

N 00 20 100

NASA-TM-77874

LA RICERCA
SCIENTIFICASerie II, *Rendiconti*, Sez. A
VOL. 2, 1962, N. 1~~N70-73212~~**Ricerche sperimentali sulla propulsione elettrica****Nota II: Studio sperimentale di un plasmagetto****con stabilizzazione a vortice, per impieghi propulsivi**

AURELIO C. ROBOTTI & MARIO OGGERO

Scuola di Ingegneria Aeronautica - Politecnico di Torino

*Lavoro eseguito con il contributo del CNR
Testo ricevuto il 30 giugno 1961***1 - Introduzione.**

Le elevate temperature sviluppabili mediante l'arco elettrico possono essere sfruttate a scopi propulsivi se il calore fornito dalla scarica viene usato per riscaldare un fluido generico che, acquistata energia sotto forma termica, la trasformi poi in energia cinetica in un ugello di espansione.

L'analogia con l'endoreattore a propellenti chimici è evidente; varia solo la sorgente dell'energia che nell'endoreattore elettrico è fornita sotto forma di corrente elettrica, mentre nell'endoreattore chimico è contenuta nell'interno dei propellenti stessi sotto forma di energia chimica. Tuttavia, mentre per le reazioni chimiche esiste un limite abbastanza basso al valore massimo della temperatura raggiungibile (uno dei valori più alti è quello che si ottiene con la reazione $(CN)_2 + O_2 = 2CO$

+ N_2 , $T_c = 4860$ °K), nel caso del plasmagetto ad arco (arcoplasma getto), il limite massimo di temperatura è imposto unicamente da motivi tecnologici e di rendimento globale, dal fatto che aumentando la temperatura del gas aumenta la dispersione del calore alle pareti. Questo significa che, servendosi di opportuni accorgimenti magneto-meccanici, che permettono di allontanare il plasma dalle pareti, e usando materiali adatti, è possibile - a parità di ogni altra condizione - ottenere temperature e conseguentemente impulsi specifici molto più elevati.

Bisogna poi aggiungere che, trattandosi di un riscaldamento per mezzo di calore fornito dall'esterno, non vi sono limitazioni nell'impiego del fluido di lavoro il quale pertanto può essere scelto in modo da soddisfare particolari esigenze come quella di non assorbire calore per la dissociazione, (gas nobili) o di presentare

basso peso molecolare e alto calore specifico (idrogeno).

Come per il razzo chimico, anche nel plasmagetto ad arco occorre tenere conto dei fenomeni endotermici di dissociazione e di ionizzazione dato che entrambi diventano sensibili alle altissime temperature: però la possibilità di scegliere opportunamente i gas riduce le perdite conseguenti a valori ben definiti.

Il problema che si presenta per primo in un plasmagetto a funzionamento continuo è la generazione di un arco stabile attraverso il quale possa passare il fluido operante: in una nota precedente ⁽¹⁾ si sono descritte le esperienze eseguite su un generatore di plasma ad arco stabilizzato mediante un campo magnetico; in questa relazione si discutono invece le prove eseguite con un generatore ad arco stabilizzato con vortice d'aria.

Mentre nel caso dell'arco stabilizzato a campo magnetico si sfruttano le proprietà elettriche del plasma, nel caso della stabilizzazione a vortice si sfruttano le proprietà fisiche, in particolare l'alta temperatura e conseguentemente la bassa densità della colonna d'arco, con il criterio di creare un campo di forze meccaniche tali da mantenerla stabilmente in una posizione ben definita.

2 - Stabilizzazione dell'arco con un vortice assiale.

Consideriamo il caso ipotetico di un fluido perfetto che entri tangenzialmente in una camera cilindrica e si scarichi attraverso una apertura centrale.

Per il principio della conservazione del momento della quantità di moto si avrà:

$$\rho V r = \text{cost}$$

ove ρ = la densità del fluido;

v = la velocità;

r = il raggio generico;

ma $v = \omega r$ quindi

$$\rho \omega r^2 = \text{cost}$$

$$\text{cioè } \omega = \frac{A}{\rho r^2} \quad \text{con } A = \text{cost.}$$

Se si trascura il campo gravitazionale, l'intensità del campo delle forze centrifughe che agiscono sulle particelle del fluido, vale:

$$H = \frac{F}{m} = \frac{A^2}{\rho^2 r^4} r = \frac{A^2}{\rho^2} \frac{1}{r^3}$$

Poiché nel caso pratico le pressioni in gioco sono piccole si può ritenere il fluido incompressibile e allora si avrà:

$$\frac{A^2}{\rho^2} \simeq \text{cost} = D^2$$

$$H = \frac{D^2}{r^3}$$

Il campo è diretto lungo il raggio, dal centro verso l'esterno e con intensità inversamente proporzionale al cubo del raggio r .

Supponiamo che il fluido in rotazione abbia densità ρ_0 costante e che in esso sia immersa una particella con densità $\rho' \neq \rho_0$.

La forza che agisce sulle particelle per unità di volume vale:

$$F = H (\rho' - \rho_0).$$

Se $\rho' < \rho_0$ la forza avrà direzione opposta al campo quindi sarà una forza centripeta.

In pratica si ha una colonna d'aria in moto rotatorio entro la quale scocca un arco: il salto di temperatura tra la colonna d'arco e l'aria circostante è elevatissi-

⁽¹⁾ A. C. ROBOTTI & M. OGGERO: « Ricerche sulla stabilizzazione dell'arco elettrico mediante campo magnetico, per impieghi astronautici », in *Ric. sci.*, 32 (II-A), 5-13 (1962).

mo, quindi la densità della colonna d'arco sarà notevolmente più bassa di quella della colonna d'aria. In base a quanto visto sopra, su quest'ultima agiranno delle forze centripete tali da trascinarla verso l'asse del vortice.

Se si suppone inoltre che il passaggio di corrente non produca una perturbazione molto forte nel moto rotatorio delle particelle e quindi che si conservi il campo di forze centrifughe generate dalla conservazione del momento della quantità di moto, anche dentro la colonna dell'arco stesso, si avrà un'azione selettiva nel gas nel senso di raccogliere al centro le particelle più calde: la colonna conduttrice risulta perciò molto ben definita.

A questa stabilizzazione di carattere puramente meccanico si aggiungono poi fenomeni secondari dovuti ai campi magnetici creati dalle cariche elettriche costituenti l'arco e rotanti vorticosamente attorno all'asse: in genere però questi fenomeni sono trascurabili, specie per correnti basse.

3 - Descrizione del dispositivo sperimentale.

Al fine di studiare le caratteristiche di funzionamento di un plasmagetto ad arco, stabilizzato con vortice assiale, si è costruita l'apparecchiatura illustrata nelle Fig. 1 e 2.

Il dispositivo consta di un elettrodo centrale in rame con avanzamento assiale.

La corrente è portata all'elettrodo tramite la madre vite di comando che a sua volta è isolata elettricamente e a tenuta di pressione per mezzo di anelli di ebanite.

La scatola esterna è a massa con l'ugello e la camera, che costituiscono l'altra polarità dell'arco. L'ugello e la parte conica della camera sono refrigerati con circolazione forzata di acqua.

L'ingresso dell'aria avviene tangenzialmente nel fondo della camera; il flusso di aria assolve così due compiti: crea il vor-

tice stabilizzatore e raffredda sia pur solo parzialmente il piede dell'elettrodo.

La presa di pressione è pure situata sul fondo della camera. La camera e l'ugello in una prima versione erano in ferro dolce; successivamente l'ugello e la parte terminale del cono sono state fatte in rame.

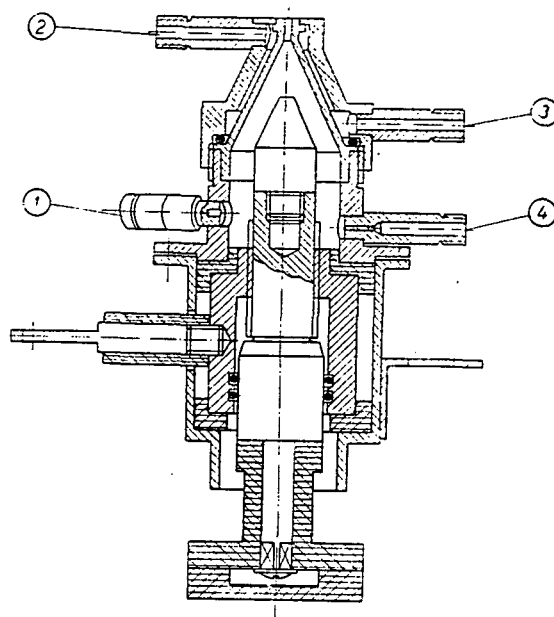


FIG. 1 - Schema del dispositivo di prova.

1 - Alimentazione aria.

2-3 - Entrata e uscita dell'acqua refrigerante.

4 - Presa di pressione.

È stato curato particolarmente l'isolamento dell'elettrodo centrale e il relativo dispositivo di manovra, in modo da permettere una eventuale regolazione della lunghezza anche a motore in funzione.

La lettura della pressione è fatta su un manometro collegato alla camera mediante un tubo di rame refrigerato.

Il motore è montato verticalmente con lo scarico in alto, su un banco prova che può essere reso oscillante e permettere quindi misure di spinte.

In tutte le prove eseguite, il fluido propellente era costituito da aria compressa (è però prevista l'alimentazione con altri

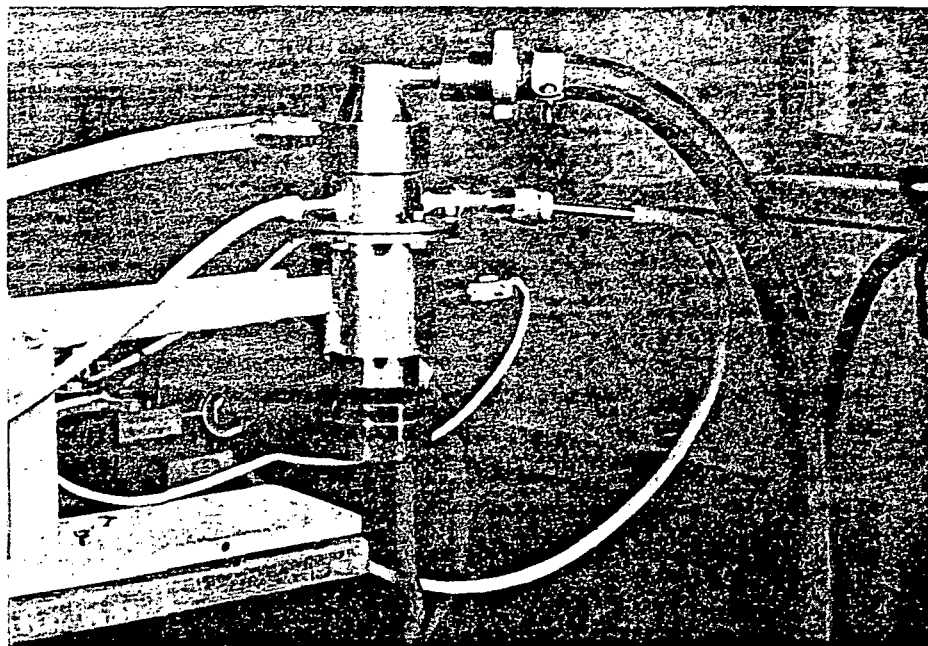


FIG. 2 - Dispositivo sperimentale.

tipi di gas, in particolare con l'elio e l'idrogeno).

La portata viene misurata attraverso un flussometro a foro calibrato, tarato in precedenza.

Nella prima serie di esperienze si è mantenuta costante la geometria del sistema, assumendo come variabili la portata e la corrente: le caratteristiche geometriche del dispositivo sono:

diametro dell'ugello: 3 mm;

diametro dell'elettrodo centrale, in corrispondenza della estremità: 18 mm;

distanza tra l'estremità dell'ugello e l'elettrodo centrale: 30 mm.

4 - Procedimento di prova.

Il complesso sperimentale è lo stesso usato nelle prove oggetto di precedenti comunicazioni ⁽¹⁾: unica variante il siste-

⁽¹⁾ A. C. ROBOTTI & M. OGGERO: « Ricerche sull'arco elettrico come generatore di plasma », in *Ric. sci.*, 31 (II-A), 257-264 (1961); « Ricerche sulla stabilizzazione dell'arco elettrico mediante campo magnetico, per impieghi astronautici », in *Ric. sci.*, 31 (II-A), 5-13 (1962).

ma d'innesco dell'arco; date le dimensioni ridotte dell'ugello l'introduzione di barrette metalliche per provocare il corto circuito presentava il pericolo di otturazione dell'ugello stesso a causa di saldature localizzate; d'altra parte l'uso di fusibili non era pratico, specie in vista della possibilità di ripetere le esperienze a breve distanza di tempo e perciò si è impiegato un filo di grafite che veniva introdotto a circuito aperto tra i due elettrodi, entro l'ugello. Alla chiusura del circuito la corrente produce una combustione parziale del filo il quale per effetto dei campi elettrici e della leggera sovrappressione che si crea in camera, viene espulso innescando l'arco.

Innescato l'arco si provvedeva ad inviare l'aria a pressione crescente fino a ottenere la portata voluta.

L'ugello refrigerato consentiva prove di durata praticamente illimitata, ma l'elettrodo centrale si riscaldava piuttosto rapidamente, per cui la durata delle prove, specie con correnti elevate, doveva essere limitata a tempi abbastanza brevi (10 s circa).

5 - Analisi del fenomeno.

Premesso che nel caso di un plasmagetto ad arco con stabilizzazione meccanica i fenomeni termodinamici hanno di gran lunga la prevalenza su quelli elettromagnetici, si può studiare la prestazione di questo motore con i metodi classici usati per gli endoreattori a propellenti chimici.

Nel plasmagetto il riscaldamento del fluido avviene per effetto di corrente elettrica e quindi non ha senso parlare di bontà della combustione: tuttavia l'energia termica viene fornita prevalentemente nella colonna d'arco in una zona ben delimitata e quindi si possono avere notevoli disuniformità di temperatura nella camera, pur ammettendo la perfetta stabilità della colonna d'arco. In particolare questa potrà avere dimensioni più o meno grandi, in relazione alla corrente e alla pressione in camera; nel caso che la sezione dell'arco sia piccola, dell'ordine del diametro dell'ugello (come avviene in pratica) il getto che fuoriesce risulterà certamente non uni-

forme (in base a quanto visto in precedenza, per cui le particelle più calde tendono a portarsi al centro) e ciò dà origine a una portata di gas, che a parità di pressione in camera, è di gran lunga superiore a quella che si avrebbe se tutto il fluido fosse stato riscaldato uniformemente.

Si potrà perciò parlare di bontà di miscelamento, cosa che indicherà a parità di portata e di energia fornita, la maggiore o minore omogeneità del getto.

La portata in peso del fluido uscente dall'ugello può essere definita in funzione delle condizioni in camera, con due relazioni diverse, a seconda se si è in condizioni subcritiche o ipercritiche, cioè a seconda se il rapporto di espansione è maggiore o minore di quello corrispondente alla velocità del suono. Nel caso di regime subcritico, che è quello che interessa nelle prove qui riferite, in cui la pressione in camera non ha mai superato gli 0,8 kg/cm² di sovrappressione, si può scrivere:

$$q = \mu A_t P_c \sqrt{\frac{2g}{R T_c} \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{P_c}{P_e} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_c}{P_e} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}$$

in cui:

q = la portata;

μ = un coefficiente adimensionale di efflusso;

A_t = la sezione dell'ugello;

k = il rapporto dei calori specifici;

$(P_c - P_e)$ = il salto di pressione tra camera e atmosfera;

R = la costante dei gas;

g = la gravità;

T_c = la temperatura in camera;

quindi:

$$\frac{q}{A_t P_c \sqrt{\left(\frac{P_c}{P_e} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_c}{P_e} \right)^{\frac{k+1}{k}}}} = \mu \sqrt{\frac{2g}{R T_c} \frac{k}{k-1}} = C'_D$$

L'espressione di C'_D non è che l'estensione al regime subcritico, pur con ordine di grandezza diverso, della formula in uso nei getti supersonici dove si ha:

$$C_D = \frac{q}{P_c A_t}$$

in cui non compare ovviamente il rapporto $\frac{P_e}{P_c}$ trattandosi di regime supercritico.

Il parametro C'_D è funzione unicamente della temperatura in camera e del coefficiente di attrito che per un dato ugello, con piccole variazioni di velocità, può essere ritenuto costante. La temperatura T_c in camera sarà a sua volta funzione della portata q e della potenza assorbita W in base alla relazione:

$$q C_p (T_c - T_0) = \eta W$$

in cui η è il rendimento dello scambio termico.

Un basso valore di C'_D a parità di portata e di potenza assorbita, indica perciò una temperatura in camera più elevata e quindi un rendimento migliore.

6 - Risultati sperimentali.

Allo scopo di compiere una prima analisi orientativa su cui basare ricerche successive, è stato eseguito un primo gruppo di esperimenti; per rendere più rapide le prove in questa prima fase si sono limitate le misure alle grandezze strettamente necessarie per un primo giudizio, e cioè: tensione d'arco, corrente e pressione in camera.

Come osservazione generale si è notato che il plasmagetto ad arco con vortice stabilizzatore presenta due regimi ben diversi di funzionamento. Il primo, è caratterizzato da un funzionamento irregolare con rumore fruscante, bassa caduta di tensione e fasci di scintille che fuoriescono

dall'ugello (Fig. 3), mentre la pressione in camera è nulla. Il secondo che si potrebbe dire il regime stabile, si presenta con il getto regolare e costante, senza scintille esterne, fortemente luminoso al centro; la tensione d'arco cresce notevolmente e cresce pure la pressione in camera (Fig. 4).

In pratica nella fase transitoria di av-

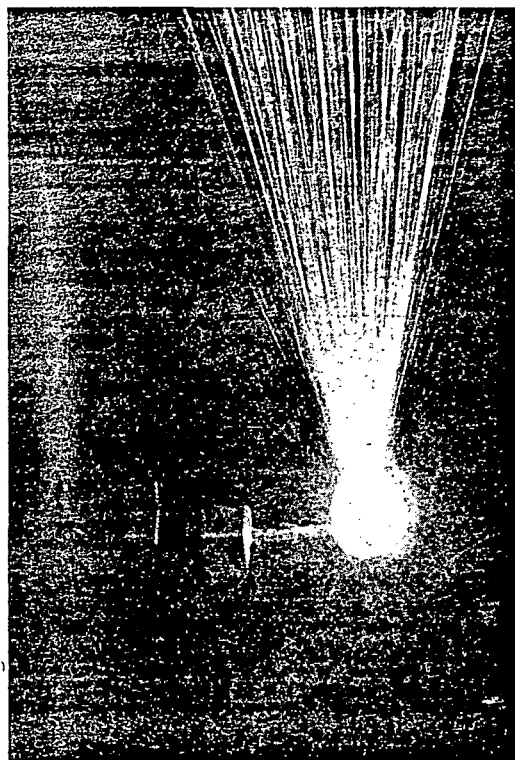


FIG. 3 - Plasmagetto ad arco in funzionamento instabile.

viamento si ha sempre il regime instabile con fruscio crescente con la portata, finché di colpo, senza alcuna fase intermedia si ha il passaggio al regime stabile che è caratterizzato da un fischio acuto e regolare.

I due regimi corrispondono ai due modi di funzionare dell'arco, senza stabilizzazione rotatoria e con stabilizzazione. Infatti nella fase iniziale, quando la portata è ancora piccola il vortice praticamente non esiste e perciò l'arco scocca sui fianchi; la maggior parte del calore viene assorbita

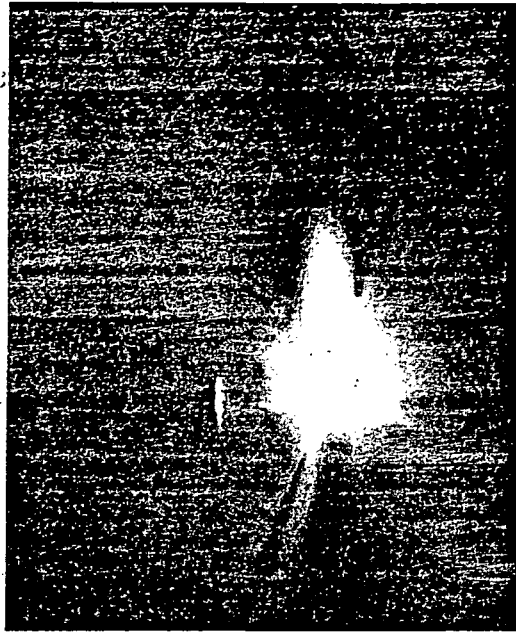


FIG. 4 - Getto di plasma con funzionamento stabile.

dagli elettrodi e quindi il gas non riesce ad andare in pressione. Quando il vortice diventa sufficientemente intenso, l'arco si porta nella zona dell'ugello dove viene a riscaldare tutta la portata d'aria, la quale perciò aumenta di temperatura e quindi di pressione in camera. Una volta che il vortice è creato; esso si mantiene anche per portate molto basse; diverse prove con portate molto piccole sono state fatte appunto con il sistema di stabilizzare prima l'arco con una portata forte, quindi diminuirlo fino al valore voluto.

La stabilizzazione a vortice, oltre a permettere un buon funzionamento del motore, lo protegge notevolmente dalle sollecitazioni termiche in quanto costringe l'arco al centro e lo porta a toccare l'elettrodo superiore nella zona dell'ugello, dove il raffreddamento è più intenso.

Allo scopo di perfezionare il rilievo fotografico, alquanto difficile data la forte luminosità del getto sono state eseguite diverse fotografie usando uno schermo verde (Fig. 5); in tutte queste fotografie, il nucleo centrale del getto, che dovrebbe cor-

rispondere alla parte più calda, è oscuro, ed è contornato da un alone molto più luminoso ai bordi dell'ugello. Questo fenomeno può essere spiegato in diversi modi può darsi che si tratti di una anisotropia del getto dovuta ai campi di forze centrifughe interne; oppure che la luminosità più intensa sui bordi sia data da vapori di rame che si staccano dall'ugello lambito dall'arco; può darsi infine che il filtro della macchina fotografica fosse selettivo per le radiazioni emesse in corrispondenza del nucleo centrale.

7 - Analisi dei risultati.

I dati raccolti in questa prima serie di prove sono volutamente dispersi in quanto si è cercato di ottenere un panorama più ampio possibile del fenomeno.

I risultati più attendibili sono ovviamente quelli corrispondenti alle pressioni e portate più elevate in quanto l'errore assoluto di lettura era praticamente costante.

Alcune prove sono state eseguite man-

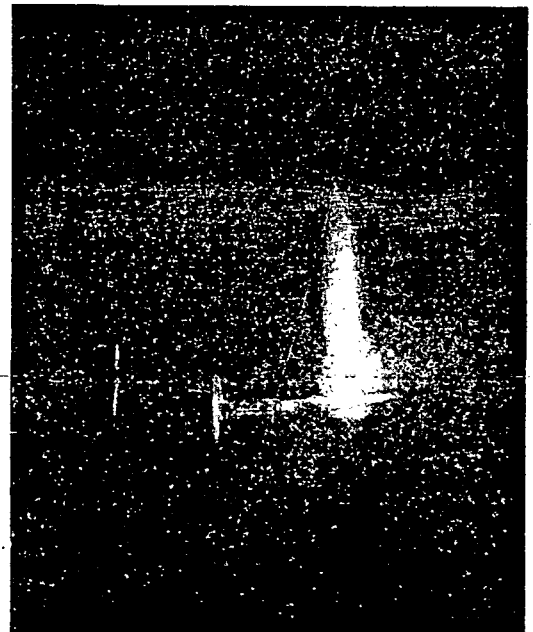


FIG. 5 - Fotografia con filtro verde del funzionamento stabile.

tenendo la portata costante: i valori corrispondenti sono quelli che più facilmente si prestano ad osservazioni generali.

Il diagramma pressioni-potenza a portata costante appare - entro un'ottima approssimazione - rettilineo (Fig. 6).

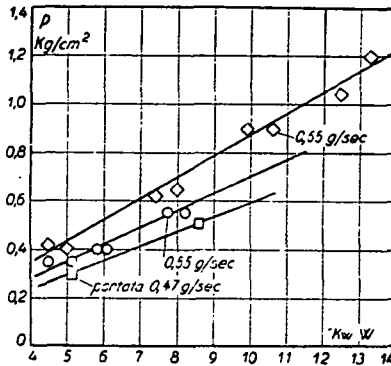


FIG. 6 - Diagramma pressioni-potenza
Portate: □ 0,47 g/s ○ 0,55 g/s
◇ 0,65 g/s.

Poiché la portata rimane costante, e il volume della camera non varia, sarà evidentemente:

$$P_c \equiv \sqrt{T_c}$$

ma

$$T_c \equiv \eta W$$

quindi

$$P_c \equiv \sqrt{\eta W}; \quad \eta \equiv \frac{P_c^2}{W}$$

e poiché sperimentalmente si è visto che

$$\frac{P_c}{W} = \text{cost} \text{ (Fig. 6).}$$

sarà

$$\eta = \text{cost} \cdot P_c$$

cioè il rendimento del dispositivo inteso come scambiatore di calore è proporzionale entro i limiti esplorati, alla potenza in gioco, a parità di portata.

I risultati sperimentali sono raccolti nel diagramma di Fig. 7, avente ordinate C'_D e come ascisse $\frac{W}{q}$.

In corrispondenza del valore medio è stata tracciata la curva teorica ($C'_D = K \cdot \frac{q}{W}$) che è rappresentata da un tratto continuo.

È interessante osservare che i punti sono abbastanza raccolti pur riferendosi a pressioni e a portate molto diverse tra loro: ciò significa che, pur considerando le notevoli semplificazioni introdotte per determinare la legge rappresentata dalla

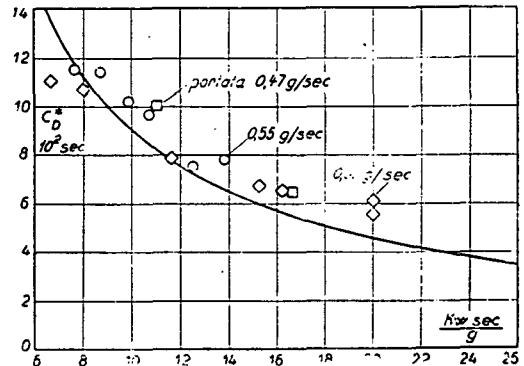


FIG. 7 - Diagramma $C'_D - W/q$
Portate: □ 0,47 g/s ○ 0,55 g/s
◇ 0,65 g/s.

curva, il miscelamento del getto nell'ugello migliora al variare della sezione d'arco.

Un particolare ringraziamento va rivolto al Prof. Ing. S. B. Toniolo, dell'Istituto G. Ferraris, il quale ha messo a disposizione il macchinario elettrico occorrente ed al suo collaboratore, Ing. A. Abete, il quale ha attivamente cooperato con gli scriventi nella esecuzione degli esperimenti descritti in questa sede.

RIASSUNTO

Ricerche sperimentali sulla propulsione elettrica. Nota II: Studio sperimentale di un plasma-getto con stabilizzazione a vortice, per impieghi propulsivi.

Si espongono i risultati di ricerche sperimentali su di un generatore di plasma ad arco stabilizzato con vortice ad aria, per impieghi propulsivi.

Si discute in particolare sul rendimento della trasmissione del calore tra arco e fluido circostante al variare della corrente e della portata.

RÉSUMÉ

Recherches expérimentales sur la propulsion électrique. Note II: Étude expérimentale sur un plasma-jet avec stabilisation à tourbillon pour applications propulsives.

Les auteurs exposent les résultats de recherches expérimentales sur un générateur à plasma avec un arc stabilisé par un tourbillon d'air, pour des emplois propulsifs.

Ils discutent en particulier le rendement de la transmission de chaleur entre l'arc et le fluide environnant, en conséquence de variations du courant et du débit.

SUMMARY

Experimental research on electric propulsion. Note II: Experimental research on a plasma jet with vortex-type stabilization for propulsion.

A report on the results of experimental research on a plasma generator, with an arc stabilized by an air vortex, intended for propulsion.

The authors discuss especially the heat transfer efficiency between arc and fluid environment at a varying current and flow rate.

ZUSAMMENFASSUNG

Experimentelle Untersuchungen betreffend elektrischen Antrieb. II. Mitteilung: Experimentelle Untersuchung eines zu Antriebszwecken bestimmten Plasmastrahls mit wirbelförmiger Stabilisierung.

V. beschreiben die Ergebnisse von experimentellen Untersuchungen an einem Plasmagenerator für Antriebszwecke mit einem durch Luftwirbel stabilisierten Lichtbogen.

Insbesondere wird der Leistungsgrad der Wärmeübertragung zwischen Lichtbogen und umgebendem Fluidum bei Änderung der Strömung und Durchflussmenge erörtert.