posibilidad de anulación o de reversa del empuje.

Las desventajas de este método consisten en la posibilidad de abertura no simultanea de varias toberas y en la dispersión del empuje debido al área no igual de los orificios en los límites del inyector.

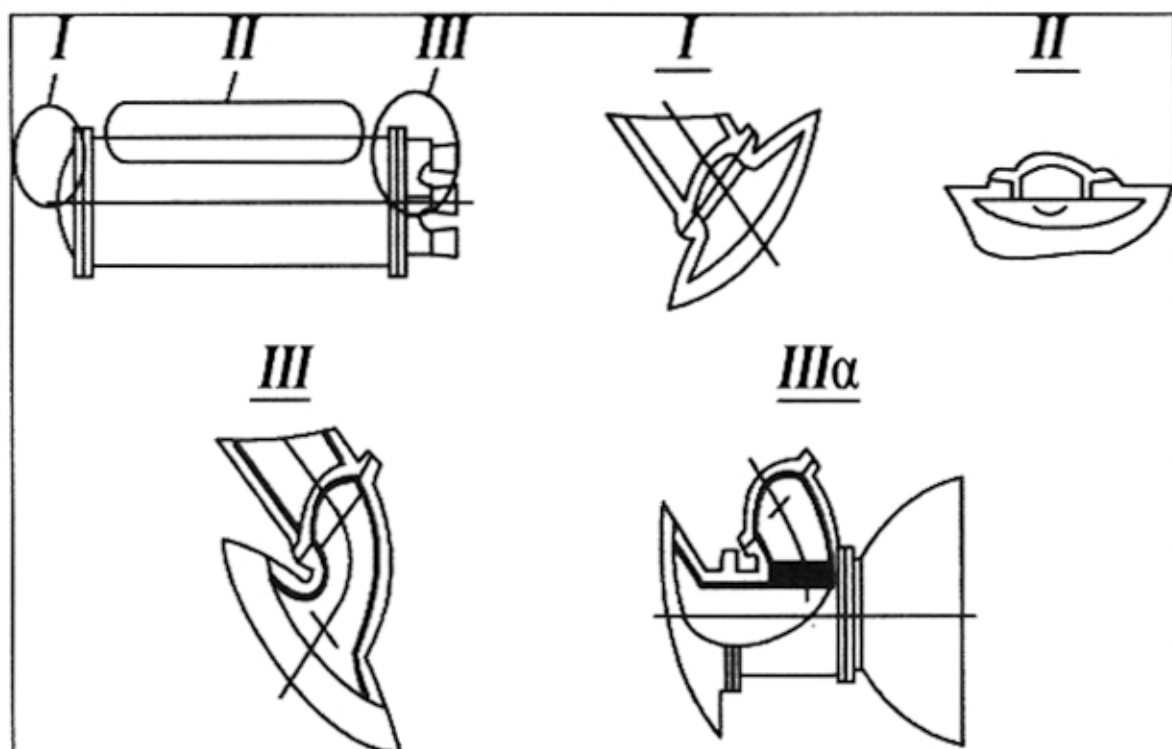


Fig. (II)

Ubicación de los cortes del empuje:

- I – en el fondo delantero
- II- en el carenado
- III- en el fondo posterior
- IIIa-en la parte fija de la tobera

Según el principio de trabajo de los conjuntos de corte, se pueden dividir en:

- de accionamiento mecánico
- de accionamiento explosivo.

Los conjuntos de acción mecánica poseen gran inercialidad en comparación con los conjuntos de acción explosiva y no garantizan una misma dispersión en el momento de abertura. Las desventajas mencionadas limitan su uso.

Los conjuntos de acción explosiva han obtenido la mayor difusión gracias a lo compacto y a la rapidez de accionamiento [6]. En la fig. III se muestra este esquema de conjunto de corte del empuje.

Después de que entre en funcionamiento el detonador eléctrico (6) de la señal eléctrica de la onda detonadora se pone a trabajar el cordón detonador del tipo acumulador (2) que se encuentra en la tapa del conjunto del corte (3). El chorro acumulativo corta a la tapa y la libera por acción de la presión de los gases, la tapa se lanza a través de la boca. De forma similar trabajan los conjuntos de corte de empuje ubicados en el cuerpo del motor (en este caso en el fondo delantero).

Durante esto se produce una caída brusca de la presión en la cámara de combustión que en determinados casos puede provocar la detención de la combustión de la carga. Si las toberas están ubicadas de tal manera que durante su abertura aparece un empuje en dirección contraria del movimiento del misil, entonces se produce la reversa del empuje.

En los misiles de combate "Polaris" "Poseidon" "Minuteman" "Pershing" se utilizan cortes del empuje de acción explosiva, ubicados en el fondo delantero del motor de la última etapa.

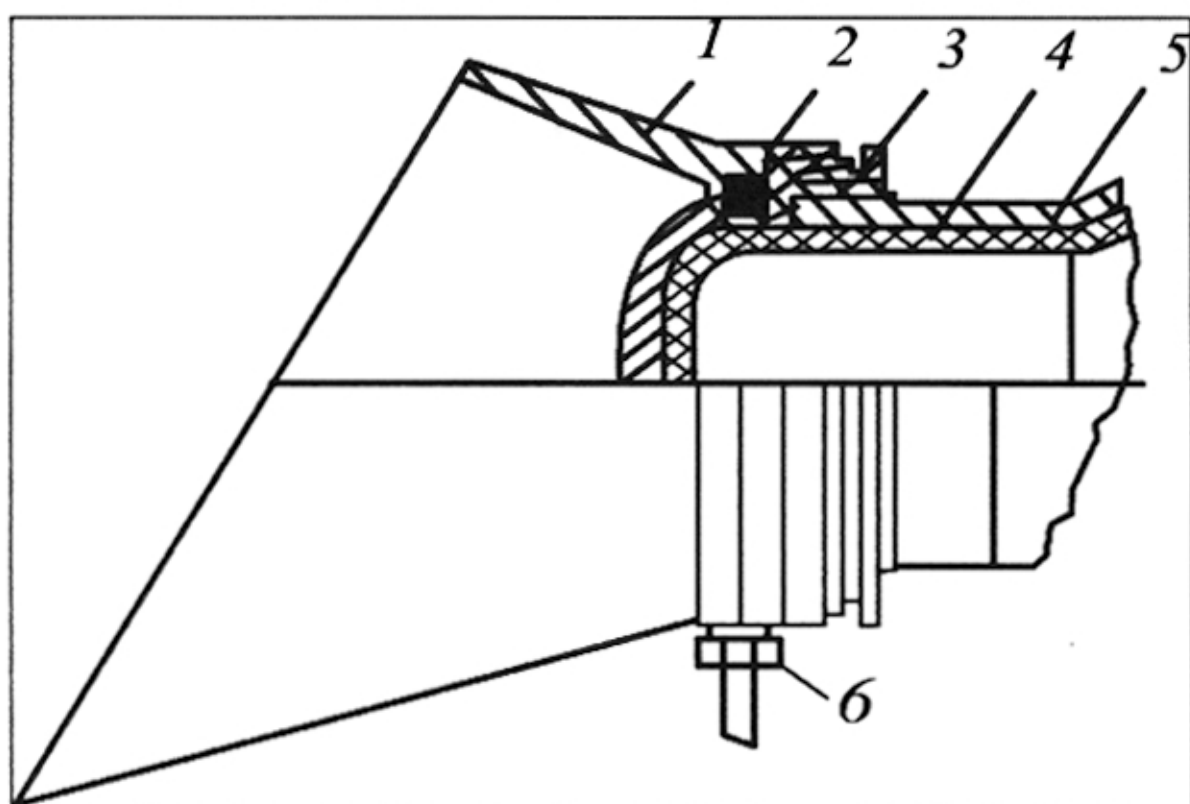


Fig. (III)

Esquema de la tobera para el corte de acción explosiva

- 1 - boca
- 2 - cordón detonante
- 3 - tapa del conjunto de corte
- 4 - recubrimiento termo protector
- 5 - cuerpo del MCCS.
- 6 - electro detonador.

En el esquema mostrado en la siguiente figura (fig. IV), el corte del empuje del MCCS esta basado en el desplazamiento de la tobera por pernos cónicos que salen de la brida de tobera y que tienen una parte más ancha en el extremo posterior [8]. En el régimen de crucero, la tobera se mantiene parcialmente debido al ajuste compacto sobre los pernos cónicos por los piropernos.

Después de que entran en funcionamiento los piropernos, según orden la tobera se mueve por los pernos cónicos a cierta distancia. Se produce su jalado a través de los orificios en la brida, la tobera se detiene y en la parte de tobera del cuerpo se forma una gran ventana, cuya área supera al área de la sección crítica de la tobera en varias veces.

El tiempo de desplazamiento de la tobera es del orden de $1\div 2 \times 10^{-2}$ sg. la distancia es aproximadamente de 20 cms. Una parte de los gases que salen a través de esta gran tobera, se estancan en la brida de tobera inclinada y de esta manera crea cierto esfuerzo dirigido hacia atrás.

Después del vaciado del motor es posible la extinción de la carga. Este método de movimiento de la tobera con su frenado constante en los pernos cónicos casi no provoca el aumento de los factores de carga axiales en el periodo de corte.

Las dificultades de extinción de las cargas sobre todo de combustible híbrido mediante la abertura de orificios adicionales en la cámara de combustión generaron la necesidad en desarrollar medios más efectivos de extinción, como uno de estos métodos puede utilizarse la inyección de líquido refrigerante o en forma de polvo a la cámara de combustión. [2]

El método de extinción forzada de la cámara en la cámara de combustión mediante la inyección de refrigerante líquido o en forma de polvo puede ser utilizado y en calidad de medio de corte de empuje, el no requiere la destrucción de la integridad de la cámara de

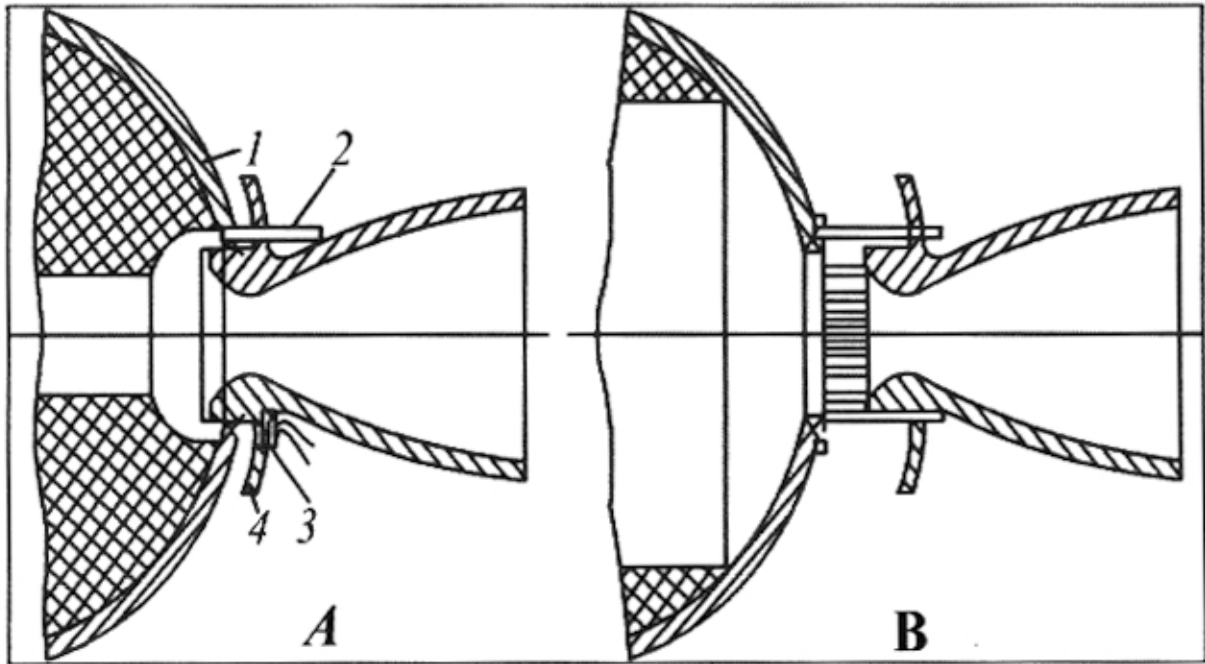


Fig.(IV)

Corte del empuje del MCCS con el desplazamiento de la tobera por los pernos cónicos

- A – antes de apagar el empuje
 1. parte de la tobera del cuerpo
 2. perno cónico
 3. perno de rotura (se muestra solo uno)
 4. brida de tobera
- B – después de apagar el empuje

combustión y no provoca perturbaciones debido a la descarga del chorro de los orificios adicionales.

En la fig. (V) se muestra la construcción de la cámara de banco de un MCCS con un conjunto de extinción por líquido [6]. La alimentación del líquido se ejecuta por la presión de los gases de los piro cartuchos a través del pistón.

El líquido pasando a través de los inyectores, se pulveriza en gotas que ingresan a la cámara de combustión. En calidad de líquidos refrigerantes se utilizan soluciones de sales de metales alcalinos en agua (NaCl, MgCl), tetracloruro de carbono (CCl_4), etilglicol, alcohol metílico, amoníaco.

Efecto similar se obtiene cuando se introduce neumáticamente a la cámara el refrigerante en forma de polvo. La construcción del conjunto para la extinción con polvo es similar a la construcción del conjunto para la introducción de líquido.

En la fig. (VI) se muestra un esquema del dispositivo para alimentar refrigerante en polvo [6]. Después de enviar simultáneamente un impulso eléctrico al electro detonador y al electro ignitor se produce la destrucción de la tapa (8) de material termoaislante y la inflamación de la carga de pólvora (3).

Por acción de la presión de los gases de pólvora, el sello se corta y bota el agente refrigerante a la cámara de combustión.

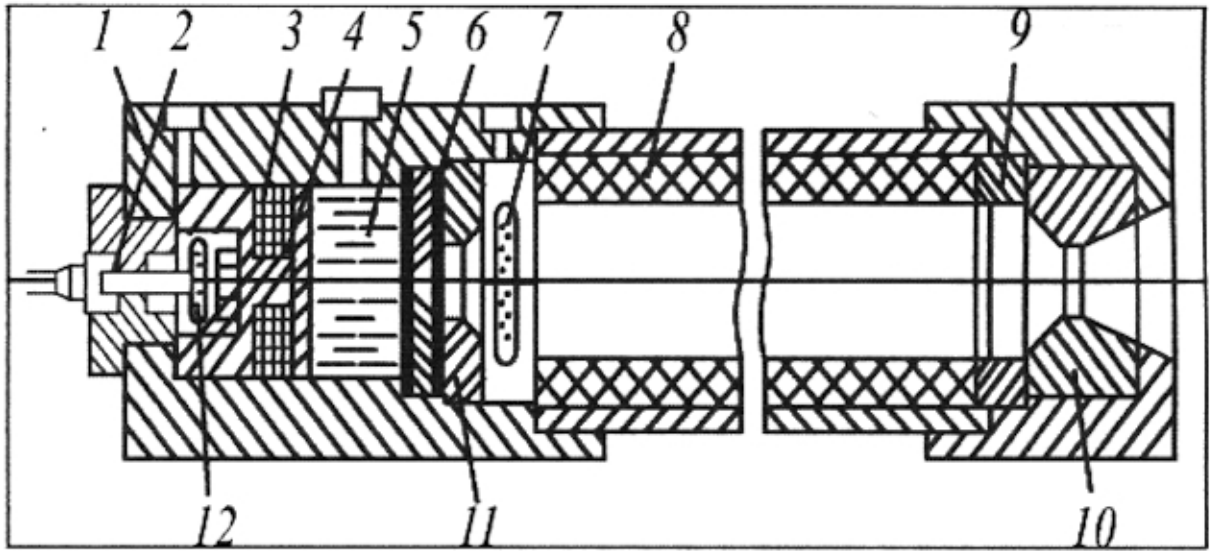


fig. (V)

MCCS de banco con un conjunto de extinción por líquidos

- | | |
|--------------------------------|-----------------------------|
| 1. Cuerpo | 7. Inflamador |
| 2. Electroignitor | 8. Carga de CS. |
| 3. Sellos | 9. Tope |
| 4. Pistón | 10. Inserto de tobera |
| 5. Agente refrigerante líquido | 11. Membrana |
| 6. Inyectores | 12. Composición inflamadora |

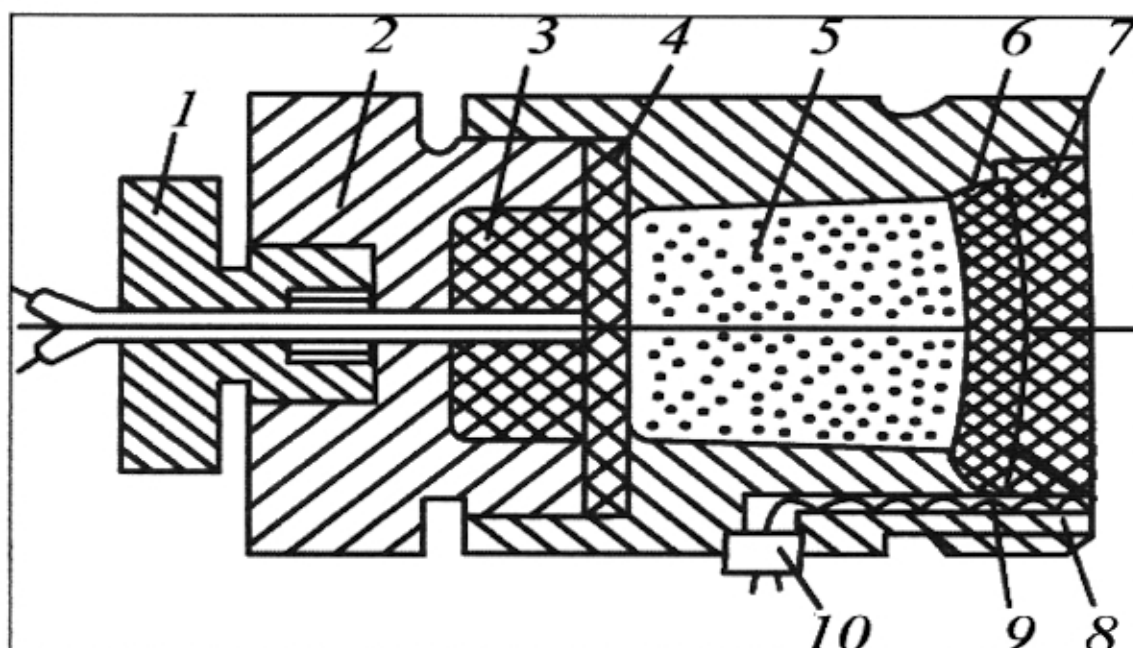


fig. (VI)

Esquema del dispositivo de explosión para alimentar el refrigerante en polvo

- | | |
|------------------------|------------------------|
| 1. Bocina | 6. Tapa |
| 2. Tapa | 7. Sustancia explosiva |
| 3. Carga de la pólvora | 8. Tapa |
| 4. Sellos | 9. Electro detonador |
| 5. Agente refrigerante | 10. Enchufe eléctrico |

CAPITULO II

ANÁLISIS DEL REGIMEN DE TRABAJO **DEL MCCS EN EL PERIODO DE** **ABERTURA DE LOS ORIFICIOS** **ADICIONALES**

2.1.- PROCESO FISICOS QUE OCURREN EN LA CAMARA DE **COMBUSTIÓN DE LOS MCCS. DURANTE LA ABERTURA DE** **LOS ORIFICIOS ADICIONALES**

Después de la abertura de los orificios adicionales del dispositivo de corte del empuje, comienza el proceso de transición de caída de la presión en la cámara de combustión. Este proceso esta acompañado por una reestructuración sustancial del flujo de los productos de la combustión en la cámara y del proceso de combustión del combustible sólido.

Analizaremos a grandes rasgos los procesos gasodinámicos que se producen en la cámara de combustión después de la abertura de los orificios adicionales en el fondo delantero del MCCS (fig.VII)

El inicio del proceso gasodinámico transitorio en la cámara de combustión después de la separación de las tapas que cubren los orificios del conjunto de corte del empuje, tiene un carácter ondulatorio.

Durante esto por los productos de la combustión, que llenan el volumen libre de la cámara, se propaga la onda de expansión en dirección del bloque de tobera. En la parte de la cámara de combustión por donde paso la onda de expansión se observa una disminución de la presión, y en la región adyacente a los orificios adicionales abiertos, se produce una variación de la velocidad del flujo y de su dirección.

Llegando al fondo de la tobera y reflejándose de él, la onda de expansión provoca una reestructuración del proceso de descarga de los productos de la combustión a través de la tobera principal del MCCS. La onda reflejada del fondo de tobera propagándose por el volumen libre de la cámara de combustión en dirección contraria interactúa con las ondas de expansión, emitidas desde el lado de los orificios abiertos en el fondo delantero.

Como la onda de expansión se propaga con la velocidad del sonido en condiciones de la cámara de combustión, entonces ella recorre la distancia entre los fondos de la cámara en un tiempo como regla general pequeño en comparación con la duración total del proceso transitorio de caída de la presión en el MCCS en el período de corte de empuje. Durante este el flujo del gas que se establece como resultado de la interacción complicada de las ondas es cercano al cuasi estacionario.

El cuadro de ondas de la cámara de combustión tiene otro carácter, cuando los orificios abiertos se ubican en la región del fondo de tobera. En este caso la onda de

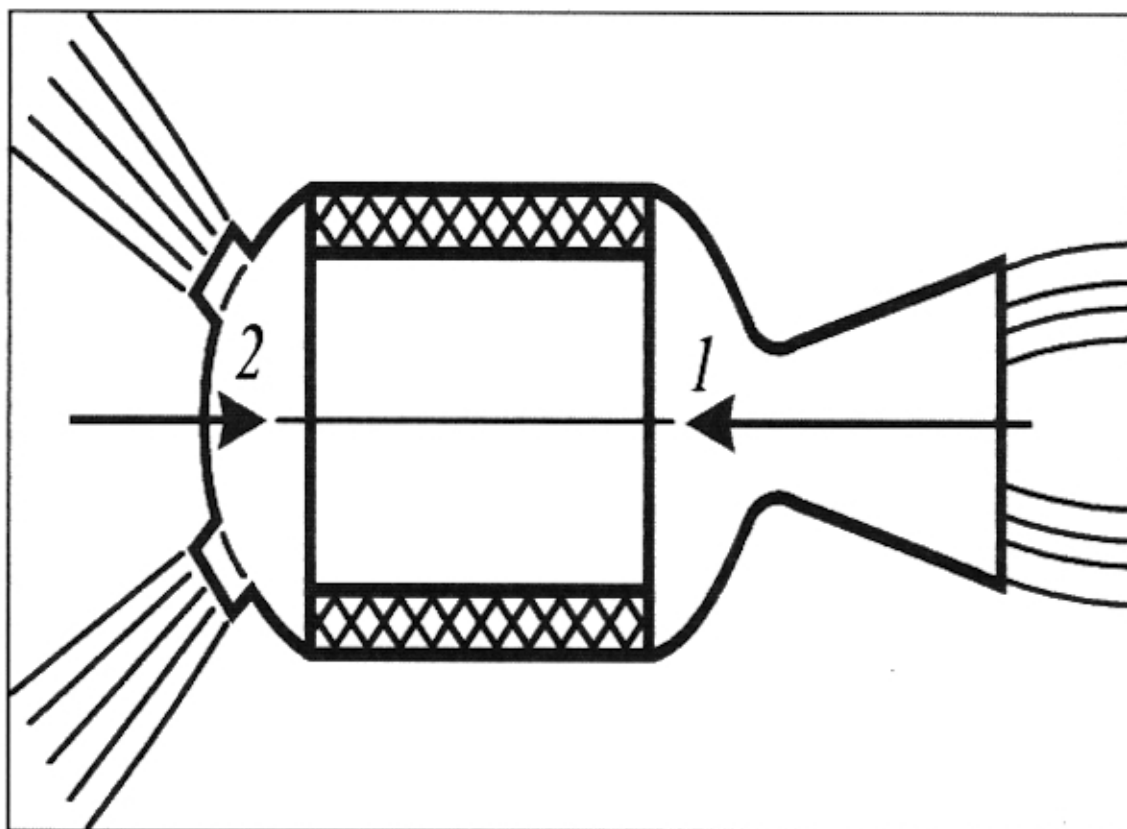


fig. (VII)

Dirección del empuje y del contra empuje en el momento de abertura de los orificios de corte.

1. empuje
2. contra empuje

expansión propagándose desde el fondo de tobera al delantero, provoca básicamente una deformación del campo de presiones y de los caudales masivos.

Después de que la onda de expansión alcanza el fondo delantero, el proceso de caída de la presión cubre todo el volumen libre de la cámara de combustión, y la onda reflejada desde el fondo delantero se mueve al fondo de tobera del MCCS. En lo subsiguiente como resultado de la interacción de las ondas se establece un flujo cuasi estacionario en la cámara de combustión.

Este es el cuadro general de los procesos gasodinámicos de onda en la fase inicial del régimen transitorio durante el corte del empuje del MCCS mediante la abertura de los orificios adicionales.

Es muy complicado también el proceso de combustión que sucede en esta fase relacionado con la caída de la presión, provocado por la propagación de la onda de expansión y por la reestructuración del flujo gaseoso en la cámara de combustión, que a su vez condiciona la reestructuración de la capa caliente.

2.2.- SOBRE LAS PARTICULARIDADES DE LA COMBUSTION DEL COMBUSTIBLE SOLIDO EN EL REGIMEN DE INTENSA CAIDA DE LA PRESION Y EN EL REGIMEN DE PRESION REDUCIDA EN LA CAMARA DE COMBUSTIÓN

La elaboración del método de cálculo de los procesos que suceden en la cámara de combustión del MCCS en el período de corte del empuje, requiere el conocimiento de una serie de leyes de combustión del combustible sólido en el período de caída de presión de la cámara de combustión y en condiciones de una reducida presión que comprende al segundo régimen estacionario.

En base a estas leyes deberán establecerse funciones para el calculo de las siguientes magnitudes.

- a.- De la velocidad no estacionaria de combustión del combustible sólido en el régimen de presión en reducción.
- b.- De la velocidad estacionaria de la combustión del combustible en la región de bajas presiones $(1.10)^5 \text{ Pa}=(1 \text{ atm.})$
- c.- De la plenitud de la generación de calor en condiciones de combustión en la región de las presiones en reducción y bajas.

Otra magnitud muy importante, que caracteriza el desarrollo del proceso, es el criterio de apagado de la carga del combustible sólido en condiciones de una intensa caída de la presión.

La investigación más profunda de la velocidad no estacionaria de la combustión de las pólvoras la hizo y B. Zeldovich y sus discípulos. De acuerdo a la teoría desarrollada por él, de la combustión no estacionaria, la velocidad de la combustión en el régimen de presión en reducción, deberá ser menor a la velocidad calculada según la función de la teoría cuasi estacionaria, en una magnitud que depende de la velocidad de variación de la presión.

Hasta la fecha esta conclusión teórica no ha tenido una conformación experimental fundamentada, más aún en las fuentes bibliográficas publicadas prácticamente no existen datos de experimentos sobre la magnitud de la velocidad de combustión en el régimen de brusca reducción de la presión una vez aperturados los orificios de corte del empuje del motor cohete de combustible sólido para el inicio del vuelo del misil en la parte pasiva de su trayectoria balística.

Una de las ideas de la determinación indirecta de la velocidad de la combustión en el régimen de caída de la presión con el empleo de la curva experimental de la variación de la presión, consiste en solucionar el así denominado problema inverso de balística interna. En este problema a diferencia del directo según la magnitud conocida de la presión, se determina la velocidad desconocida de la combustión.

Para un enfoque exacto el problema inverso como el directo deberán resolverse integrando el sistema completo de ecuaciones de la balística interna. En el planteamiento más sencillo se utiliza solamente una ecuación de la ley de conservación de la masa en magnitudes medias en el volumen de la cámara, que suponiendo que es isotérmica el proceso tiene la forma:

$$V_k \frac{dp}{dt} = \left(\rho_T S u - \varphi_2 \frac{p F_{kp}}{\sqrt{RT}} \right) RT \quad \dots(1)$$

De esta ecuación se deduce que la velocidad de combustión en el régimen de presión que varia en la cámara de combustión puede ser calculada según la función que a continuación se da.

$$u = \frac{1}{\rho_T S} \left(\frac{V_k}{RT} \frac{dp}{dt} + \varphi_2 \frac{p F_{kp}}{\sqrt{RT}} \right) \quad \dots(2)$$

En el cual se utiliza el valor experimental de la presión "p" a su derivada $\frac{dp}{dt}$.

La comparación de los valores de la velocidad no estacionaria calculado según la función del tipo (2) en base de datos experimentales, dados por ejemplo en los trabajos [4, 5] con unos valores determinados según funciones no estacionarias (ley exponencial), para estos mismos valores de la presión muestra que la velocidad de la combustión en el régimen de presión en reducción supera al estacionario sobretodo para unos considerables gradientes de caída de la presión

Al efecto observado se puede dar solamente una explicación hipotética. Como se puede suponer una reestructuración brusca del flujo gaseoso en la cámara en el período de corte del empuje esta acompañado con una turbulización del flujo y con la aparición en cierta manera de una combustión erosiva.

Al mismo tiempo no se excluye que la caída de la presión en la cámara provocara una dispersión de la capa que arde del combustible. En uno y otro caso la velocidad de la combustión en el régimen de caída de la presión deberá ser mayor de lo que predice la teoría clásica de la combustión no estacionaria.

Debido a la ausencia de una teoría completa que explique y que tiene en cuenta las particularidades señaladas de la combustión de las cargas de combustible sólido en condiciones de presión en reducción, así como de los experimentales sistemáticos, en los cálculos de ingeniería del proceso de corte del empuje se debe emplear la suposición sobre el carácter cuasi estacionario de la función de la velocidad de combustión respecto a la presión.

Examinaremos en adelante la pregunta sobre la velocidad de combustión en condiciones de presión reducida en la cámara de combustión que tiene lugar en el segundo régimen estacionario. Esta pregunta tiene dos aspectos que consiste en la necesidad por un lado de examinar lo específico de la función de la velocidad de combustión respecto a la

presión en la región de bajas presiones y por otro lado de tomar en cuenta la posibilidad de aparición del régimen de combustión no estable.

La particularidad de la función de la velocidad de combustión respecto a la presión en la región de bajas presiones, y en general en una región amplia de variación de la presión, consiste en que esta función es difícil aproximar a una ley exponencial u otro parámetro dual, por esta razón el investigado de la presión es conveniente dividir en intervalos en cada uno de los cuales se utiliza la función exponencial con sus valores determinados del coeficiente y el indicador de la ley de la combustión.

Examinaremos más adelante la pregunta sobre la posibilidad de aparición de la combustión no estable de la carga de combustible sólido en la cámara de combustión en la región de bajas presiones.

Esta pregunta hace tiempo llamó la atención de una serie de investigadores [13,1,10,3] . En estos trabajos se han determinado conceptos teóricos y se muestran datos experimentales sobre la investigación de la inestabilidad de baja frecuencia de la combustión de los combustibles sólidos en la región de bajas presiones.

Del análisis teórico, confirmado por datos experimentales, se deduce, que la inestabilidad de baja frecuencia de la combustión puede aparecer en las condiciones cuando el tiempo de relajación de la capa caliente del combustible tiene el mismo orden que el tiempo de relajación de la cámara o lo supera.

En este caso la longitud característica de la cámara l_* igual a la relación del volumen libre de la cámara entre el área de la sección crítica de la tobera, satisface a la expresión

$$l_* \leq \frac{\eta_T \Gamma \sqrt{RT}}{c_T \delta_T u^2} = \frac{\eta_T \Gamma \sqrt{RT}}{c_T \rho_T u_1} \left(\frac{p_{atm}}{p_*} \right)^{2\nu} \quad \dots (3)$$

La relación (3) permite determinar el valor crítico de la presión $p=p^*$ durante el cual es posible la aparición del proceso no estable en la cámara de combustión.

En el trabajo [1] y [10] y en el posterior trabajo de R. Segel R se muestran datos experimentales que confirman que la presión crítica, durante el cual comienza la combustión anormal relacionado con la longitud característica de la cámara por la expresión del tipo

$$l_* \approx b \left(p_{atm} / p_* \right)^{2 \nu}$$

La presencia en los productos de la combustión de la fase condensada provoca una función más débil de la presión crítica p^* respecto a la longitud característica l_* lo que se puede explicar con la disminución de la sensibilidad del tiempo característico de la relajación del proceso de la combustión respecto a la presión en la cámara. Con el aumento de la medida de las partículas el grado de influencia sobre la magnitud p^* se reduce.

La variación de la medida de las partículas del oxidante ejerce una débil influencia sobre el carácter de la dependencia de p^* respecto a l_* .

Un modelo un poco diferente de apagado de los combustibles a bajas presiones en la cámara de combustión se desarrolló por R.F. Cheiken [3] que parte de la posición que las partículas sólidas tienen un nivel inferior de combustión estable P_{min} ; para los combustibles híbridos este límite es muy bajo $\approx 0,5 \cdot 10^5 Pa$ ($\sim 0,5 \text{ Kgf/cm}^2$), la adición del aluminio aumenta la magnitud P_{min} .

La magnitud p^* le corresponde a las condiciones de apagado en una bomba o sea a un valor muy alto de la longitud característica l_* . La magnitud crítica de presión p^* ,

durante la cual llega a ser posible el apagado del motor, esta relacionado con la presión P_{\min} por la expresión:

$$p_* = p_{\min} \exp \left(\frac{E}{p_* l_*} \right) \quad \dots (4)$$

Donde:

E – es una magnitud constante para dicho combustible.

La función (4) se ha obtenido con la suposición que el apagado de la carga tiene lugar, si es que la reducción instantánea de la velocidad de combustión hasta cero, que se produce cuando $p = p_*$ conlleva a la caída de la presión hasta unos valores inferiores a P_{\min} . en el tiempo característico t , cuyo valor tiene un orden del semi período de las reacciones, que se suceden en la zona de la llama.

Pasaremos a analizar la pregunta sobre la plenitud de generación de calor durante la combustión del combustible en la región de las presiones bajas y en reducción. El problema de la determinación de la plenitud de generación de calor de los combustibles que arden a bajas presiones, a pesar de su “antigüedad” en mucho permanece no resuelto.

La mayoría de los autores suponen que con la disminución de la presión inferior a cierto nivel crítico se observa una reacción incompleta y con reducción de la temperatura de la combustión sin embargo una evaluaciones cuantitativas del grado de reducción de la temperatura no se conocen.

Unas mediciones directas de la temperatura de combustión en el proceso de corte del empuje lo realizó S. Siplach [11] que estableció que en el mismo inicio del momento de la caída de la presión tiene lugar una reducción brusca pero instantánea de la temperatura de la llama, después del cual la temperatura de nuevo alcanza un nivel estacionario.

2.3.- DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DEL PROCESO, QUE SE SUCEDE EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN DESPUÉS DE LA ABERTURA DE LOS ORIFICIOS ADICIONALES

El proceso transitorio de caída de la presión después de la abertura de los orificios adicionales del dispositivo de corte se caracteriza por unas variaciones considerables de los parámetros de los productos de la combustión que llenan la cámara tanto en el tiempo, como en la longitud.

Por esta razón durante un enfoque riguroso la descripción matemática de los procesos de trabajo en la cámara de combustión en el período de corte debería realizarse utilizando en calidad de sistema inicial de ecuaciones del movimiento no estacionario de los productos de la combustión de la cámara.

Si es que los orificios adicionales se abren en la región del fondo delantero entonces la condición de conservación de la masa y de la energía en el volumen libre en este fondo para la carga con un canal se debe escribir en la siguiente forma:

$$V_{\Delta} \frac{d\rho_{\Delta}}{dt} = \rho_T S_{\Delta} \bar{u}_{\Delta} - \rho_0 F_0 v_0 - \frac{\varphi_{2\Delta} \Gamma \bar{p}_{\Delta} F_{\Delta}}{\sqrt{R T_{\Delta}}}$$

... (5)

$$V_{\Delta} \frac{d}{dt} (c_v \bar{\rho}_{\Delta} \bar{T}_{\Delta}) = \rho_T S_{\Delta} u_{\Delta} c_p \chi T_{\Gamma} - \rho_O F_O v_O c_p \bar{T}_{\Delta} - \frac{\varphi_{2\Delta} \Gamma \bar{p}_{\Delta} F_{\Delta}}{\sqrt{R \bar{T}_{\Delta}}} c_p \bar{T}_{\Delta}$$

Donde :

- F_{Δ} es el área de los orificios adicionales en el tiempo
- $\varphi_{2\Delta}$ es el coeficiente de caudal a través de los orificios adicionales.

Si es que los orificios adicionales se abren en la región del fondo posterior (de tobera) en la expresión del caudal se debe reemplazar la magnitud $\varphi_2 F_{kp}$ por $\varphi_2 F_{kp} + \varphi_{2\Delta} F_{\Delta}$.

Se debe tener en cuenta que en condiciones cuando el tiempo de abertura de los orificios adicionales es comparable con la duración del proceso de corte del empuje se requiere tomar en cuenta la variación del área F_{Δ} de los orificios adicionales en el tiempo.

Las condiciones iniciales para el sistema de ecuaciones en derivados parciales que describen el desarrollo de los procesos dentro de la cámara en el período de costo deberán reflejar la distribución de los parámetros hidrodinámicos del flujo de los productos de la combustión a lo largo de la cámara en el momento que corresponde al inicio de la abertura de los orificios o sea en el régimen estacionario inicial.

Estos son los principios generales de construcción del modelo matemático de los procesos internos de la cámara en el período de corte de empuje en base al sistema de ecuaciones del movimiento no estacionario de los productos de la combustión en la cámara.

La integración de este sistema de ecuaciones para unas condiciones límites e iniciales dadas permite construir la dependencia de la presión, densidad y temperatura de los productos que llenan la cámara en función al tiempo y a la coordenada y más adelante determinar las características de empuje y energéticas respectivas.

Aunque este enfoque para resolver el problema parece mucho mas riguroso en comparación con el método de promediación de las magnitudes buscadas por el volumen libre de la cámara que se describe abajo, su empleo práctico en la mayoría de los problemas aplicados no es racional. La solución numérica del sistema de ecuaciones en derivados parciales tiene dificultades de calculo considerables que no justifican el grado de exactitud de las magnitudes, determinados en el transcurso del cálculo.

Anteriormente se mostró que la combustión no estacionaria y la plenitud del desprendimiento de calor no pueden ser evaluados cuantitativamente de forma exacta en condiciones de corte del empuje.

Si consideramos que las condiciones limites para unos regímenes no estacionarios sustanciales de desarrollo de los procesos internos de la cámara pueden ser planteados muy aproximados, entonces es evidente, que al igual que un reforzamiento sustancial de un elemento en la cadena no uniforme no provoca su reforzamiento proporcional, el uso del sistema de ecuaciones en derivados parciales no aumentará la exactitud de calculo de los procesos internos de la cámara en el período de corte.

Por esta razón desde una posición aplicada es más conveniente el método de calculo de ingeniería de la variación de las magnitudes que caracteriza el desarrollo de los procesos internos de la cámara en el motor que trabaja en el régimen transitorio de caída de la presión, mediante la promediación de estas magnitudes en el volumen libre de la cámara. Este método es más aplicable a los motores, cargado con cargas de combustión por un extremo donde la variación de los parámetros del flujo según la longitud es menos sustancial.

Antes de pasar a confeccionar según este método las funciones que describen las variaciones de las magnitudes promedios de la presión, densidad y temperatura según el volumen libre de la cámara en el período de corte de empuje mediante la abertura de orificios adicionales, enumeraremos y analizaremos las principales simplificaciones, adoptado en el transcurso de esta descripción.

Lo central de ellas se debe considerar a la hipótesis de “cuasi estacionaridad” aplicable al proceso de combustión de la carga y de la descarga de los productos de la combustión desde el motor. El empleo del principio de “cuasi estacionaridad” aplicable al proceso físico es válido, si es que el tiempo característico de desarrollo de los fenómenos no estacionarios claros es sustancialmente menor al tiempo característico de desarrollo de todo el proceso.

De esta manera se supone que aplicado al proceso de combustión, el tiempo de relajación de la capa caliente del combustible es sustancialmente menor al tiempo característico del régimen transitorio de caída de la presión en la cámara (naturalmente, que esta comparación es válida solamente en el marco de la teoría térmica de la combustión).

Aplicable al proceso de descarga, el principio de “cuasi estacionaridad” es utilizable si es que el tiempo de recorrido de la onda de expansión en la longitud de la cámara es pequeño en comparación con la duración total del proceso estudiado. Un cálculo simple de estimación nos muestra que ambas condiciones se cumplen para una clase amplia de motores, si es que el área de los orificios abiertos es comparable con el área de la sección crítica de la tobera principal y no es grande en comparación con el área de la sección transversal de la cámara de combustión.

Adoptaremos más adelante que los orificios del dispositivo de corte del empuje se abren instantáneamente después del cual aparece el régimen supercrítico de descarga. La fase inicial del proceso de descarga del chorro desde un orificio abierto instantáneamente esta acompañado por unos fenómenos complicados de onda[9]. En la sección de salida de

la ventana que se forma cuando se abre el tapón, en un instante aparece una descripción de los parámetros del estado de gas, que provoca la aparición de una onda de choque que se propaga en el medio externo y que forma el chorro estacionario.

El desarrollo de este proceso no estacionario brusco coincide en el tiempo con la propagación de la onda de expansión en la cámara y es el mismo o aun más rápido, por esta razón vamos a desprestigiar su influencia sobre la descarga de los productos de la combustión desde la cámara. En condiciones de vuelo sobre el proceso de descarga desde el motor puede influenciar el flujo externo que recorre al misil.

Considerando el régimen de descarga supercrítico, nosotros prácticamente suponemos que la presión después de la onda de choque que se forma como resultado de la interacción del chorro de descarga de los gases con el flujo externo, es menor a la presión crítica en el orificio a través del cual se produce la descarga.

La suposición sobre la abertura instantánea de los orificios adicionales se puede no considerar, si se conoce la ley de movimiento del tapón después de la abertura, ya que en este caso no es difícil calcular la variación de la sección del ducto de los orificios del dispositivo de corte del empuje en el tiempo.

La simplificación natural sobre la invariabilidad del volumen libre de la cámara y de la superficie de combustión de la carga en el tiempo se basa en el hecho de que la duración del período de corte del empuje es muy pequeña en comparación con el tiempo total de trabajo del motor.

Suponiendo que la temperatura de los productos que se forman en el proceso de combustión de la carga es constante, igual a la temperatura de combustión, multiplicado por un coeficiente constante de pérdidas caloríficas; y suponiendo que las características termodinámicas (C_p , C_v , R) de los productos de combustión no dependen de las condiciones en la cámara, nosotros de un lado pagamos el precio de la limitación de los conocimientos

sobre los procesos físico-químicos y de otro lado tratamos de simplificar la descripción matemática.

En el transcurso de la descripción se considera también que la abertura de los orificios adicionales no provoca el apagado de la carga y que los productos de la combustión son un gas ideal.

Adoptamos la ley de combustión exponencial para ser determinante aunque puede ser adoptada y cualquier otra función de la velocidad de combustión respecto a la presión.

El sistema de ecuaciones que describe el desarrollo de los procesos internos de la cámara después de la abertura de los orificios del dispositivo de corte del empuje considerando las suposiciones adoptadas se construye en base al sistema general de las ecuaciones de la balística interna del MCCS en magnitudes promedios en el volumen libre de la cámara y tiene la forma:

$$V_k \frac{d\bar{p}}{dt} = \rho_T S \bar{u} - (\varphi_{2c} F_{kp} + \varphi_{2\Delta} F_{\Delta}) \frac{\Gamma \bar{p}}{\sqrt{RT}}$$

... (6)

$$V_k \frac{dp}{dt} = \rho_T S u k \chi R T_{\Gamma} - (\varphi_{2c} F_{kp} + \varphi_{2\Delta} F_{\Delta}) \frac{\Gamma \bar{p}}{\sqrt{RT}} \kappa R T$$

$$\bar{p} = \bar{\rho} R \bar{T} \quad ; \quad \bar{u} = u_1 \left(\frac{\bar{p}}{p_{atm}} \right)^{\nu}$$

El sistema (6) con respecto a las magnitudes $\bar{p}, \bar{\rho}, \bar{T}, \bar{u}$ se integra para unas condiciones iniciales $\bar{p} = \bar{p}_H; \bar{\rho} = \bar{\rho}_H; \bar{T} = \bar{T}_H; \bar{u} = \bar{u}_H$ que corresponden al régimen estacionario antes de los orificios en la cámara. De esta manera se halla la variación de las magnitudes buscadas en el tiempo.

Mediante transformaciones simples del sistema (6) se puede obtener el sistema de ecuaciones, en el cual dentro del signo de derivado se encuentran los valores de la presión y de la temperatura.

$$V_k \frac{dp}{dt} = \rho_T S \bar{u} k \chi R T_\Gamma - (\varphi_{2c} F_{kp} + \varphi_{2\Delta} F_\Delta) k \Gamma \bar{p} \sqrt{RT} \quad \dots (7)$$

$$V_k \frac{dT}{dt} = \frac{\rho_T S \bar{u} R T}{\bar{p}} (k T_\Gamma - T) - (k-1) (\varphi_{2c} F_{kp} + \varphi_{2\Delta} F_\Delta) \Gamma T \sqrt{RT}$$

$$\bar{p} = \bar{\rho} R \bar{T} \quad ; \quad \bar{u} = u_1 \left(\frac{\bar{p}}{P_{atm}} \right)^v$$

En un caso general la solución del sistema de ecuaciones del tipo (6) o (7) puede ser realizado solamente numéricamente. La adopción de la condición sobre la isothermicidad de proceso ($\bar{T} = \chi T_\Gamma = const$) permite integrar el sistema (más exacto una ecuación diferencial

del sistema) y obtener la función analítica de la presión respecto al tiempo. Esta función tiene la forma:

$$p = \bar{p}_{2CT} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\bar{p}_{1CT}}{\bar{p}_{2CT}} \right)^{1-\nu} \right] \exp \left[- \frac{k(1-\nu) \Gamma (\varphi_{2c} F_{kp} + \varphi_{2\Delta} F_{\Delta}) \sqrt{\chi RT_{\Gamma}}}{V_K} t \right] \right\}^{\frac{1}{1-\nu}}$$

...(8)

Donde:

- $\bar{p}_{1CT}, \bar{p}_{2CT}$ - son los valores de la presión estacionaria en la cámara de combustión en el régimen inicial y secundaria estacionaria respectivamente.

Las magnitudes $\bar{p}_{1CT}, \bar{p}_{2CT}$ se determinaran por las siguientes relaciones:

$$\bar{p}_{1CT} = p_{atm} \left(\frac{\rho_T Su_1 \sqrt{\chi RT_{\Gamma}}}{p_{atm} \varphi_{2c} \Gamma F_{kp}} \right)^{\frac{1}{1-\nu}}$$

...(9)

$$\bar{p}_{2CT} = p_{atm} \left[\frac{\rho_T Su_1 \sqrt{\chi RT_T}}{p_{atm} \Gamma (\varphi_{2c} F_{kp} + \varphi_{2\Delta} F_{\Delta})} \right]^{\frac{1}{1-\nu}}$$

Señalaremos que la región de las posibles aplicaciones de las relaciones arriba mostradas esta limitada por las condiciones, durante las cuales no se produce la extinción de la carga. Si es que en cierto momento de tiempo tiene lugar la extinción de la carga,

entonces comenzando desde este momento, la variación de la presión en la cámara se debe calentar según las funciones que describen la descarga adiabática del gas desde una botella.

Después de la abertura de las toberas de reversa del empuje (fig. VIII) en el proceso transitorio y después de la culminación, el empuje resultante del MCCS se va a determinar por la ecuación

$$\left| \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P} \right| = 1 - \frac{Cp_{oT} \sigma_{oT} \varphi_{oT} \mu_{oT}}{Cp \sigma_{kp} \varphi_c \mu_c} (1 - \varepsilon^*) \cos \varphi \quad \dots(10)$$

Donde:

- ΔP_{Σ} - es el empuje resultante determinado como la diferencia del empuje directo P y del empuje de las toberas de reversa P_{peb} en la proyección sobre el eje longitudinal del motor: ;

$$\left(\Delta P_{\Sigma} = | P - P_{peb} | \right)$$

- φ - es el ángulo de inclinación del eje de las toberas de reversa respecto al eje de la tobera directa.

- $\varepsilon^* = \frac{d_{oT}^2 p_{oT} \operatorname{tg} \beta}{\varphi_{oT} \mu_{oT} p C p_{oT} (1 + \operatorname{tg}^2 \theta_a \operatorname{tg}^2 \beta)^{3/2}}$ - es el coeficiente que

toma en cuenta la influencia de la sección oblicua de la tobera de reversa sobre el empuje

- \bar{d}_{OT} - es el grado geométrico de divergencia de las toberas de reversa ante la ausencia de la sección oblicua. (línea punteada en la fig. VIII)
- p, p_{OT} - Es la presión en la cámara y en la salida de las toberas de reversa
- $\mu_{OT}, \mu_C - \varphi_{OT}, \varphi_C$ - son los coeficientes de caudal y de perdidas en las toberas de reversa y directa respectivamente.
- β - Es el ángulo determinado por la inclinación de la directriz del segmento de unión respecto al eje del motor $(\beta + \gamma + \vartheta) = 90^\circ$.
- θ_a - Es el ángulo de semi abertura de las toberas de reversa.
- σ_{OT}, σ_{KP} - son las áreas de la secciones críticas de las toberas de reversa y directa respectivamente.

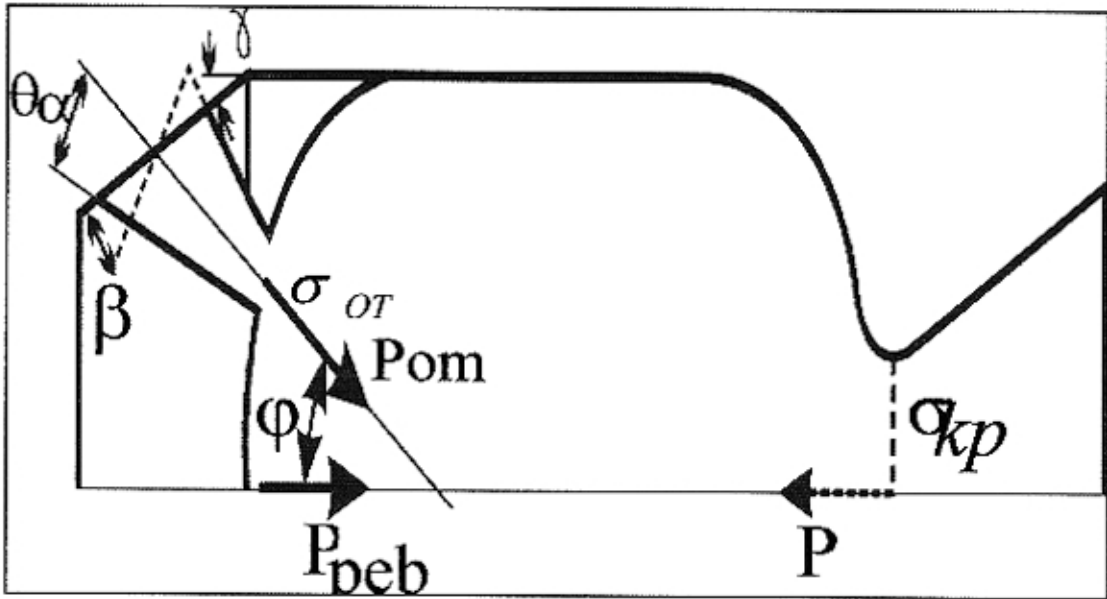


fig. (VIII)

Esquema de aplicación de las fuerzas durante el corte del empuje del motor mediante la abertura de toberas de reversa.

- β - Es el ángulo determinado por la inclinación de la directriz del segmento de unión respecto al eje del motor $(\beta + \varphi + \delta) = 90^\circ$.
- θ_a - Es el ángulo de semi abertura de las toberas de reversa.
- σ_{OT}, σ_{KP} - son las áreas de la secciones críticas de las toberas de reversa y directa respectivamente.
- P_{peb} - Empuje de las toberas de reversa.
- P - Empuje directo

Del análisis de la ecuación (10) se deduce que para crear un valor determinado del empuje de reversa P_{peb} se requiere abrir un área total de las toberas de reversa determinado por la expresión.

$$\sigma_{OT} = \frac{\varphi_C \mu_C C_P \sigma_{KP}}{\varphi_{OT} \mu_{OT} C_{P_{OT}} (1 - \varepsilon^*) \cos \varphi} \left| \frac{P_{peb}}{P} \right| \quad \dots (11)$$

La magnitud del impulso específico del MCCS después de la abertura de las toberas de reversa se determina por la expresión

$$\frac{I_1^*}{I} = \left[1 - \frac{\varphi_{OT} \mu_{OT} \sigma_{OT} C_{P_{OT}} (1 - \varepsilon^*) \cos \varphi}{\varphi_C \mu_C \sigma_{KP} C_P} \right] \frac{\sigma_{kp}}{\sigma_\Sigma} \quad \dots (12)$$

Donde:

- I_1^*, I_1 - Es el impulso específico del MCCS después y antes de la abertura de las toberas de reversa respectivamente.
- $\mu_{OT}, \mu_C - \varphi_{OT}, \varphi_C$ - son los coeficientes de caudal y de pérdidas en las toberas de reversa y directa respectivamente.
- ε^* - es el coeficiente que toma en cuenta la influencia de la sección oblicua de la tobera de reversa sobre el empuje

2.4.- SOBRE LA EXTINCIÓN DE LA CARGA DE COMBUSTIBLE SÓLIDO DURANTE UNA CAIDA BRUSCA DE LA PRESION EN LA CAMARA DE COMBUSTIÓN

El cálculo de los procesos, que se desarrollan en la cámara de combustión después de la abertura de los orificios adicionales requiere del conocimiento de las condiciones, durante las cuales se produce la extinción de la carga. El conocimiento de estas condiciones es más necesario, si es que esta caída de la presión en la cámara se utiliza en calidad de medio de detención de la combustión en fines de investigación.

Las condiciones de apagado de la carga del combustible sólido durante la caída de la presión teóricamente fue investigado por Y.B. Zeldovich [12]. Partiendo del modelo simplificado de la combustión no estacionaria en cuya base esta la suposición sobre la ausencia de las reacciones exotérmicas en la fase condensada y sobre que la temperatura de gasificación es constante Y.B. Zeldovich [12] estableció que como criterio, que determina la condición de apagado, sirve la derivada adimensional de la presión respecto al tiempo, expresado por la relación.

$$Z = \frac{t_{p\Gamma}}{p} \frac{dp}{dt} = \frac{\chi_T}{u^2 p} \frac{dp}{dt} \quad \dots (13)$$

Donde:

- $t_{p\Gamma}$ - es el tiempo de relajación de la capa caliente del combustible.
- χ_T - Es la conductividad térmica del combustible.
- p - presión en la cámara de combustión.

El apagado del combustible se produce en el caso si es que la magnitud absoluta del criterio Z supera cierto valor crítico Z_* , que depende del exponente en la función exponencial de la velocidad de combustión del combustible, del coeficiente térmico de la velocidad de combustión, de la temperatura inicial del combustible y de la temperatura de gasificación.

De esta manera la condición del apagado de la carga durante la caída de la presión tiene la forma:

$$\left| \frac{\chi_T}{\mu^2 P} \frac{dp}{dt} \right| > Z_* \quad \dots (14)$$

Tomando en cuenta que los valores χ_T y Z_* dependen básicamente del tipo (marca) del combustible, la condición (14) en la proposición de la ley exponencial de combustión del combustible puede ser representada en la forma

$$\left| \left(\frac{P_{atm}}{p} \right)^{2\nu} \frac{1}{p} \frac{dp}{dt} \right| > Z_1 \quad \dots (15)$$

Donde:

- $Z_1 = \chi_T Z_* / \mu_1^2$ - es la constante para el tipo dado de combustible.

De la teoría de la combustión no estacionaria [12] se deduce que a parte de una velocidad determinada de la caída de la presión para la extinción del combustible, se requiere alcanzar también una profundidad suficiente de caída de la presión, que para una velocidad ilimitada de la presión en forma de salto de la presión.

Se determina por la siguiente expresión:

$$\frac{P_{\Gamma}}{P_H} = \left(b e^{1-b} \right)^{1/\nu} \quad \dots (16)$$

Donde:

- P_H – es la presión inicial
- P_{Γ} – es la presión, durante la cual el combustible se apaga.
- b – es el coeficiente constante ($b \approx 0,3$)

$$b = B(\theta_* - \theta_H)$$

- B – es el coeficiente térmico de la velocidad de combustión (coeficiente en función de la velocidad de combustión respecto a la temperatura inicial de la carga).
- θ_*, θ_H – es la temperatura de gasificación y la temperatura inicial del combustible respectivamente.

Como se ve de la fórmula (16) cuando $\nu < 1$ la profundidad de la caída de la presión requerida disminuye con el aumento de la magnitud b y del exponente ν . Como durante la deducción se utiliza una función lineal de la velocidad de combustión respecto a la temperatura inicial de la carga, la fórmula (16) tiene sentido solamente para unos valores de $b > 1$.

Las funciones teóricas arriba mostradas, elaboradas en base a la teoría de la combustión no estacionaria, tienen un carácter evaluativo y un campo limitado de aplicación, ya que la propia teoría utiliza las simplificaciones sobre la constancia de la temperatura de la superficie ardiente de la pólvora; la ausencia de las reacciones en la fase condensada y la no inercialidad de la zona de la transformación química en la fase gaseosa.

Simultáneamente esta teoría correctamente refleja el carácter cualitativo de las interacciones y los principales factores que influyen sobre la extinción, lo que esta comprobado por investigaciones experimentales.

Así R. Siplech según los resultados del procesamiento de los datos experimentales obtenidos en el transcurso de la investigación de la caída de la presión durante la abertura de los orificios adicionales en condiciones de descarga al vacío, establece que la extinción de la carga del combustible sólido en el motor comienza si es que el valor de la derivada de la presión es la cámara respecto al tiempo supera (según el valor absoluto) a cierto valor límite [11]

De acuerdo a los resultados de los experimentos de R. Siplech la condición de la extinción de la carga durante la caída de la presión tiene la forma:

$$\frac{1}{P_H} \left| \frac{dp}{dt} \right|_{cp} > Z_2 \quad \dots (17)$$

El valor absoluto medio de la derivada $\left(\frac{dp}{dt} \right)$ en la expresión (17) se determina según el tiempo de caída de la presión hasta la mitad del valor inicial. Para el combustible híbrido investigado en base a copolimero de butadieno y de perclorato de amonio el valor de $Z_2 \approx 150^{1/5}$

Analizando los resultados de las investigaciones teóricas y experimentales de extinción de la carga del combustible sólido en la cámara de combustión efectuada mediante la caída brusca de la presión si se puede concluir que la condición determinante de extinción de la carga es alcanzar la magnitud determinada de la derivada relativa de la presión respecto al tiempo $\left(\frac{1}{p}\right)\left(\frac{dp}{dt}\right)$.

La extinción estable de la carga tiene lugar si es que el valor absoluto de esta derivada supone cierto valor crítico, que depende del tipo de combustible.

Obtendremos la expresión aproximada que permite estimar el área requerida de la sección del ducto de los orificios abiertos, que garanticen la extinción de la carga. Adoptaremos la condición de extinción de la carga en la forma:

$$\frac{1}{p_H} \left| \frac{dp}{dt} \right|_H > Z_2$$

Si es que el régimen inicial en la cámara antes de la extinción es estacionario entonces como se deduce por ejemplo de la relación (7) el valor de la derivada de la presión respecto al tiempo en el momento inicial se expresa por la igualdad.

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_H = \frac{1}{V_K} k\Gamma \varphi_{2\Delta} F_{\Delta} P_H \sqrt{\chi RT_{\Gamma}}$$

De la última igualdad obtenemos la condición de extinción de la carga.

$$\frac{1}{p_H} \left| \frac{dp}{dt} \right|_H = \frac{1}{V_K} k\Gamma \varphi_{2\Delta} F_{\Delta} \sqrt{\chi RT_{\Gamma}}$$

De aquí se deduce que el área e los orificios abiertos adicionalmente deberá satisfacer la limitación

$$\varphi_{2\Delta} F_{\Delta} > \frac{Z_2 V_K}{k\Gamma \sqrt{\chi RT_{\Gamma}}} \quad \dots (18)$$

Como se ve de la condición (18) la magnitud requerida del área de los orificios abiertos es proporcional al volumen libre de la cámara de combustión en el periodo de extinción o sea ella bruscamente crece con el aumento de las medidas lineales de la cámara. Esta última situación predetermina las dificultades de la extinción de la carga mediante la abertura de orificios en los motores de grandes dimensiones.

CAPITULO III

PROCESO DE EXTINCIÓN DE LA CARGA DEL COMBUSTIBLE SÓLIDO MEDIANTE LA INTRODUCCIÓN DE AGENTE REFRIGERANTE LÍQUIDO A LA CÁMARA DE COMBUSTION

3.1 FUNDAMENTOS FÍSICOS

Uno de los métodos efectivos para la extinción forzada de la carga del combustible sólido en la cámara de combustión del motor es la introducción (inyección) de agente refrigerante a la cámara, que inicialmente se encuentra en estado líquido (la extinción puede efectuarse también con la introducción de refrigerantes sólidos y gaseosos).

El esquema de principio del dispositivo para la extinción de la carga con inyección del líquido refrigerante se ilustra en la fig. (IX)

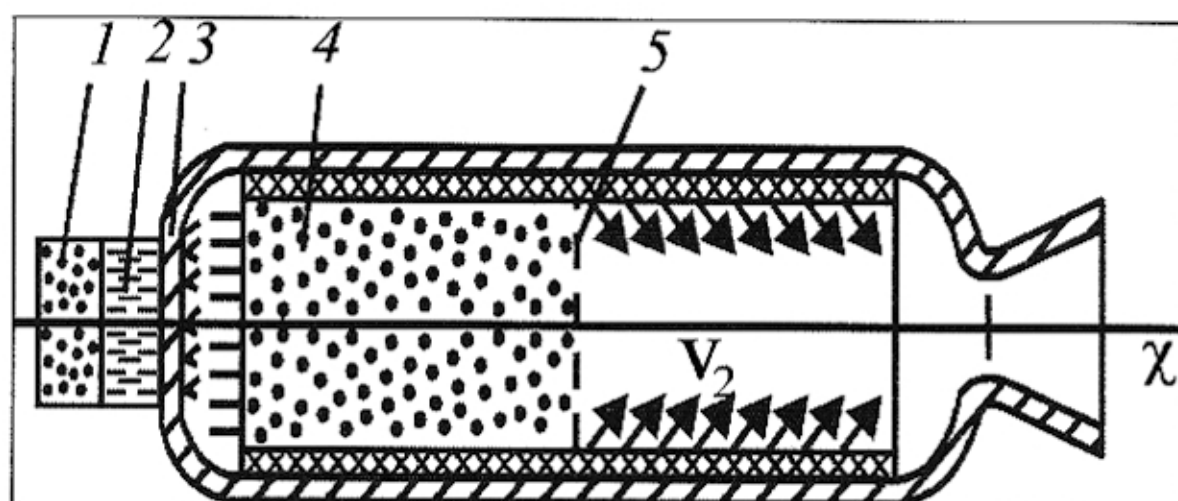


Fig. (IX)

Esquema del proceso de interacción de los vapores del líquido refrigerante en la superficie de la combustión y con los productos de la combustión de la carga de CS.

1. generador de gas de pólvora del sistema de alimentación del líquido
2. líquido refrigerante.
3. inyectores
4. región de los productos de la combustión refrigerados
5. superficie de la interrupción de contacto

El líquido (2) se envía a la cámara de combustión a través de inyectores pulverizadores (3) alta presión, creada por el dispositivo de extinción (1) en forma de chorro, compuesto de pequeñísimas gotas.

Examinaremos el cuadro hipotético de los procesos físicos que se desarrollan en la cámara cuando se inyecta líquido refrigerante al volumen libre por el fondo delantero [9]. Teniendo gran velocidad las gotas del líquido, moviéndose en los productos ardientes de combustión, rápidamente se evaporan lo que provoca un enfriamiento brusco de los productos.

En conclusión en el fondo delantero del motor se forma la zona 4 de los gases enfriados, mezclados con los vapores del refrigerante. Se puede suponer que debido a la intensa evaporización en la región de propagación de las gotas líquidas aparece una zona de vapores saturados con un volumen V_1 , separado de la parte restante de la cámara, llena de productos de combustión por la disrupción de contacto (5).

Cada gota siguiente de líquido vuela a través de la región de los vapores, prácticamente no evaporizándose, hasta que ella no ingrese a la región de los productos de la combustión ardientes, donde se produce una evaporización intensa, como resultado del cual en el período de inyección la disrupción de contacto se desplaza al fondo de tobera.

El carácter de la variación de la presión en la cámara de combustión en el período de inyección depende de la intensidad de la inyección y en mayor grado de la magnitud del calor específico de formación de vapor del refrigerante. Para los líquidos con un alto calor específico de formación de vapor la inyección se acompaña con una reducción de la presión en la zona de formación de vapor.

Esto último se explica por el hecho de que la evaporización de las gotas del líquido provoca una caída intensa de la temperatura de la mezcla vapor – gas, de tal manera que,

aunque simultáneamente aumenta la densidad de la mezcla gracias al ingreso de vapores de líquido, el aumento relativo de la densidad es menor a la disminución relativa de la temperatura, como resultado la presión en la zona de evaporización cae.

La caída de la presión provoca la aparición de la onda de expansión que con la velocidad del sonido se propaga al fondo de la tobera y provoca el movimiento de los productos de la combustión al fondo delantero del motor. La onda de expansión iguala a la presión a lo largo de la longitud de la cámara y de esta manera la caída de la presión tiene lugar no solamente en la zona de evaporización sino en todo el volumen libre de la cámara. La curva típica de variación de la presión en la cámara de combustión durante la inyección del líquido con un alto calor específico de la formación de vapor se muestra en la fig. (X) (curva 1); donde la parte inicial de la caída intensa de la presión le corresponde al proceso de inyección y evaporización del líquido.

Para los líquidos con un bajo calor específico de formación de vapor la inyección no obligatoriamente esta acompañada con una reducción de la presión y puede inclusive provocar un aumento de la presión en la zona de formación de vapor debido al hecho de que la reducción relativa de la temperatura y el aumento relativo de la densidad de la mezcla vapor – gas en el proceso de formación de vapor son magnitudes de un mismo orden. En este caso la variación de la presión en la zona de formación de vapor provoca la variación correspondiente de la presión en todo el volumen libre debido a la propagación de la onda de compresión o expansión (curva 2).

La parte inicial del incremento de la presión en la cámara le corresponde al proceso de inyección y de evaporización del líquido y esta condicionado por el ingreso de la masa de vapor a volumen libre del motor.

Al final del proceso de inyección y de evaporización del líquido como se deduce del cuadro descrito arriba; el volumen libre de la cámara llega a esta parcialmente cubierta

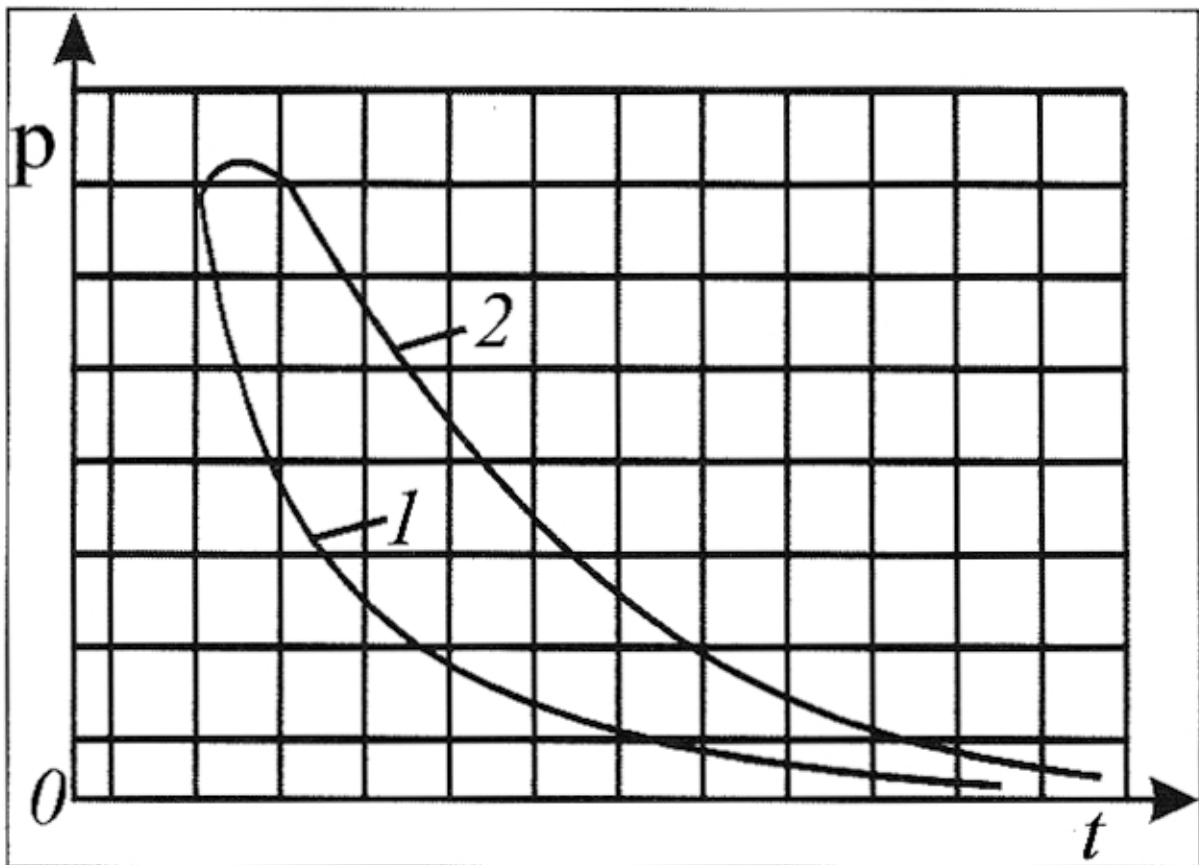


fig. (X)

Grafico de variación de presión vs. tiempo.

1. Curva típica de variación en la cámara de combustión durante la inyección del líquido con alto calor específico de la formación de vapor.
2. Curva de variación de presión en todo el volumen libre debido a la propagación de la onda compresión o expansión.

de la mezcla vapor – gas, que tiene una temperatura próxima a la temperatura del vapor saturado y parcialmente por los productos de combustión del combustible.

Las cámaras lo suficientemente cortas durante una inyección intensa pueden ser “atravesadas” por el chorro del líquido pulverizado. En este caso después de la inyección del líquido todo el volumen libre está lleno de mezcla vapor – gas.

El carácter de la variación posterior de la presión en la cámara de combustión del motor está condicionado básicamente por la acción de la inyección del líquido sobre el proceso de combustión del combustible.

En la zona, hacia donde penetran las gotas del líquido refrigerante tienen lugar los diferentes efectos sobre el frente de llama:

- La disminución de la temperatura en la fase gaseosa debido a la extracción de calor y la evaporización de las gotas.
- Acción directa de las gotas del refrigerante, que alcanzan la superficie ardiente, sobre el frente de llama y la capa caliente de la fase condensada.
- Caída de la presión en la fase gaseosa (cuando se usa líquido refrigerante con alto calor específico de formación de vapor) condicionado por la reducción de la temperatura.

Se debe suponer que como resultado de estas acciones se produce en primer lugar el apagado de la combustión de aquella parte de la superficie de la carga que llega a estar en la zona de penetración de las gotas del líquido refrigerante.

Si es que no hay acción directa de las gotas del líquido sobre la capa caliente de la fase condensada, entonces el apagado puede ser incompleto, ya que después de una

disminución brusca de la adición de calor desde la fase gaseosa la combustión durante cierto tiempo continua gracias al calor acumulado en la capa caliente, lo que inclusive puede provocar el auto inicio del proceso de la combustión.

En la zona hacia donde no penetran las gotas del líquido refrigerante, sobre el frente de combustión actúa solamente la onda de expansión, que aparece en el caso cuando la inyección del líquido provoca la caída de la presión. Si es que la rapidez y la profundidad de caída de la presión en el período de inyección y de evaporización son lo suficiente grandes, entonces el apagado de la superficie ardiente puede tener lugar y en la parte del volumen libre, que no esta sometido de manera directa a la acción del refrigerante líquido. Analizaremos más adelante el cuadro de desarrollo del proceso interno de la cámara después de finalizar la inyección del líquido.

Para una intensidad suficiente del líquido en el momento de finalización del ingreso del líquido hacia la cámara de combustión, la combustión de la carga deberá detenerse por lo menos, en la parte final de su superficie. Como ya se señaló se debe esperar en primer lugar la combustión se detiene en la zona de penetración de las gotas del refrigerante.

Después de finalizar la inyección del líquido en la cámara aparece un estado en desequilibrio, que se caracteriza por la igualdad del ingreso y del gasto de masa. Para detener la combustión en toda la superficie de la carga se necesita que en el momento de finalizar la inyección, el ingreso de los productos de la combustión, condicionando por la combustión de parte de la carga sea menor a su gasto a través de la tobera.

El cumplimiento de esta condición depende de la magnitud de la superficie extinguida inicialmente y del nivel de presión al momento de finalización del líquido. Si es que el gasto de los productos de la combustión a través de la tobera considerablemente supera a su ingreso, la mezcla vapor – gas se propaga más adelante por el volumen libre de la cámara, el frente de los productos enfriados de la combustión se desplaza hacia la tobera cubriendo nuevas partes de la superficie ardiente y deteniendo la combustión en ellos.

Esto provocará un aumento aun mayor del desbalance entre el ingreso y el gasto, como resultado del cual a través de la tobera continua el egreso de la cámara de los productos de la combustión del combustible, mientras que el volumen libre que se libera se llena de una mezcla fría de vapor – gas. Como conclusión la mezcla vapor – gas cubre todo el volumen libre y la combustión en la cámara se detiene.

Sin embargo la superación del gasto sobre el ingreso después de finalizar la inyección del líquido por si solo todavía no garantiza la extinción total.

Si es que la cantidad del componente refrigerante introducido a la cámara y la zona correspondiente ocupada por la mezcla vapor -gas al inicio no es grande, entonces en el proceso de propagación de la mezcla por el volumen libre ella rápidamente se calienta gracias al calor de los productos de combustión que cubren y no puede apagar la llama en toda la superficie, como resultado va a tener lugar solamente una caída temporal de la presión en la cámara hasta un nivel determinado por la medida de la superficie apagada, después del cual ella de nuevo comenzará a inflamarse y el motor pasara a un régimen estacionario de trabajo.

Si es que al momento de finalizar la inyección, se ha apagado una parte insuficiente de la superficie de la carga y el ingreso de gas de la parte no apagada supera al gasto (para unas presiones en la cámara de combustión al final del proceso de inyección), entonces los productos de la combustión del combustible ingresan al volumen, inicialmente ocupado por la mezcla de vapor ya empujando el frente de los gases fríos al fondo delantero y gradualmente inflamando la parte anteriormente apagada de la superficie. En este caso la inyección del líquido no provocará la extinción de la carga, sino que provoca solamente una desviación temporal del régimen estacionario de trabajo del motor.

El cuadro físico dibujado en rasgos generales del proceso interno de la cámara, es simplificado e incompleto. En condiciones reales el apagado de la carga es un proceso que

se desarrolla en un tiempo determinado, por esta razón las partes “extinguidas” de la superficie durante cierto tiempo todavía “arden” lo que complica el carácter del proceso. En la descripción mostrada tampoco se ha hallado un reflejo suficiente de la dinámica complicada y en mucho no clara de interacción de las gotas del refrigerante con la zona de la combustión.

Por ahora es importante señalar que el método de extinción de la carga mediante la inyección del líquido refrigerante está basado en muy rápida introducción a la cámara de combustión; la masa del líquido comparable con la masa de los productos de la combustión que al inicio llenan la cámara deberá adicionarse en un tiempo sustancialmente menor al tiempo de relajación del volumen libre de la cámara y comparable con el tiempo de relajación de la capa caliente del combustible. Caso contrario durante el tiempo de ingreso y de evaporización del líquido debido a la combustión de la carga se forma suficiente calor como para calentar los vapores hasta una alta temperatura y no permitir la extinción en general, de tal manera que la cámara de combustión funciona en el régimen de trabajo de un motor “híbrido” peculiar. Solamente en las condiciones cuando aunque sea durante un tiempo de corta duración la intensidad de la inyección garantiza la introducción de una suficiente gran cantidad de líquido a la cámara, capaz de enfriar efectivamente los productos de la combustión, aparece el régimen de apagado.

3.2. DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DE LOS PROCESOS EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN DURANTE LA EXTINCIÓN DE LA CARGA MEDIANTE LA INYECCIÓN DEL LIQUIDO REFRIGERANTE

Debido a la dificultad y a lo poco estudiado de los procesos en la cámara de combustión durante la inyección del refrigerante, una descripción matemática rigurosa con ecuaciones en derivadas parciales es muy difícil.

Por esta razón partiendo del cuadro físico descrito arriba del proceso de extinción, nos limitaremos a la construcción de un modelo físico simplificado del fenómeno estudiado que en adelante servirá de base para su descripción matemática.

Dividiremos el proceso interno investigado de la cámara en el tiempo en dos periodos: el primero caracteriza el desarrollo del proceso desde el inicio hasta finalizar la inyección del líquido refrigerante, el segundo le corresponde al desarrollo del proceso después de la inyección.

Suponemos que durante el primer período todo el líquido inyectado a la cámara de combustión se evapora y que sus vapores completamente se mezclan con los productos de la combustión, formando una zona de la mezcla vapor – gas, que ocupa el volumen V_1 en el fondo delantero y que este separado de la otra parte del volumen libre por la disrupción de contacto (ver fig. IX) En esta zona la combustión instantáneamente se detiene.

A la parte restante de la cámara de combustión que tiene un volumen libre V_2 el líquido no penetra, esta parte esta llena de producto de combustión del combustible. Si es que el gradiente de variación y la profundidad de la caída de la presión en el período de

inyección superan los valores críticos, entonces la carga en la segunda parte de la cámara continua ardiendo.

El cumplimiento solamente de la primera condición osea que se alcance la pendiente crítica de caída de la presión provoca solamente una extinción de corta duración incompleta, ya que para una insuficiente profundidad de la caída de la presión después de un apagado de muy poca duración va a tener lugar una inflamación repetida. Para evitar la segunda inflamación se necesita hacer caer la presión hasta un nivel inferior al de combustión estable en el régimen dinámico correspondiente.

A medida que se adiciona nuevas porciones a la cámara del líquido refrigerante, el volumen de la zona de la mezcla aumenta como resultado del cual la descripción de contacto se despeja hacia la tobera.

Al momento del inicio del segundo período osea después de que finaliza la inyección del líquido, la absorción de los productos de la combustión de contacto llega a ser impenetrable (sin considerar la difusión).

El movimiento posterior de la descripción de contacto depende de la relación de ingreso de la masa desde la parte no apagada de la carga y del gasto a través de la tobera. Para un proceso correctamente organizado de extinción (una inyección lo suficientemente efectiva) después de finalizar la adición de líquido la zona de vapor - gas continúa expandiéndose gradualmente cubriendo todo el volumen libre y provocando la extinción total de la carga. Luego después de que se boten a los productos de la combustión de la cámara se produce la descarga libre de la mezcla vapor- gas.

Para una baja intensidad de la inyección la parte no apagada de la carga es capaz de crear un ingreso de gas, lo suficiente como para contraponerse a la tendencia de la expansión de la zona, ocupada por la mezcla de vapor - gas. En este caso inmediatamente o después de que transcurra un pequeño intervalo de tiempo después de que se detiene la

inyección el desplazamiento de la interrupción de contacto hacia el lado de la tobera se detiene y luego se produce a compresión de la zona de vapor – gas y el empuje de la descripción de contacto hacia el fondo delantero, como resultado del cual la superficie apagada de nuevo se inflama.

Este es el modelo físico simplificado de los procesos internos de la cámara que se utiliza más adelante para su descripción matemática. Adoptaremos también suposiciones simplificadoras adicionales:

- a.- El líquido refrigerante inyectado a la cámara instantáneamente se evapora y se desplaza con los productos de la combustión, formando una mezcla homogénea; las reacciones químicas entre los productos de la combustión del combustible y el refrigerante no vamos a considerarlas.
- b.- En la zona que ocupa la mezcla vapor –gas se forma el estado de vapor saturado.
- c.- No hay intercambio de calor entre el agente refrigerante líquido y las paredes de la cámara de combustión y de la carga, mientras que la evaporización se produce solamente gracias al calor extraído de los productos de la combustión que se encuentran en la cámara.
- d.- La adición complementaria de masa y de calor, introducido a la cámara por los productos que botan al líquido no se toma en cuenta (se considera por ejemplo a los productos de la combustión de la carga impulsora, si es que la eliminación del líquido se produce mediante su encendido).
- e.- La variación de la presión a lo largo de la longitud de la cámara de combustión durante todo el proceso examinado no se va a considerar suponiendo que la igualación de la presión según la longitud (propagación de las ondas de expansión

y compresión) se produce en un tiempo sustancialmente inferior al tiempo de desarrollo del proceso.

- f.- Suponemos iguales la temperatura y la densidad de los productos gaseosos en el volumen de la cámara, en todos los puntos de la zona cubierto por la mezcla vapor-gas y de la zona llena por los productos de la combustión del combustible pero que se diferencian de zona a zona, haciéndose notar que la temperatura de los productos de la primera zona lo consideramos igual a la temperatura de vapor saturado, y en la segunda zona a la temperatura de combustión considerando las pérdidas caloríficas.
- g.- Consideramos que la combustión de la carga en la zona ocupada por la mezcla vapor-gas instantáneamente se detiene, entonces como en la zona hacia donde no penetran los vapores del refrigerante, la combustión continua hasta que la velocidad y la profundidad de la caída de la presión en la cámara no alcance sus valores críticos.
- h.- El ingreso de los productos de la combustión debido a la combustión de la carga y su gasto a través de la tobera durante el período analizado lo determinaremos partiendo de la cuasi estacionaridad de los procesos de combustión y de descarga.
- i.- La mezcla vapor - gas en los productos de la combustión del combustible los consideramos gases ideales, cuyas características termodinámicas son constantes o dependen de manera conocida de la presión.

Analizaremos las suposiciones adoptadas y simultáneamente obtendremos ciertas relaciones auxiliares, necesarias para la construcción del modelo matemático.

El tiempo de evaporización de la gota se evalúa por la expresión.

$$\Delta t_{uc \eta} \sim \frac{d_H^2}{\xi} \quad \dots (19)$$

Donde:

d_H - es el diámetro inicial de la gota

ξ - es la constante de evaporización.

La constante de evaporización ξ a su vez se evalúa según la fórmula

$$\xi \approx \frac{4D\rho_\eta}{\rho_*} Sh = \frac{4D\rho_\eta}{\rho_*} 2(1 + b\sqrt{Re}) \quad \dots (20)$$

Donde:

D - es el coeficiente de difusión de los vapores del refrigerante

ρ_η, ρ_* - es la densidad de los vapores en la superficie de la gota y densidad del líquido.

Sh - es el número de Sherwood (número de difusión de Nusselt)

Re - es el número de Reynolds para el flujo que recorre la gota.

b - es el coeficiente constante ($b \approx 0,3$)

La evaluación cuantitativa según las funciones mostradas nos muestra que para una presión en la cámara de combustión de $\approx 5 \text{ MPa}$ ($\approx 50 \text{ Kg / cm}^2$), una temperatura de los productos de combustión $\approx 3000 \text{ K}$, un diámetro de la gota

$\approx x100 \text{ } \mu\text{m}$, un velocidad de la gota $\approx 100 \text{ m / s}$, los valores de ξ y Δt_{ucn} a través aproximadamente son $\xi \approx 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$, $\Delta t_{ucn} \approx 10^{-4} \text{ s}$ osea el tiempo de evaporización de la gota es despreciablemente pequeño en comparación con el tiempo de relajación del volumen libre de la cámara inclusive para motores pequeños sin embargo la evaluación mostrada es aplicable a las gotas que se inyectan al motor en la fase inicial del proceso para las demás gotas se debe diferenciar el tiempo de existencia de la gota y el tiempo de evaporización, ya que el tiempo de existencia de la gota puede sustancialmente superar al tiempo de evaporización.

Como la inyección se efectúa desde un extremo de la cámara. En el momento inicial en este extremo se forma una zona de vapores saturados. Las siguiente gotas del refrigerante van a rotar a través de esta zona, prácticamente no evaporizándose, hasta el momento que ellos no ingresen al gas caliente, después del cual las gotas rápidamente se evaporan.

Como la zona en donde se forman el vapor saturado, gradualmente aumenta en medidas, entonces el “período de inducción” de las gotas durante el cual no se produce la evaporización va a aumentar a medida que se aproxime el final del proceso de inyección. En la fase final del proceso de las gotas se evaporan solamente después de que sobre miden toda la longitud de la zona refrigerada.

Al final de cuentas, el tiempo de existencia de la gota se determina como la suma de la duración del movimiento $\Delta t_{\Delta B}$ en la zona de los vapores saturados y del tiempo de evaporización Δt_{ucn}

$$\Delta t_{kan} = \Delta t_{\Delta B} + \Delta t_{ucn} \quad \text{--- (21)}$$

La duración del movimiento en la zona de los vapores saturados se evalúa por la función

$$\Delta t_{\Delta B} \approx \frac{l}{v_{cp}} \quad \dots (22)$$

Donde:

- l - es la extensión de la zona
- v_{cp} - es la velocidad media de movimiento de la gota, calculado considerando el frenado.

Para los motores de grandes dimensiones la magnitud $\Delta t_{\Delta B}$ puede sustancialmente superar al tiempo de evaporización.

A la ley de los conceptos dichos de veracidad de la hipótesis adoptada sobre la instantaneidad de la evaporización de las gotas y de la mezcla de sus vapores con los productos de la combustión en cierta medida depende de la consideración del tiempo de movimiento de las gotas en la cámara de combustión. La presencia del tiempo de recorrido libre de las gotas provoca algo así como el aumento del tiempo de inyección del líquido, en la magnitud $\Delta t_{\Delta B}$ y la correspondiente disminución del gasto. Esta última situación se puede aproximadamente tomar en cuenta, determinando el gasto masico G^* del líquido desde el dispositivo de eliminación (más exacto, el ingreso del líquido a la cámara de combustión). Según la función

$$G^* = G^*_{p} \frac{v_* t}{x_n + v_* t} \quad \dots (23)$$

Donde:

G_{*p} - es el gasto calculado del líquido desde el sistema de eliminación hacia la cámara de combustión.

U_* - es la velocidad de la gota líquida (velocidad de la inyección)

χ_n - es la coordenada de la descripción de contacto que divide la zona de vapores y la zona de los productos de la combustión del combustible.

t - tiempo

Señalaremos que en una primera aproximación las magnitudes G_{*p} y U_* pueden ser calculados según funciones hidráulicas.

$$G_{*p} = \varphi_{2*} F_B \rho_* \sqrt{\frac{2(p_B - p)}{\rho_*}} \quad \dots (24)$$

$$U_* = \sqrt{\frac{2(p_B - p)}{\rho_*}}$$

Donde:

- p_B, p - es la presión en la cámara de eliminación y en la cámara de combustión respectivamente.
- F_B - Es el área del orificio a través del cual se inyecta líquido.
- ρ_* - Es la densidad del líquido.

- φ_{z^*} - Es el coeficiente de gasto del líquido a través del orificio de salida en el sistema de inyección.

Para unos valores de $p_B \geq p$ el coeficiente de gasto φ_{z^*} puede adoptar unos valores sustancialmente menores a uno debido a la aparición de los fenómenos cavitacionales.

Pasaremos a analizar la segunda fase. Esta suposición puede basarse a la rapidez de desarrollo del proceso de evaporización, gracias a la cual la intensidad de formación de vapor es muy alta y las gotas del líquido no penetran profundamente a la zona de los productos de la combustión hasta que no saturan la zona cercana a lugar de la inyección.

Al mismo tiempo está claro que el caso de saturación es el límite, prácticamente en la zona de la mezcla vapor – gas por lo visto tiene lugar un estado próximo al saturado. La tercera exposición se debe considerar lo suficientemente veraz. La cantidad de calor en la capa caliente del combustible generalmente es mucho menor al calor que se encuentra en los productos de la combustión que llenan el volumen libre.

La interacción calorífica de las gotas del líquido con las paredes de la cámara en un período corto de tiempo no deberá provocar un considerable intercambio de calor debido a la acción de bloqueo del colchón de vapor – gas. La no consideración de esta interacción es capaz solamente de provocar un cierto error en la determinación de la posición de la descripción de contacto entre la mezcla vapor – gas y los productos de la combustión y de la magnitud de cálculo de la concentración de los vapores del refrigerante en la mezcla vapor – gas.

La cuarta suposición se debe considerar fundamentada por las condiciones cuando la masa de los productos, que botan al líquido es pequeña en comparación con la masa del líquido botado o si es que estos productos están separado con la masa del líquido botado o

si es que estos productos están separados del líquido botado (eliminado) por un pistón impenetrable.

La suposición sobre la igualación de la presión a lo largo de la longitud de la cámara se basa en que el tiempo de recorrido de la onda de expansión y de compresión a lo largo de la cámara es igual en particular a la división de la longitud de la cámara entre la velocidad del sonido (para la cámara con una longitud de 1m este tiempo es de por ejemplo $\sim 0,001$ s).

Es sustancialmente menor la duración total del proceso de extinción y aproximadamente igual al tiempo de relajación del volumen libre de la cámara, igual para esta misma cámara a casi 0,05s; al mismo tiempo la suposición adoptada sobre la constancia de la presión a lo largo de la longitud de la cámara permite sustancialmente simplificar las relaciones matemáticas, que describen el proceso estudiado.

La sexta suposición es la consecuencia natural de las suposiciones anteriores y también de la suposición sobre el equilibrio del proceso de condensación en el período de expansión de la zona refrigerante.

La constancia de la temperatura en la zona de la combustión se conserva más o menos rigurosamente, si es que la inyección no provoca la detención total de la combustión en esta zona, ya que el desarrollo del proceso después de la inyección llena un proceso cuasi estacionario. Si la combustión se detiene inclusive en la zona, hacia donde no penetran las gotas del refrigerante, entonces el proceso en ella es próxima al isoentrópico y fundamentar la hipótesis sobre la isothermicidad ya es mas complicado.

La séptima suposición en cierta medida es condicional y reflejando no claramente la no totalidad de nuestros conocimientos de las condiciones de extinción se adopta obligadamente, para simplificar, aunque ella de antemano no va a cumplirse a baja intensidad de la inyección.

La octava suposición detalladamente se fundamenta al inicio del presente capítulo. Esta suposición es consecuencia de la variación relativamente lenta de los parámetros en la cámara después de finalizar la inyección.

El análisis de la mezcla vapor-gas y de los productos de la combustión del combustible en forma de gases ideales se debe considerar natural para el campo de las presiones y de la temperatura que tienen lugar en la cámara de combustión en el período de extinción por inyección con refrigerante líquido.

Basándonos en las suposiciones adoptadas y en el modelo físico, construiremos un sistema de ecuaciones, que describen el proceso interno de la cámara durante los periodos primero y segundo de extinción.

Al inicio obtendremos el conjunto respectivo de ecuaciones para el período de inyección del refrigerante.

Estableceremos el valor G_2 de la cantidad de productos de la combustión, llevados en unidad de tiempo desde la segunda zona V_2 hacia la mezcla con vapores del líquido refrigerante. La ecuación elaborada con esta finalidad del balance de energía para la mezcla vapor-gas en forma de integrales (sin considerar la dinámica de los procesos) tiene la forma:

$$(G_2 + G_*)c_{v_{CM}}T_{CM} = G_2c_{v_2}T_2 + G_*c_{pm}T_n - G_*[U_n + C_*(T_n - T_*)]$$

.... (25)

Donde:

T_n, T_*, T_{CM} - Es la temperatura del componente (del vapor saturado, del líquido y de la mezcla respectivamente).

G - Es el ingreso por segundo del componente.

U_n - Es el calor específico de formación de vapor del líquido inyectado.

C - Es el calor específico del componente

$$Cv_2 = Cv_r \quad ; \quad T_2 = \chi T_r$$

De acuerdo con las adopciones consideradas suponemos que la temperatura de la mezcla vapor - gas T_{CM} igual a la temperatura de formación de vapor T_n correspondientemente, de la ecuación de balance de la energía obtenemos la expresión para la magnitud buscada G_2 :

$$G_2 = G_* \frac{Cv_{CM}T_n + V_n + C_*(T_n - T_*) - C_{pn}T_n}{Cv_2T_2 - Cv_{CM}T_n} \quad \dots (26)$$

Para los cálculos evaluativos se permite partir de una función aun más simple.

$$G_2 = G_* \frac{U_n + C_*(T_n - T_*)}{Cv_2(T_2 - T_n)} \quad \dots (27)$$

La ecuación de conservación de la masa en el volumen V_1 , ocupada por la mezcla de vapor-gas; considerando las suposiciones adoptadas, tiene la forma:

$$\frac{d}{dt}(\rho_{CM}V_1) = G_* + G_2 \quad \dots (28)$$

La ecuación de conservación de la masa en el volumen V_2 , ocupado por los productos de la combustión tendrá la forma:

$$\frac{d}{dt}(\rho_2 V_2) = G_T - G_2 - G_C \quad \dots (29)$$

Donde:

G_T - es el ingreso de masa de los productos de la combustión del combustible desde la parte no apagada de la carga.

G_C - es el gasto másico de los productos de la combustión del combustible a través de la tobera.

La expresión para el ingreso de los productos de la combustión del combustible en la suposición de una función exponencial de la velocidad de combustión respecto a la presión lo representamos en la forma:

$$G_T = \rho_T S_T u_1 \left(\frac{P}{P_{atm}} \right)^v \quad \dots (30)$$

Donde :

S_T - Es la magnitud de la superficie que esta ardiendo y no ha sido apagada.

P_{atm} - Presión atmosférica

El gasto de los productos de la combustión a través de la tobera en el régimen supercrítico de descarga se expresa por la fórmula:

$$G_C = \varphi_{2C} \Gamma(k_2) \frac{p F_{KP}}{\sqrt{R_2 T_2}} \quad \dots (31)$$

Donde:

k_2 y R_2 es el coeficiente isotrópico y la constante específica de los productos de la combustión del combustible.

Escribiremos más adelante la ecuación del estado para la mezcla vapor-gas.

$$p_{CM} = \rho_{CM} R_{CM} T_n \quad \dots (32)$$

Y para los productos de la combustión del combustible

$$p_2 = \rho_2 R_2 T_2 \quad \dots (33)$$

Las características termodinámicas, $C_{v_{CM}}$ R_{CM} de la mezcla vapor-gas depende del porcentaje en peso g_n de los vapores del refrigerante en la mezcla de acuerdo con la teoría de las mezclas homogéneas gaseosas.

En las siguientes fórmulas se llegará a obtener este porcentaje en peso de los vapores considerando los valores y conceptos obtenidos anteriormente.

$$C_{v_{CM}} = C_{v_2}(1 - g_n) + C_{v_n}g_n \quad \dots (34)$$

$$R_{CM} = R_2(1 - g_n) + R_n g_n$$

El porcentaje en peso del vapor g_n en la mezcla vapor gas es igual a la siguiente expresión:

$$g_n = \frac{\int_0^t G_* dt}{\rho_{CM} V_{CM}} \quad \dots (35)$$

Para un enfoque simplificado en lugar de la expresión (35) se puede utilizar una expresión mas simple, valida, rigurosamente hablando, solamente en condiciones de constancias de las magnitudes G_* y G_2 .

$$g_n = \frac{G_*}{G_* + G_2} \quad \dots (36)$$

La suma de los volúmenes, ocupado por la mezcla vapor-gas y por los productos de combustión del combustible, es igual al volumen libre de la cámara V_K en el período del inicio de la extinción osea:

$$V_1 + V_2 = V_K \quad \dots (37)$$

Conociendo las medidas geométricas de la cámara y de la carga en el momento del inicio de la extinción no es difícil establecer la función del volumen V_1 , ocupado por la mezcla vapor-gas y de la magnitud de la superficie ardiente no apagada S_T respecto a la coordenada X_n de la descripción de contacto, que divide la zona de la mezcla vapor-gas los de los productos de la combustión del combustible correspondientemente suposiciones conocidos las funciones:

$$V_1 = V_1(x_n) \quad S_T = S_T(x_n) \quad \dots (38)$$

Las últimas relaciones cierran el sistema de ecuaciones, que describen el primer período del proceso. Se debe tener en cuenta que de acuerdo con la posición inicial sobre el posible apagado de la parte de la carga, ubicada en la zona, para unas condiciones críticas de caída de la presión se debe considerar $S_2 = 0$, comenzando desde el momento de apagado.

Para determinar las 16 funciones desconocidas del tiempo $G_*, G_{*p}, U_{**}, G_2, \rho_{CM}, V_1, \rho_2, V_2, p, G_T, G_C, C_{VCM}, R_{CM}, g_n, S_T, \chi_n$, tenemos 16 ecuaciones (23)-(38) sin la (25). La magnitud de la presión P_B en el dispositivo de eliminación suponemos que esta dado o se determina de las relaciones de cálculos adicionales.

Las magnitudes U_n, T_n, c_{Vn}, R_n que caracterizan las propiedades termodinámicas de los vapores del refrigerante se consideran constantes o funciones conocidas de la presión p . Estas magnitudes por lo tanto serán asumidas en el momento de los cálculos de acuerdo a los mismos en las ecuaciones ya vistas.

Las magnitudes T_2, R_2, C_{V2}, K_2 que caracterizan los parámetros termodinámicas de los productos de la combustión del combustible sólido en la cámara, suponemos constantes, iguales a sus valores en el régimen estacionario que antecede a la extinción.

Las constantes $\varphi_{2*}, \varphi_{2c}, F_B, F_{kp}, C_*, \rho_*, T_*, \rho_T, u_1, v, V_K$ que caracterizan los parámetros geométricos de la cámara y del dispositivo de sacado (eliminación), los parámetros fisico-químicos del líquido y del combustible deberán ser naturalmente dados.

Los valores iniciales de las magnitudes que entran en las ecuaciones diferenciales correspondiente son iguales a:

$$\left(\rho_{CM} V_1\right)_H = 0 \quad \dots (39)$$

$$\left(\rho_2 V_2\right)_H = \frac{P_H V_K}{\chi R_2 T_2}$$

El valor inicial de la magnitud g_n se determina de la ecuación (36)

De esta manera se demuestra que el sistema obtenido de ecuaciones es la descripción matemática del primer período del proceso de extinción con inyección de líquido.

Basándose en las relaciones obtenidas es fácilmente realizar la descripción matemática del segundo período del proceso que tiene lugar después que se tiene el ingreso del líquido refrigerante a la cámara de combustión

Señalaremos que como el gasto real del líquido G_* , se diferencia del gasto de cálculo G_{*p} , entonces al término del primer período le corresponde al tiempo t_1 , determinado de la igualdad.

$$\int_0^{t_1} G_* dt = \omega_* \quad \dots (40)$$

Donde

ω_* - es la masa total del líquido, introducido a la cámara de combustión.

G_* - gasto másico del líquido desde el dispositivo de eliminación.

t_1 - tiempo correspondiente al primer período.

Las ecuaciones de conservación de la masa en los volúmenes V_1, V_2 , ocupados por la mezcla vapor-gas y por los productos de la combustión del combustible como se deduce de las ecuaciones (28)(29) tendrán la forma:

$$\frac{d}{dt}(\rho_2 V_2) = G_T - G_C \quad \dots (41)$$

$$\rho_{CM} V_1 = (\rho_{CM} V_1)_{H2}$$

Donde con el índice "H2" se han señalado a los valores de las magnitudes al final del primer y al inicio del segundo período.

Las ecuaciones restantes permanecen invariables, se deben tener solamente en cuenta que como en las ecuaciones (33) $g_n = g_H = const$ no se necesita la ecuación (34) y las propias ecuaciones (33) determinan los valores constantes de las magnitudes C_{VCM}, R_{CM} .

De esta manera para el segundo período son funciones desconocidas del tiempo $p, p_2, V_2, \rho_{CM}, V_1, G_T, G_C, S_T, X_n$, para determinar estas magnitudes tenemos ecuaciones (30) - (32), (36) - (40).

Los valores iniciales de las magnitudes para el segundo período le corresponden los valores finales para el primer período.

Si es que la extinción de la carga esta condicionado por las velocidades críticas de caída de la presión entonces comenzando desde el momento del apagado, se debe suponer que $S_T = 0$ y más adelante cuando se alcanza el valor $V_1 = V_k$ calcular la presión según la función que caracteriza la descarga libre de la mezcla de vapor - gas desde el motor.

$$p = p_H \left[1 + \frac{k_n - 1}{2} \frac{\varphi_{2C} F_{kp} \sqrt{R_n T_n}}{V_k} t \right]^{2k_n / (k_n - 1)} \quad \dots (42)$$

Donde:

t - es el tiempo calculado desde el momento de inicio de la descarga de la mezcla vapor-gas.

p_H - es la presión en el momento de inicio de la descarga de la mezcla vapor-gas.

k_n - es el exponente isotrópico de la mezcla vapor-gas.

El cálculo según la función (42) se ejecuta hasta con los valores de p que corresponden al término del proceso de descarga supercrítica.

En un caso más genérico la extinción total de la carga tiene lugar solamente después de que pase la disrupción de contacto que separa la mezcla vapor-gas y los productos de la combustión del combustible a lo largo de toda la longitud de la cámara o sea bajo la condición $\chi_n = 1$, ($V_1 = V_k$) después del cual la variación de la presión en la cámara esta sujeto a la función aproximada (42).

Como ya se señaló cuando se analiza el modelo físico del proceso y una inyección lo insuficientemente intensa (tanto en el tiempo, como según el caudal del refrigerante adicionado) no provoca una extinción total de la carga. En este último caso después de finalizar la inyección la disrupción de contacto deja de desplazarse en dirección hacia la tobera y empujado por los productos de la combustión al fondo delantero y el sistema de ecuaciones para el segundo período describe el proceso transitorio de retorno del motor al régimen estacionario de trabajo. Se debe señalar solamente la situación que de acuerdo al modelo adoptado en el último caso la mezcla vapor-gas llega a estar “estrangulada” en la parte del volumen en el fondo delantero, mientras que en la realidad ella gradualmente se desplaza con los productos de la combustión y va a ser botado completamente de la cámara, lo que provocará la reaparición del régimen estacionario inicial.

CAPITULO IV

ANALISIS DE LA VARIACIÓN DE LA PRESIÓN EN LA CAMARA DE COMBUSTIÓN DURANTE LA EXTINCIÓN DE LA CARGA CON INYECCIÓN DEL LIQUIDO REFRIGERANTE

Las ecuaciones obtenidas en el capítulo anterior permiten calcular la variación de las principales magnitudes físicas en el tiempo, que caracterizan el desarrollo del proceso interno de la cámara durante la extinción de la carga mediante la inyección del líquido refrigerante.

Tomando en cuenta el carácter hipotético del modelo físico adoptado y la cantidad de suposiciones, es conveniente simplificar al máximo el modelo matemático, sobretodo aplicable a los fines de los cálculos de ingeniería de estimación. En el presente capítulo con ciertas simplificaciones posteriores y en base a funciones construidas en el transcurso

de la descripción anterior, se han obtenido relaciones simples que permiten aproximadamente calcular la variación de la presión en la cámara de combustión durante la extinción de la carga mediante la inyección del líquido refrigerante.

Suponemos que la relación de los ingresos del líquido inyectado por segundo y de los productos de combustión al volumen ocupado por la mezcla vapor-gas se puede considerar constante para todo el tiempo del proceso de inyección.

Como se deduce de las ecuaciones (26), (27); esta suposición es semejante a la condición de constancia de la magnitud.

$$\frac{G_2}{G_*} = n = \frac{C_{VCM}T_n + V_n + C_*(T_n - T_*) - C_{pm}T_n}{C_{V2}T_2 - C_{VCM}T_n} \approx \frac{U_n + C_*(T_n - T_*)}{C_{V2}(T_2 - T_n)} \quad \dots (43)$$

De acuerdo con las ecuaciones (34), (35) adoptamos también que:

$$g_n = \frac{G_*}{G_2 + G_*} = \frac{1}{1 + R} = const \quad \dots (44)$$

De la última igualdad y de la ecuación (33) se obtiene la ecuación de las características termodinámicas de la mezcla vapor-gas.

Se pueden visualizar en la ecuación siguiente (45)

$$C_{VCM} = C_{V2} \frac{n}{1+n} + C_{Vn} \frac{1}{1+n} \quad \dots (45)$$

$$R_{CM} = R_2 \frac{n}{1+n} + R_n \frac{1}{1+n}$$

A parte de este suponemos que $T_{CM} = T_n = const$. Considerando las suposiciones hechas integramos la ecuación (28) y al final obtenemos

$$\rho_{CM} V_1 = (1+n) \int_0^t G_* dt$$

Debido a la ecuación (32) la última igualdad se transformará en

$$pV_1 = (1+n)R_{CM}T_n \int_0^t G_* dt \quad \dots (46)$$

Señalaremos que si la presión en el dispositivo de eliminación sustancialmente supera a la presión en la cámara de combustión, entonces durante el cálculo del caudal del líquido según las funciones (23), (24) se puede suponer que $p_B - p \approx p_B$ y de esta manera considerar que el caudal G_* es función del tiempo conocido.

Correspondientemente la ecuación (46) permite determinar pV_1 como una función del tiempo. Para obtener la ecuación para el cálculo de la presión p en el período de

inyección del líquido, transformaremos las ecuaciones (28) y (29) colocando en el los valores de ρ_{CM} y ρ_2 de las ecuaciones (31), (32) y tomando en cuenta que debido a las simplificaciones adoptadas $R_{CM} = const$, $T_n = const$ y sumando ambas ecuaciones, después de transformaciones evidentes llegamos a la ecuación siguiente, que expresa la condición de conservación de la masa en todo el volumen libre de la cámara de combustión.

$$V_K \frac{dp}{dt} = (1+n)G_* R_{CM} T_n - nG_* R_2 T_2 + (G_T - G_C) R_2 T_2 \quad \dots (47)$$

La principal dificultad de la integración de esta ecuación consiste en que el ingreso de los productos de la combustión G_T depende de la magnitud de la superficie apagada S_T que a su vez esta relacionada con el valor del volumen V_1 , llena con mezcla de vapor-gas. Introducimos la siguiente función que aproxima la relación entre las magnitudes S_T y V_1 :

$$S_T = S_{T.H} \left(1 - \frac{V_1}{V_2} \right) \quad \dots (48)$$

Donde:

$S_{T.H}$ - es la superficie ardiente total inicial.

Entonces de acuerdo con las ecuaciones (45)

$$S_T = S_{T.H} \left[1 - \frac{(1+n)R_{CM} T_n \int_0^t G_* dt}{pV_k} \right] \quad \dots (49)$$

Colocando en la ecuación (46) las expresiones de G_T y G_C de las relaciones (30), y el valor de S_T de la igualdad (48) llegamos a la ecuación diferencial, que caracteriza la variación de la presión en la cámara de combustión en el período de inyección del líquido refrigerante.

$$V_k \frac{dp}{dt} = G_c R_{c3} T_n - n G (R_2 T_2 - R_{c3} T_{c3d}) + \rho_T S_{TH} R_2 T_2 \left[1 - \frac{(1+n) R_{c3} T_n \int G_c dt}{P V_k} \right] \mu_1 \left(\frac{P}{P_{ATM}} \right)^{\gamma} - \varphi_{2c} \Gamma_P F_{kp} \sqrt{R_2 T_2} \quad \dots (50)$$

Si es que el caudal (gasto) del líquido inyectado G_c es una función conocida del tiempo, entonces la integración de la ecuación (50) permite establecer la función de la presión en la cámara de combustión del motor respecto al tiempo en el período de inyección ya que las magnitudes restantes que entran en la ecuación son constantes que ya sea son dados o se determina de las relaciones (43), (44), (45). En calidad de condición inicial durante la integración de la ecuación (50) se deberá dar la presión inicial.

La ecuación (50) es válida y para el segundo período del proceso, que comienza en el momento t_1 de la eliminación total del líquido. Como comenzando desde el momento $t = t_1$ se cumple la condición $G_c = 0$, entonces el cálculo de la presión en el segundo período se reduce a la integración de la ecuación

$$V_k \frac{dp}{dt} = \rho_T S_{TH} R_2 T_2 \left[1 - \frac{(1+n) R_{CM} T_n \omega_c}{P V_k} \right] \mu_1 \left(\frac{P}{P_{ATM}} \right)^{\gamma} - \varphi_{2c} \Gamma_P F_{kp} \sqrt{R_2 T_2} \quad \dots (51)$$

La extinción total de la carga tiene lugar cuando la cámara por completo se llene de mezcla vapor-gas osea durante $p = p_H$ determinado de la condición

$$p_K V_K = (1 + n) \omega_* R_{CM} T_n \quad \dots (52)$$

Desde el momento en que se cumple la igualdad (51) tiene lugar la descarga libre de la mezcla vapor – gas desde la cámara y la presión en la cámara de calcula según la fórmula (42).

Si la caída de la presión condicionada por la inyección de líquido con un alto calor específico de formación de vapor provoca una extinción estable entonces comenzando desde el momento de extinción, el cálculo de la variación de la presión se debe efectuar integrando la ecuación (50) en lo cual $u_1(p/p_{atm})^y = 0$.

4.2 *SOBRE LAS CONDICIONES QUE GARANTIZAN LA EXTINCIÓN DE LA CARGA CON INYECCIÓN DEL LIQUIDO REFRIGERANTE*

En los subcapítulos anteriores se describieron los métodos del cálculo de variación de la presión en la cámara condicionado por la adicción a la cámara del refrigerante líquido cuando se conoce su cantidad y caudal. En los problemas de diseño y de investigación de los sistemas de extinción en primer lugar se requiere evaluar la cantidad del líquido, necesario para la extinción y su caudal en unidad de tiempo osea el planteamiento del problema tiene otro carácter.

Señalaremos como en base a las relaciones de cálculo obtenidos arriba y al análisis de los procesos físicos que tienen lugar durante la inyección del refrigerante líquido, evaluar la cantidad total y el caudal del líquido por segundo necesario para la extinción. Una de los principales condiciones de la extinción efectiva mediante la inyección del líquido, es garantizar la intensidad de adición del líquido o sea la cantidad del líquido necesario para la extinción se debe introducir en un tiempo sustancialmente menor al tiempo de relajación de la cámara.

En caso contrario durante el tiempo de inyección debido a la combustión que continua, al volumen libre de la cámara ingresan nuevas porciones de productos de combustión, lo que conlleva en la necesidad del aumento de la cantidad de líquido introducido.

Suponemos que el tiempo durante el cual se introduce la mínima cantidad necesaria del líquido para la extinción es por lo menos en un orden menor al tiempo de relajación de la cámara. En este caso la ecuación (50) utilizada para la descripción del proceso en el período de inyección, se puede despreciar los términos que caracterizan el ingreso y el gasto de productos de la combustión del combustible.

De esta manera, en el período de introducción del refrigerante se cumple aproximadamente la ecuación:

$$V_K \frac{dp}{dt} = G_* [R_{CM} T_n - n(R_2 T_2 - R_{CM} T_{CM})] \quad \dots (53)$$

Integrando esta ecuación en los límites desde el momento del inicio de la inyección del agente líquido refrigerante hasta el término de esta inyección, obtenemos la expresión que a continuación se detalla:

$$V_K (P_K - P_H) = \left[R_{CM} T_n - n (R_2 T_2 - R_{CM} T_{CM}) \right] \int_0^t G_* dt$$

.... (54)

Donde:

P_H, P_K son los niveles inicial y final de la presión en la cámara como:

$$\int_0^t G_* dt = \omega_*$$

Entonces de la ecuación (54) obtenemos la siguiente expresión para la cantidad necesaria (de masa) del líquido inyectado ω_* .

$$\omega_* = \frac{V_K P_H}{R_2 T_2} \frac{1 - (P_K / P_H)}{n \left[1 - (R_{CM} T_{CM} / R_2 T_2) \right] - (R_{CM} T_n / R_2 T_2)} \quad \text{.... (55)}$$

Tomando en cuenta que

$$\frac{V_K P_H}{R_2 T_2} = V_K \rho_K = \omega_T$$

Donde:

ω_T - es la masa de los productos de la combustión que se encuentran inicialmente en la cámara, de la ecuación (55) hallamos que:

$$\frac{\omega_s}{\omega_r} \approx \frac{1 - (p_K / p_H)}{n \left[1 - (R_{CM} T_{CM} / R_2 T_2) \right] - (R_{CM} T_n / R_2 T_2)} \quad \dots (56)$$

La última igualdad para una profundidad relativa conocida de caída de la presión $1 - (p_K / p_H)$ necesario para la extinción, permite evaluar la cantidad relativa de líquido (en la relación a la masa de los gases en el volumen libre) necesario para la extinción de la carga.

Omitiendo cálculos concretos, anotaremos que para las evaluaciones límites aproximados se puede partir de la relación muy aproximada $\omega_s \sim \frac{1}{n} - \omega_r$. Como para los líquidos con un alto calor específico de formación de vapor y con una temperatura de ebullición $n \approx 1$, entonces la cantidad necesaria de este líquido para la extinción se evalúa por la magnitud, aproximadamente igual a la masa de los productos de la combustión en la cámara, en el período que antecede a la extinción.

4.3 EJEMPLO DE CALCULO DE DETERMINACIÓN DE LA MASA DEL LIQUIDO NECESARIO PARA EL APAGADO TOTAL DE LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN EN LA CAMARA

Considerando el carácter hipotético del modelo físico escogido del proceso de apagado del grano por medio del vaciado de líquido refrigerante y también suposiciones generales de simplificar el sustento matemático aplicado a los cálculos de evaluación en ingeniería.

De la figura (V)(pag. 18) se observa el esquema del MCCS (motor cohete a combustible sólido) con un dispositivo de apagado con el líquido refrigerante.

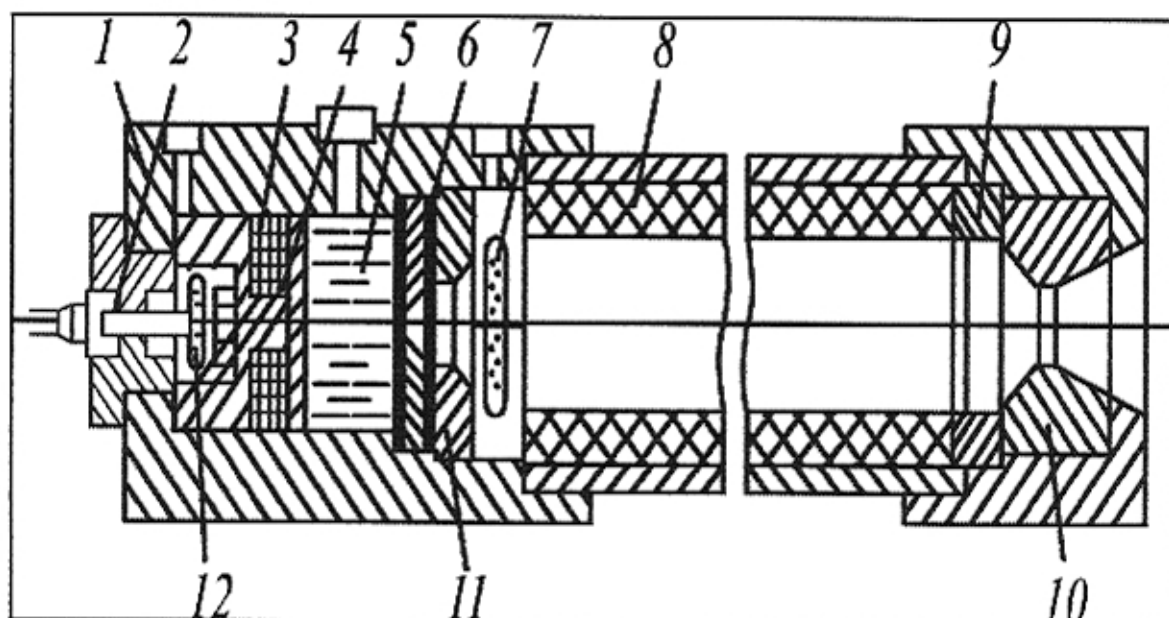


Fig (V)

Esquema del MCCS con dispositivo para el apagado con líquido refrigerante (5)

El calculo de la cantidad del líquido refrigerante se realizó como ejemplo para el misil balístico "POLARIS A1" que tiene 2 etapas. Para el cálculo determinamos las principales características de la segunda etapa del misil, las que veremos en la siguientes tabla:

Tabla I

Parámetros	Indicador
Tipo de motor	MCCS
Número de etapas (n)	2
Diámetro de la etapa (D)	1,37 m
Longitud de la etapa (l)	5,48 m
Presión de la Cámara (p ₁₁)	24,6 bar
Relación empuje / peso	0,54
Impulso específico (I _s)	230 m/seg.
Peso del combustible (ω)	3,1 T.
Peso del motor (m φ)	5,3 T

Para el motor del misil seleccionamos el combustible

- NH₄ CLO₄ 68% (oxidante)
- Poliuretano 17% (Combustible)
- Aluminio 15% (incrementa el I_s)

Con las siguientes características

$$\rho_T = 1800 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad de combustible}$$

$$T_2 = 3300 \text{ K} \quad \text{Temperatura en la Cámara}$$

$$R_2 = 52,9 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \quad \text{Constante de gas (productos de la combustión del CS.)}$$

Para el apagado tomamos el líquido alcohol etílico, el cual tiene:

$$T_{\text{ebullición}} = 64,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R = 18,42 \frac{\text{Kg} \cdot \text{m}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

Agua que participa en el proceso de apagado en forma de vapor; tenemos:

$$T_{\text{ebullición}} = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R = 47,06 \frac{\text{Kg} \cdot \text{m}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

El calculo de la cantidad necesaria de líquido se determina por la fórmula ...(55)

$$\omega_* = \frac{V_K P_H}{R_2 T_2} \frac{1 - (p_K / p_H)}{n \left[1 - (R_{CM} T_{CM} / R_2 T_2) \right] - (R_{CM} T_n / R_2 T_2)}$$

Donde:

$$- V_K = \pi \cdot R^2 \cdot L = 3,14 \cdot 0,685^2 \cdot 5,48 = 8,07 \text{ m}^3 \quad - \text{Volumen de la cámara de combustión}$$

$$- p = 8800 \text{ Kg/m}^2 = 0,88 \text{ Kg/cm}^2 \quad - \text{Presión en la cámara para el líquido congelante. (en el momento de activar el piroperno).}$$

$$- R_2 = 52,9 \frac{\text{Kg} \cdot \text{m}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \quad - \text{Constante de gas}$$

$$- n = 1$$

- Relación de cantidad de gases G_2 por cantidad liquido refrigerante ω_*

$$- P_R = 24,6 \text{ bar} = 25,09 \cdot 10^4 \text{ Kg/m}^2$$

- presión en la cámara de combustión

$$- R_{CM} = 32,7 \frac{\text{Kgm}}{\text{Kg.K}}$$

- Constante de gas de la mezcla congelante

$$T_{CM} = 82^\circ\text{C} = 335 \text{ K}$$

- Temperatura del gas de la mezcla congelante

$$T_v = 64,1^\circ\text{C} = 337,1 \text{ K}$$

- Temperatura del vapor.

Entonces:

$$\omega_* = \frac{8,07 \times 25,09 \cdot 10^4}{52,9 \times 3300} \times \frac{1 - \left(\frac{5 \cdot 10^4}{25,09 \cdot 10^4} \right)}{1 \times \left[1 - \left(\frac{32,7 \times 355}{52,9 \times 3300} \right) \right] - \left(\frac{32,7 \times 337,1}{52,9 \times 3300} \right)}$$

$$= 11,61 \times 0,92 = 10,68 \text{ Kg}$$

es decir: masa del liquido refrigerante necesario $\omega_* = 10,7 \text{ Kg}$.

CONCLUSIONES

- 1.- En base a la reseña bibliográfica y a los datos estadísticos, se ha efectuado un análisis de las construcciones existentes de los conjuntos de los cortes de empuje del MCCS y se ha analizado las diferentes variantes con la finalidad de obtener un máximo alcance del MCCS.
- 2.- El método de corte del empuje mediante la extinción forzada de la carga en la cámara de combustión mediante la inyección del refrigerante líquido o en forma de polvo no requiere la distorsión de la condición en la cámara de combustión y no provoca perturbaciones generadas por la descarga del chorro desde los orificios adicionales.
- 3.- El carácter de variación de la presión en la cámara de combustión en el período de inyección del refrigerante, depende de la intensidad de la inyección y aun más en gran medida de la magnitud del calor específico de formación de vapor del refrigerante.
- 4.- El régimen de apagado aparece cuando se permite la adición de una gran cantidad de líquido a la cámara de combustión.
- 5.- El modelo matemático desarrollado de los procesos que ocurren en la cámara de combustión durante la extinción de la carga por la inyección del líquido refrigerante, permite determinar la cantidad de líquido necesario para la extinción y su caudal en una unidad de tiempo.
- 6.- El cálculo de evaluación nos muestra que la masa necesaria de líquido para la extinción con un alto calor específico de formación de vapor aproximadamente es igual a la masa de los productos del quemado en la cámara de combustión en el período que antecede a la extinción.

- 7.- Se recomienda entonces que se emplee la fórmula para determinar la masa del líquido refrigerante en cualquier tipo de misil balístico de largo alcance, de manera de poder obtener sobre la base de este, el volumen requerido para el contenedor del líquido dentro del misil, cálculo que se desarrollara durante el diseño del mismo

BIBLIOGRAFÍA

1. **Anderson F.A.** y otros "Apagado de la carga coheteril a bajas presiones" CTC tomo 1963 N° 11
2. **Corsi G. Morresnemi G.** "Corte del empuje del M CCS con ayuda de inyección de líquido sobre la superficie de la carga" –preguntas del material coheteril 1906 N° 7.
3. **Cheiken R.F.** "Modelo de apagado en baja presión en los motores cohetes en base a combustible sólido" CTC 196 N° 6
4. **Dubrov B.** y otros "Balística interna del M CCS durante la variación del empuje" – "Preguntas del material coheteril" 1966 N°1.
5. **Fletcher E.A. Bandi D.V.** " del combustible sólido de cohete durante la caída de la presión en la cámara de combustión con fines de corte del empuje" CTC (Ciencia Técnica Coheteril) N° 5 1965.
6. **Frajut de nov. I.V. Kotielshikov A.V.** "Construcción y diseño de los motores cohete de combustible sólido" Moscu. Mashenoestroyanie 1987 328 pag.
7. **Kalt shewin.** "Empleo de los datos de las pruebas balísticas para evaluar el sistema de corte de empuje del motor que trabaja en base a combustible sólido" Preguntas del material coheteril 196 N°6
8. **Mishnov A.A. Pania S.D. Rumiantzev B.V.** "Procesos de trabajo en los motores cohete de combustible sólido" Moscu Mashenoestroyenie 1989 235 pag.

9. **Raisberg B.A. Erojin B.G. Samsonov K.P.** "Fundamentos de la teoría de los procesos de trabajo en los sistemas coheteriles en base a combustible sólido" Moscu Mashinoestroyenie 1972 386 pág.
10. **Segel R. Straind L.** "Combustión de los combustibles sólidos a bajas presiones" CTC 1965 N° 8
11. **Siplech S.** "Influencia de la rápida reducción de la presión sobre la combustión del combustible sólido" CTC 1961 N° 11
12. **Zeldovich Y.B.** y otros "Impulso de la fuerza de reacción M". "Oborongiz" 1963.
13. **Zeldovich y.B.** "Sobre la velocidad de combustión de la pólvora a presión variable" PMTF. 1964 N°3