

HIGH TEMPERATURES IN AERONAUTICS

PROCEEDINGS OF THE SYMPOSIUM HELD IN TURIN
TO CELEBRATE THE 50th ANNIVERSARY
OF THE "LABORATORIO DI AERONAUTICA"
POLITECNICO DI TORINO
10-12 September 1962

Edited by
CARLO FERRARI

PERGAMON PRESS
OXFORD · LONDON · NEW YORK · PARIS

TAMBURINI EDITORE
MILANO
1964

A. C. ROBOTTI - M. OGGERO

Politecnico di Torino - Scuola di Ingegneria Aerospaziale

ESPERIMENTI DI PROPULSIONE ELETTRICA MEDIANTE MOTORI ELETTROTERMICI

RIASSUNTO. — La nota illustra il lavoro di ricerca nel campo della propulsione elettrica spaziale, in corso presso la Scuola di Ingegneria Aerospaziale del Politecnico di Torino, con mezzi forniti dal Consiglio Nazionale delle Ricerche. Nel quadro di tale ricerca si sono messi a punto svariati tipi di arcogetto a stabilizzazione magnetica, con i quali sono state eseguite prove della durata di più ore, operando con gas azoto e con potenze dell'ordine di 30 kW. Si riportano e si commentano le prestazioni ottenute.

Introduzione.

Tra i vari sistemi di propulsione elettrica attualmente considerati nella tecnica della locomozione spaziale, il motore elettrotermico ad arco, o arcogetto, è certamente quello che per la sua maggior semplicità si presta più facilmente alla indagine sperimentale anche quando questa non dispone di attrezzature di eccezione. Questa considerazione ci ha indirizzato un paio di anni addietro verso la ricerca sperimentale nel campo degli arcogetti; l'iniziativa, a due anni di distanza, trova ampia giustificazione nell'interesse attuale che tali motori presentano e che è confermato, fra l'altro, dal programma NASA il quale prevede di sperimentare arcogetti a bordo di veicoli spaziali del tipo Scout, Agena, Centaur negli anni 1963, 1964, 1965.

Concettualmente, l'arcogetto può essere ritenuto un dispositivo di transizione tra gli endoreattori chimici o nucleari cioè gli endoreattori « termici », e quelli più propriamente definiti « elettrici », nei quali la spinta viene ottenuta accelerando gas ionizzati, mediante campi elettrici o elettromagnetici. Nell'arcogetto l'azione propulsiva è generata dalla espansione adiabatica di un gas propellente previamente riscaldato per azione di un arco elettrico. Sono noti i vantaggi che provengono dall'impiego dell'arco elettrico come sorgente di calore: essi si possono riassumere nella possibilità di raggiungere temperature molto più elevate di quelle

ottenibili mediante le più energiche reazioni chimiche, e nella possibilità di scegliere senza limitazioni il fluido operante.

Gli impulsi specifici ottenibili in pratica con gli arcogetti sono dell'ordine di 900-1800 sec.; al superamento del maggiore di questi valori si oppongono limitazioni insite essenzialmente nel calo del rendimento cinetico/elettrico al crescere dell'impulso specifico, come conseguenza dell'aumento delle perdite di calore dalle pareti della camera per effetto della refrigerazione; senza menzionare le limitazioni più ovvie imposte dalla resistenza dei materiali alla temperatura.

Le prestazioni dell'arcogetto.

Poichè nell'arcogetto l'energia propulsiva è ottenuta termodinamicamente, la velocità ideale massima ottenibile per i gas di scarico, supponendo una espansione adiabatica con rapporto ∞ , è fornita dalla relazione:

$$v = \sqrt{2h}$$

dove v è la velocità ideale del getto

h è l'entalpia del gas

e conseguentemente l'impulso specifico massimo ideale risulta:

$$\mathcal{J}_{s\text{id}} = \frac{\sqrt{2h}}{g}$$

L'entalpia h del gas è data dalla somma dell'entalpia iniziale del fluido agente e dell'entalpia fornita dall'energia elettrica; poichè la prima parte è decisamente trascurabile rispetto alla seconda, si può considerare come entalpia del gas la quantità di calore emessa dall'arco. Nel caso di un motore ideale si potrebbe perciò affermare che l'impulso specifico è funzione soltanto della potenza elettrica specifica fornita; in realtà ciò non si verifica, essenzialmente per due motivi. In primo luogo soltanto una parte dell'energia consumata nell'arco viene trasmessa al fluido, in quanto, come è noto, si ha sempre una caduta di tensione sulla superficie degli elettrodi e di conseguenza una certa potenza viene ad essere dispersa per riscaldamento ohmico del metallo. Una seconda perdita, che assume pure valori considerevoli, è rappresentata dalle dispersioni termiche alle pareti, le quali per necessità tecnologiche devono essere tenute sufficientemente fredde o con circolazione di refrigerante o con radiazione di calore; queste dispersioni sono tanto più importanti quanto più elevata è la temperatura in camera.

In base a queste considerazioni si può pertanto definire un rendimento dello scambio termico dell'arcogetto secondo la relazione:

$$\eta_s = \frac{\text{energia termica del fluido}}{\text{energia totale}} = \frac{\text{energia totale} - \text{energia dispersa}}{\text{energia totale}}$$

Il rendimento η_s è facilmente calcolabile, potendosi determinare con opportune misure calorimetriche la quantità di calore dispersa.

Non tutta l'energia termica del fluido si trasforma poi in energia cinetica del getto: una certa aliquota viene infatti assorbita dalla dissociazione e dalla ionizzazione del gas e questo calore viene restituito solo in parte trascurabile durante l'espansione, in quanto la velocità di attraversamento dell'ugello è in genere superiore a quella delle reazioni di ricombinazione. Le perdite relative sono generalmente limitate nel caso di basse temperature in camera, ma crescono rapidamente con le temperature stesse.

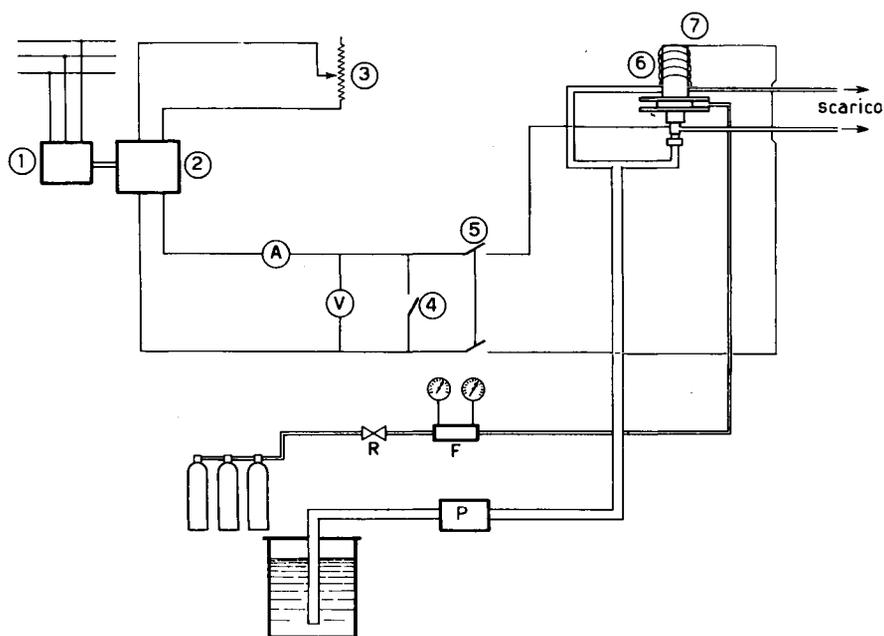


Fig. 1.

1: motore; 2: metadinamo; 3: reostato di eccitazione; 4: interruttore di sicurezza e comando; 5: sezionatore; 6: solenoide; 7: arcogetto; A: amperometro; V: voltmetro; P: pompa acqua di refrigerazione; R: riduttore di pressione; F: flussometro.

Esistono poi altre cause di perdite: prima fra tutte quella di dover necessariamente limitare l'espansione ad un valore finito, e poi quelle dovute alla non perfetta assialità ed omogeneità del getto; in totale si può introdurre un rendimento di conversione così concepito:

$$\eta_c = \frac{\text{energia del getto}}{\text{energia termica del fluido}}$$

per cui in definitiva la relazione che lega l'impulso specifico alla potenza elettrica $V \cdot I$ fornita per unità di massa m del fluido è data dalla relazione:

$$\mathcal{I}_{s_{\text{reale}}} = \frac{K}{g} \cdot \sqrt{2 \cdot \eta_s \cdot \eta_c \cdot \frac{V \cdot I}{m}}$$

in cui K è una costante che tiene conto delle unità di misura impiegate.

I rendimenti η_s, η_c sono a loro volta funzione della tensione V e della corrente I , ed inoltre degli altri parametri che non compaiono nella relazione, quali la pressione in camera e la natura del gas, e che sono impliciti nei rendimenti stessi; essi rappresentano pertanto gli elementi fondamentali nello studio e nella messa a punto degli arcogetti.

Dispositivi di prova.

Allo scopo di analizzare questi parametri gli Autori hanno eseguito una serie di esperimenti mediante attrezzature che sommariamente si descrivono.

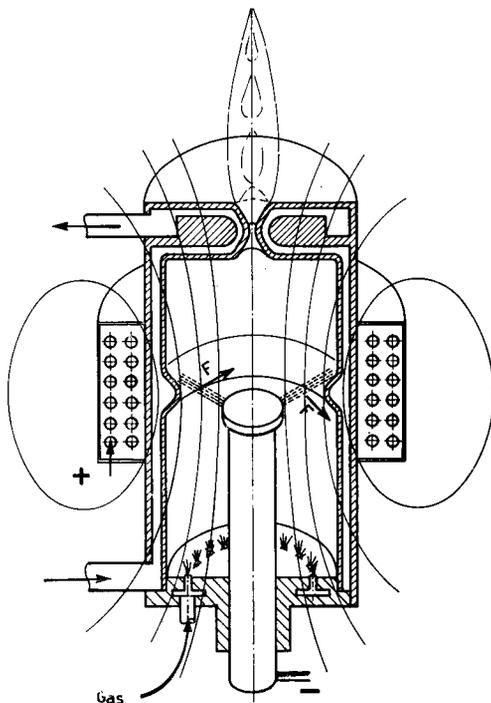


Fig. 2.

Il complesso di prova è rappresentato in fig. 1: esso consta di un generatore di corrente continua, che può essere una dinamo o una metadinamo, per l'alimen-

tazione dell'arcogetto; una batteria di bombole fornisce il gas operante, ed una pompa provvede alla circolazione forzata dell'acqua di refrigerazione.

L'arcogetto impiegato in questa serie di prove è del tipo a stabilizzazione elettromagnetica, cioè ad arco rotante in un campo magnetico assiale, generato dalla stessa corrente di alimentazione: la fig. 2 illustra schematicamente il principio di funzionamento di questo tipo di motore rappresentato dalla fig. 3 durante l'e-

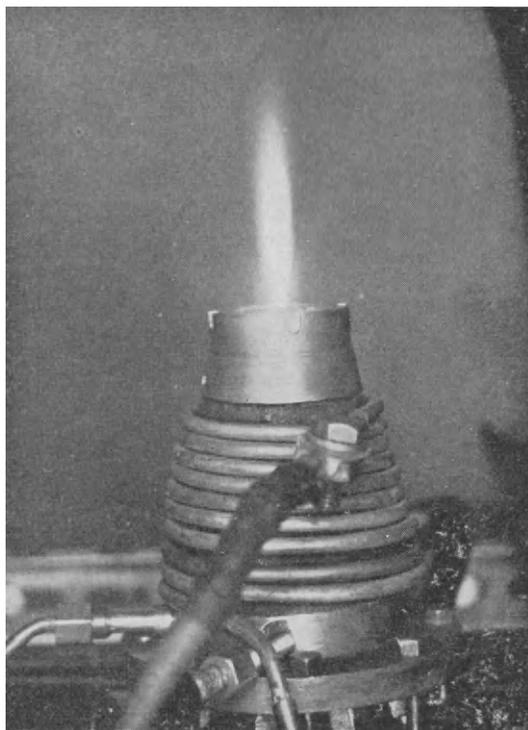


Fig. 3.

sercizio; il motore è montato verticalmente sul banco prova e lo scarico avviene alla pressione ambiente; la pressione in camera varia da 2 a 10 kg/cm². Per la sua messa a punto, si è dovuto però passare attraverso tutta una serie di apparecchiature intermedie, al fine di risolvere i vari problemi che via via si presentavano; così ad esempio, il fenomeno della stabilizzazione magnetica dell'arco è stato studiato con il dispositivo rappresentato in fig. 4 e 5, consistente in un arcogetto privo di ugello, che permetteva l'osservazione della rotazione dell'arco a pressione ambiente ed in presenza di un flusso assiale di gas.

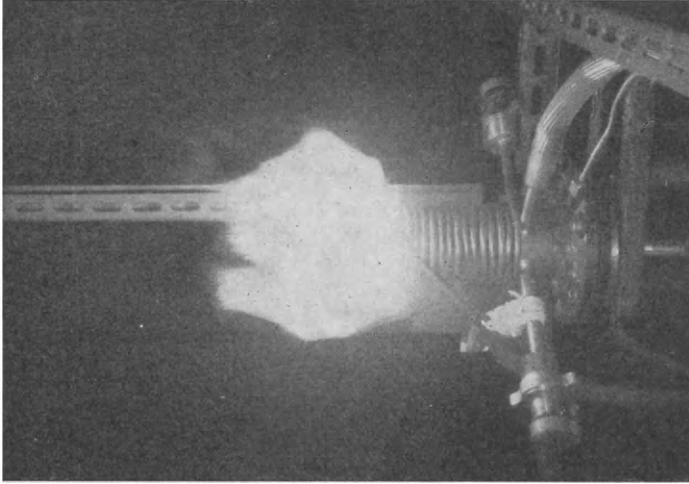


Fig. 5.

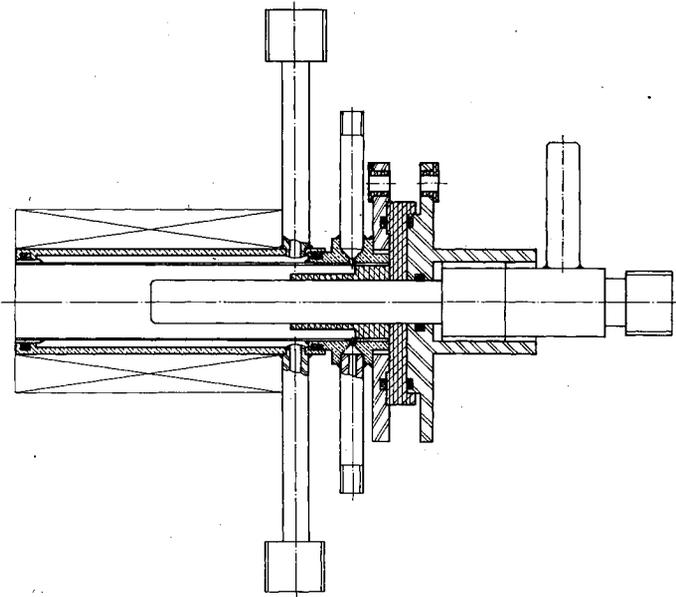


Fig. 4.

Nel corso di queste esperienze sono stati provati vari tipi di elettrodo centrale, alcuni in rame altri in tungsteno (vedi fig. 6), tutti refrigerati con circolazione forzata d'acqua: i migliori risultati sono stati ottenuti con il tungsteno per il quale si è riscontrato un consumo medio di 2 mm all'ora, con correnti di 200 Ampère. Il fluido operante impiegato nelle prove è stato l'azoto, essenzialmente in base a due considerazioni: il costo molto elevato dei gas rari (in particolare dell'elio) e la relativa pericolosità dell'idrogeno, specie se si opera in ambienti chiusi. Poichè le prove condotte si sono svolte con durate complessive di diverse ore si è ritenuto

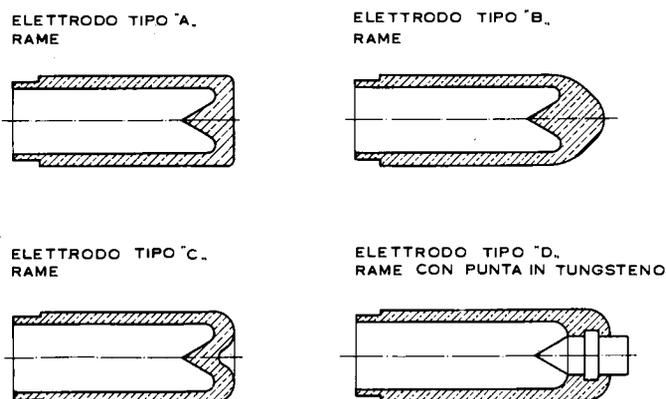


Fig. 6.

opportuno, per una serie di indagini comparative ed orientative, operare con un gas che associa all'inerzia chimica sugli elettrodi il notevole vantaggio della non pericolosità e del basso costo di approvvigionamento.

L'innesco degli arcogetti può essere ottenuto in vari modi: nel caso presente si provvedeva a chiudere in cortocircuito gli elettrodi prima della prova mediante un fusibile, che, alla chiusura del circuito, vaporizzando innescava la colonna dell'arco. Questo metodo di innesco, molto più comodo di altri dispositivi, presenta però l'inconveniente di richiedere l'avviamento del plasmagetto con portata nulla di fluido operante, ciò che rende particolarmente critica la fase iniziale, essendo le condizioni di funzionamento molto lontane da quelle di regime.

Da questa considerazione deriva l'opportunità di impiegare la stabilizzazione magnetica dell'arco, al posto di quella a vortice che nella fase iniziale non potrebbe attuarsi e la convenienza di usare la metadinamo come generatore, in quanto la corrente fornita per una certa eccitazione della macchina risulta indipendente dalla tensione ai morsetti, ed uguale a quella di cortocircuito; mentre nel caso della dinamo una riduzione di tensione produce sempre un aumento di corrente.

Misure calorimetriche.

Allo scopo di determinare il valore del rendimento η_s , cioè l'entità dell'energia che effettivamente viene somministrata al fluido operante, sono state eseguite misure calorimetriche sui dispositivi in prova, al variare delle condizioni di esercizio. A prima vista il modo più preciso per eseguire queste misure nelle condizioni di funzionamento a regime parrebbe quello di registrare le temperature di ingresso e d'uscita dell'acqua di refrigerazione, e misurare contemporaneamente la portata: nella realtà operativa questo sistema presentava una notevole imprecisione, a causa del piccolissimo salto di temperatura da rilevare, dovuto alla forte portata d'acqua (1,8 litri al secondo, in totale) del circuito refrigerante. (Va detto per inciso che, essendo le ricerche in corso ancora in fase di sviluppo, si è preferito abbondare nella refrigerazione per evitare il pericolo di fusioni che si erano verificate nei primi tempi).

In questa situazione si è preferito eseguire una misura globale del calore sottratto dall'acqua di refrigerazione, raccogliendolo in un'unica quantità d'acqua fatta ricircolare ripetutamente nel motore per un tempo noto.

In pratica, in un serbatoio d'acqua di capacità nota vengono introdotti sia il tubo di mandata della pompa che quelli di ritorno: si misurano accuratamente le temperature prima dell'inizio della prova e al termine della stessa, determinando così il calore introdotto. Questo sistema presenta ovviamente delle imprecisioni, che però possono essere ridotte al minimo pur di adottare opportuni accorgimenti nell'eseguire le misurazioni, studiando accuratamente tutti i parametri che possono influenzarla.

Misura delle spinte.

Per conoscere il rendimento η_c del plasmagetto è necessario poter determinare l'impulso specifico effettivo attraverso la misura diretta della spinta; misura che per altro risulta particolarmente difficile in quanto la sua grandezza è dello stesso ordine di altre spinte parassite, dovute ai tubi di refrigerazione che non possono mai essere perfettamente equilibrati. Si è provveduto pertanto alla misura della spinta arrestando il getto di gas uscente dall'ugello contro una piastra di grafite portata da un elemento sensibile su cui sono incollate delle strisce estensimetriche (vedi fig. 7).

Dalla misura della variazione della quantità di moto del gas è possibile risalire al valore effettivo della spinta, tramite opportune correzioni per tener conto della forma della piastra e della sua distanza dall'ugello. Una taratura preliminare fornisce i vari coefficienti di correzione, ed una prova ad arco spento, eseguita alla fine di ogni esperienza, impiegando gas freddo di cui si conosce temperatura e pressione in camera, permette di controllare l'esattezza della taratura.

Risultati sperimentali

Il primo ciclo di esperienze orientative, come è stato detto, è stato dedicato allo studio dell'arco in un campo magnetico assiale, ed in presenza di un flusso di gas, onde poter trarre informazioni utili allo sviluppo delle ricerche propulsive vere e proprie.

In questo senso si è studiato particolarmente l'effetto stabilizzante del campo magnetico al variare della sua intensità, ed i relativi effetti sul comportamento dei diversi tipi di elettrodo. La velocità di rotazione dell'arco, osservata a pressione ambiente, è molto elevata e praticamente si vede solo un anello di plasma: la

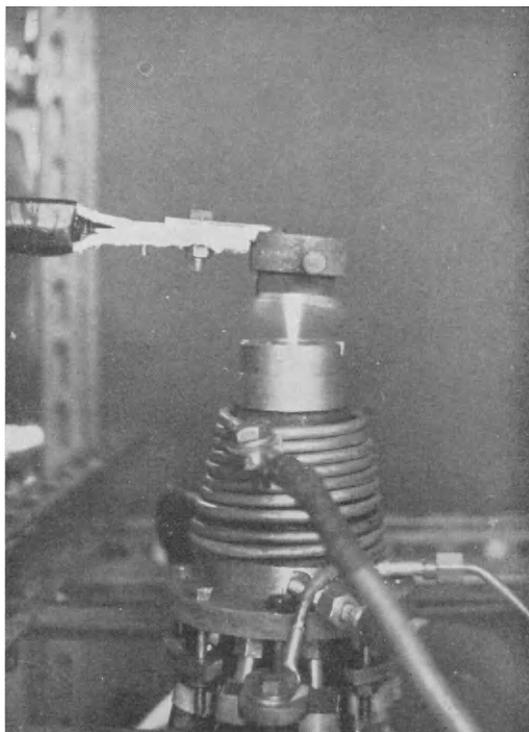


Fig. 7.

base anodica dell'arco è in effetti costituita da una corona di punti luminosi, che si accendono e spengono continuamente, dando la sensazione visiva di essere soffiati lateralmente nel senso voluto dalle leggi dell'elettromagnetismo. È possibile trovare la conferma di questo moto nelle tracce che si osservano a motore spento sulle pareti della camera.

La macchia catodica invece è sempre ben definita e si comporta in modo del

tutto diverso a seconda se l'elettrodo centrale è in rame o in tungsteno. Nel caso del rame infatti essa si sposta con moti irregolari, specie se la portata di gas è elevata, sulla circonferenza esterna dell'elettrodo, mentre nel caso del tungsteno

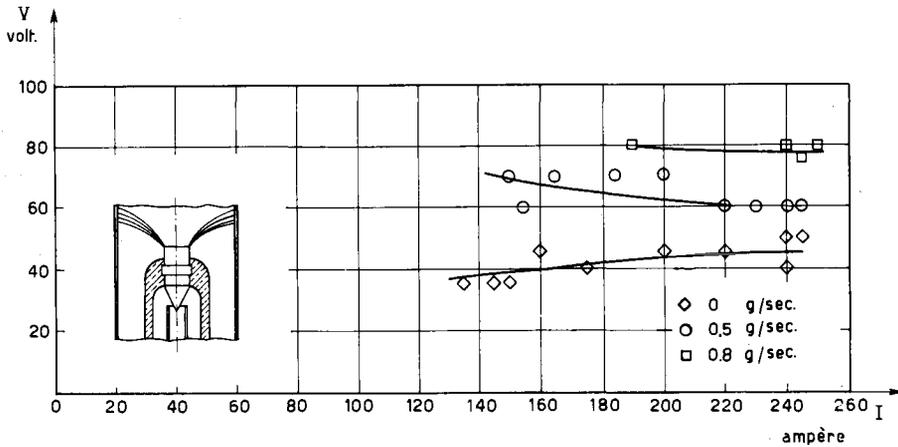


Fig. 8.

rimane perfettamente fissa al centro qualunque sia il disturbo provocato dal flusso di gas. Elettricamente, l'arco con catodo in rame è leggermente più irregolare di quello con catodo di tungsteno.

Gli studi ora descritti hanno permesso in primo luogo di disegnare corretta-

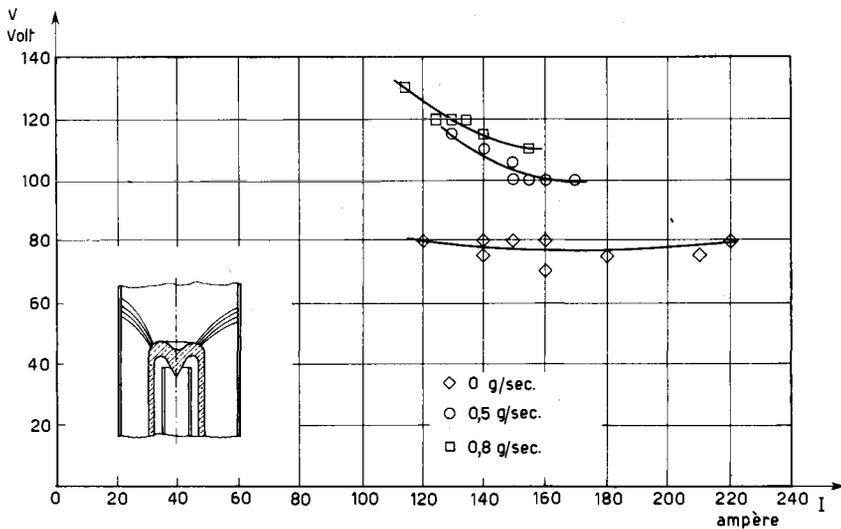


Fig. 9.

mente gli elettrodi successivamente impiegati, ed inoltre hanno fornito un chiaro panorama del fenomeno della stabilizzazione magnetica in tutto il suo complesso: le figure 8 e 9 raccolgono una parte dei risultati ottenuti in questa prima fase della ricerca.

Da queste esperienze si sono poi sviluppati tre tipi di arcogetto a stabilizzazione elettromagnetica, differenti tra loro essenzialmente per la geometria della camera d'arco, che dopo una accurata messa a punto, hanno permesso di svolgere gli studi sui parametri caratteristici, η_s e η_c di questi propulsori. Tutte le prove, come è stato detto, sono state condotte con gas azoto; alcuni tentativi con l'aria avevano infatti provocato la rapida ossidazione degli elettrodi e della camera con conseguente produzione di scorie che, otturando parzialmente l'ugello, provocavano un funzionamento irregolare.

Il campo delle potenze esplorate varia da 15 a 35 kW, con pressioni in camera da 2 a 10 Kg/cm²; in questo ambito sono state eseguite le misure calorimetriche e le misure di spinta al fine di ottenere i valori del rendimento.

Per poter avere dei risultati confrontabili, pur lavorando a pressioni in camera molto diverse, e quindi con rapporti di espansione molto variabili in quanto il motore scaricava sempre nell'atmosfera, si sono fatti sempre i calcoli dell'impulso specifico riportandoli ad un rapporto di espansione infinito. In questo modo il rendimento η_c risulta naturalmente maggiore di quello realmente ottenibile.

A titolo di esempio si trascrivono i valori sperimentali di una prova eseguita con una pressione in camera di 6 Kg/cm²:

potenza: 29 kW

rendimento scambio termico: η_s 33%

entalpia del gas: 11.000 Joule/g

impulso specifico reale: I_s 423 sec

rendimento di conversione η_c : 78%

rendimento globale η_o : 25,7%.

I risultati sopra indicati rispecchiano in linea di massima i valori ottenuti anche nelle altre condizioni di esperienza e presentati nella tabella I: i rendimenti infatti risultano relativamente poco influenzati, entro il campo finora esplorato, dalle condizioni di esercizio, e allo stato attuale delle nostre ricerche non è ancora possibile fare delle previsioni precise sul loro andamento al variare della pressione in camera; si è potuto soltanto riscontrare un leggero calo del rendimento, prevedibile, con il crescere dell'entalpia del gas.

Il rendimento globale medio del 27% è certamente piuttosto basso rispetto ai valori che si riscontrano nella letteratura sugli arcogetti: il motivo di ciò va forse ricercato nella esuberanza di refrigerazione che si è usata nelle presenti prove al fine di ottenere un consumo degli elettrodi più ridotto possibile. Questo risul-

tato è stato ottenuto con evidente scapito delle altre prestazioni; è prevista una rielaborazione dei disegni attuali al fine di limitare la circolazione del refrigerante al valore minimo sufficiente.

TABELLA I. — Valori medi dei risultati sperimentali ottenuti nelle presenti prove.

Dispositivo in prova	Pressione in camera p_c kg/cm ²	Potenza W kW	Entalpia h Joule/g	$I_{s\infty}$ sec.	η_p %
Tipo 1	3	23	11.400	420	26,1
	4	25	8.010	358	27,5
	5	25	8.410	383	28,0
Tipo 2	3	23	13.800	450	24,6
	4	24	11.200	421	26,75
	5	27	9.130	375	27,2
	6	30	11.050	430	28,2
Tipo 3	3	16	8.990	380	27,9
	3	23	8.280	345	26,8
	5	25	8.306	350	27,4
	6	26	9.990	401	26,3
	7	32	10.600	392	25,9

Studio del coefficiente di portata

Un parametro molto impiegato nello studio degli endoreattori chimici è il coefficiente di portata C_D così definito:

$$C_D = \frac{\dot{m}}{p_c A_t}$$

ove:

p_c è la pressione in camera

A_t è la sezione ristretta dell'ugello

\dot{m} è la portata del fluido.

Poichè la portata attraverso l'ugello, a parità di geometria e di pressione, è funzione della natura del gas e della sua temperatura, si può anche scrivere:

$$C_D \equiv \frac{1}{\sqrt{R T_c}}$$

Nei propulsori chimici il coefficiente C_D è funzione unicamente della natura della reazione chimica ;nel caso degli arcogetti invece esso dipenderà dalla entalpia

trasmessa al gas, cioè in definitiva dalla potenza elettrica specifica fornita e dal rendimento η_s .

Poichè la determinazione del coefficiente C_D è indipendente dalle altre misure, calorimetriche e di spinta, impiegate per il calcolo dei rendimenti η_c ed η_s , concettualmente sarebbe possibile ottenere una verifica sperimentale dei calcoli eseguiti: in realtà questo controllo è estremamente complesso a causa della dissociazione e

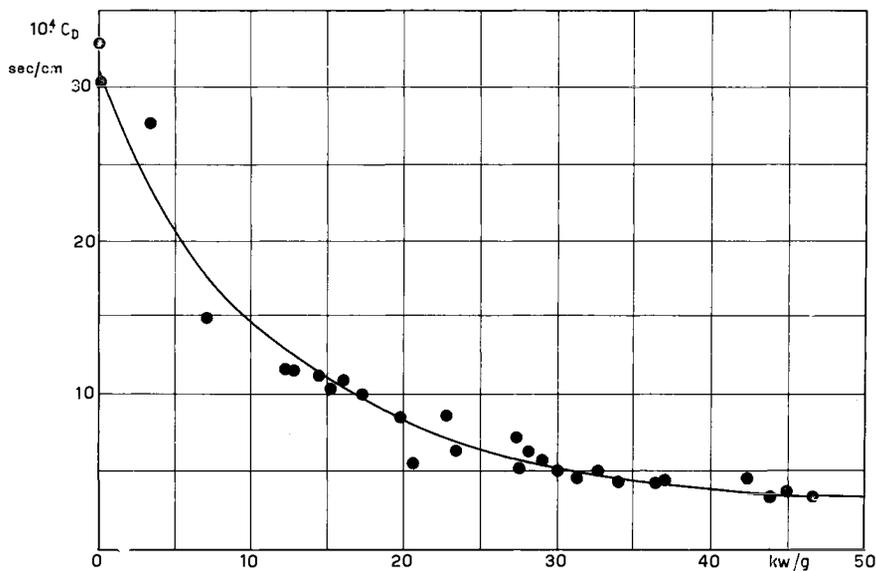


Fig. 10.

ionizzazione del gas in camera. Si è ritenuto comunque opportuno, nelle indagini in corso, di considerare anche questo parametro sperimentale, al fine di disporre di ulteriori elementi di confronto con i propulsori chimici.

I risultati sono raccolti nel grafico di fig. 10; da esso si può rilevare che i punti sperimentali, pur riferendosi a prove con diverse pressioni in camera e con dispositivi di differenti configurazioni, risultano raccolti intorno ad un'unica curva con andamento iperbolico. Ciò d'altra parte era prevedibile in quanto, come risulta dalla tabella I, i rendimenti dei diversi tipi di arcogetto sperimentati sono sensibilmente uguali.

Comportamento elettrico dell'arcogetto

Da un punto di vista elettrico il comportamento degli arcogetti studiati è risultato perfettamente corrispondente alle previsioni. La stabilizzazione elettromagnetica è sempre stata efficiente, e le analisi fatte sugli elettrodi e sulle camere alla fine di ogni ciclo di esperienze hanno confermato un comportamento dell'arco

analogo a quello constatato nel dispositivo senza ugello. La tensione d'arco cresce con la pressione in camera ma la caratteristica tensione-corrente presenta un andamento analogo a quello delle prove in aria libera,

Il funzionamento degli arcogetti è risultato stabile in un campo di rapporti potenza elettrica/portata molto ampio: esiste tuttavia una limitazione, ovvia, ai valori più bassi di questo rapporto, per i quali il funzionamento diventa irregolare e l'arco tende a rompersi. Nessun inconveniente si è invece verificato in alcune prove con portata nulla, se si eccettua un maggior consumo dell'elettrodo centrale.

Nel corso di questi studi sono state eseguite prove con durate superiori a 30' senza alcun inconveniente, ed alcuni elettrodi hanno funzionato per un totale di 4 ore senza essere rimossi.

Estensione dei risultati

I valori dell'impulso specifico ottenuti con gli arcogetti in questione impieganti azoto come propellente sono già nettamente superiori a quelli dei propellenti chimici; è evidente però che per un impiego spaziale sarebbe molto più conveniente usare dei gas più leggeri quali l'idrogeno o l'elio: ora, se si ammette che la quantità

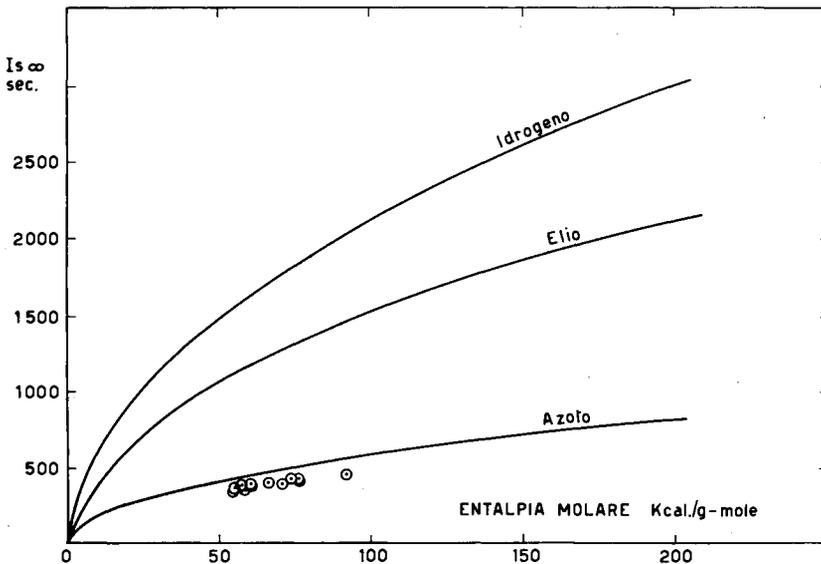


Fig. 11.

di calore trasmessa dall'arco al fluido operante sia solo una funzione della geometria della camera e delle caratteristiche dell'arco stesso ed indipendente dalla natura del fluido, passando da un gas all'altro si dovrebbe far riferimento alla stessa en-

talpia molare. In questo caso gli impulsi specifici ottenuti nelle presenti prove e riferiti all'idrogeno sarebbero dell'ordine di 1.500-1.800 sec. (vedi fig. 11): certamente però questi valori sono lontani dalla realtà in quanto passando da un gas all'altro cambiano le condizioni in camera, e variano sensibilmente i valori dei rendimenti η_s e η_c . Perciò è prevista la prossima installazione dei dispositivi necessari per le prove con il gas idrogeno, al fine di determinare in condizioni reali le prestazioni limiti delle apparecchiature attualmente in studio.

N.B. Un ringraziamento particolare va rivolto al Prof. S. B. TONIOLO dell'Istituto Elettrotecnico Nazionale « Galileo Ferraris » che ha messo a disposizione il materiale elettrico impiegato nelle presenti ricerche, ed al ricercatore Ing. A. ABETE che ha attivamente collaborato con gli scriventi alla esecuzione delle prove descritte.