

Traduzione dell'articolo "COOL IT!" di Neal Willford tratto dalla rivista Sport Aviation di agosto 2003.

Raffreddamento del motore e riduzione della resistenza.

RAFFREDDIAMOLO BENE!

SOMMARIO

L'articolo tratta il raffreddamento del motore spiegando il meccanismo, un po' complesso, del flusso dell'aria e fornisce alcune indicazioni per la realizzazione dell'impianto e per la valutazione globale in volo.

Negli anni, il raffreddamento del motore e la resistenza che ne deriva hanno generato discussioni tra progettisti e amatori-costruttori. Le linee dei nuovi progetti dei velivoli contrastano con il corretto raffreddamento già durante il loro sviluppo, per cui la risoluzione di questo tema caldo può richiedere tempo e denaro.

La resistenza dovuta al raffreddamento, che va dallo 8 al 45 per cento della resistenza totale del velivolo, dovrebbe richiedere una certa attenzione da parte del progettista, perciò cerchiamo di investigare i differenti aspetti del raffreddamento di un motore raffreddato, per l'appunto, ad aria, la resistenza che ne consegue e i modi per ridurla.omissis.....

Il calore prodotto dal motore

Ogni gallone di combustibile contiene una quantità enorme di energia. Su un RV-6, per esempio, un gallone di benzina vi permette oltre 16 miglia a 200 mph. Ma, questo è solo una piccola parte dell'energia contenuta nella benzina; i motori del velivolo trasformano la maggior parte di questa in calore trasferito nei tubi di scarico, trasmesso attraverso le pareti dei cilindri e nell'olio lubrificante. La fig. 1 mostra, in percentuale della potenza del motore, la quantità di calore irradiato attraverso le pareti dei cilindri del motore. E' compito dell'impianto di raffreddamento portar via questo calore, per prevenire il surriscaldamento dei cilindri.

Il costruttore di velivoli certificati deve dimostrare che il velivolo possiede un raffreddamento adeguato a 41°F, sopra la temperatura standard. Perché 41°F? Perché aggiungendo questo valore a quello standard a livello del mare (59°F), si ottiene una temperatura di 100°F (37.8°C). Questo riferimento di temperatura massima è un utile dato di progetto per un velivolo d'amatore. La salita in questa condizione è solitamente un caso di raffreddamento critico per velivoli con motore senza turbocompressore. I velivoli con turbocompressori, qualche volta, hanno più difficoltà di raffreddamento ad alta quota con temperature sopra la media. Quale che sia la condizione critica, le aree di ingresso e di uscita devono essere dimensionate per consentire il flusso adeguato.

La quantità di calore che i cilindri devono asportare dipende dalle seguenti variabili:

calore rimosso = portata in massa x C_p x salto di temperatura.

La portata è la quantità di aria che fluisce attraverso l'alettatura dei cilindri. Vogliamo tenerla quanto più bassa possibile. Come vedremo più avanti, essa ha un diretto collegamento con la resistenza di raffreddamento. I costruttori dei motori, usualmente, forniscono le informazioni di quanta portata d'aria è necessaria per le condizioni particolari. C_p è il calore specifico del mezzo di raffreddamento e rappresenta la quantità di calore necessaria al mezzo per una variazione di 1°F di temperatura. L'ultimo termine dell'equazione è la variazione di temperatura dell'aria che fluisce attraverso l'alettatura dei cilindri. Maggiore è la sua variazione, maggiore è il calore rimosso. Per i motori raffreddati ad aria la variazione è dell'ordine di 150°F (65.5°C).

Quanta potenza per il raffreddamento

Le differenze tra progettisti e tecnici, nel calcolo della resistenza di raffreddamento, sono una delle ragioni per le quali c'è una grande variabilità nella resistenza attribuita al sistema di raffreddamento motore di un velivolo. Per esempio, negli anni 1930-1940 la NACA, predecessore della NASA, eseguiva ricerche sul raffreddamento del motore e sulla resistenza conseguente. Era focalizzata, principalmente, sui motori radiali, ma documentava anche gli sforzi per pulire l'aerodinamica su diversi velivoli militari di quel periodo. NACA determinò che la resistenza di raffreddamento doveva comprendere la resistenza interna (dovuta alle perdite dentro il vano motore) e a quella esterna (quella dovuta alla presenza della cappottatura sopra una prua ben avviata).

Personalmente, non ho mai condiviso l'idea di includere la forma della cappottatura nella resistenza di raffreddamento, per il fatto che c'è sempre bisogno di una copertura e non avete scelta nel tipo di motore (cilindri in linea o contrapposti), che influenzino la linea della cappottatura. Ciò non significa che non dobbiate cercare di realizzare una forma più aerodinamica possibile per ridurre la resistenza e un modo per ottenerla è servirsi di una prolunga per l'elica. Per il nostro articolo, discuteremo solo della resistenza di raffreddamento, come risulta dal passaggio dell'aria attraverso l'impianto di raffreddamento.

La quantità di aria che attraversa i cilindri del motore dipende dalla pressione all'ingresso e all'interno della cappottatura, e maggiore è la loro differenza, più elevato è il flusso d'aria. Un velivolo in volo è sottoposto a due tipi di pressione. Il primo è la pressione statica, che è uguale a quell'ambiente, quando il velivolo non si muove. E' uguale a 2116 lb/sq.ft. (29.92 in. Hg.) a livello del mare e si riduce con la quota. Il secondo tipo è la pressione dinamica, che dipende dalla densità dell'ambiente e dal quadrato della velocità.

La somma della statica e della dinamica costituisce la pressione totale e se non ci sono perdite, essa rimane costante. Per esempio, quando l'aria fluisce sopra il dorso dell'ala, l'aria accelera (in relazione al velivolo) e la pressione dinamica locale aumenta. Questo significa che la pressione statica deve ridursi affinché il valore totale resti uguale. Questa pressione più bassa è trattata come un'aspirazione dell'ala ed è uno degli ingredienti nella generazione della portanza.

Anche il contrario è vero. Se l'aria rallenta rispetto al velivolo, la pressione locale dinamica si riduce, quella statica aumenta e quella totale rimane costante. Questo è ciò che vogliamo ottenere per l'aria che entra nel vano motore. Vogliamo rallentare quanto più possibile

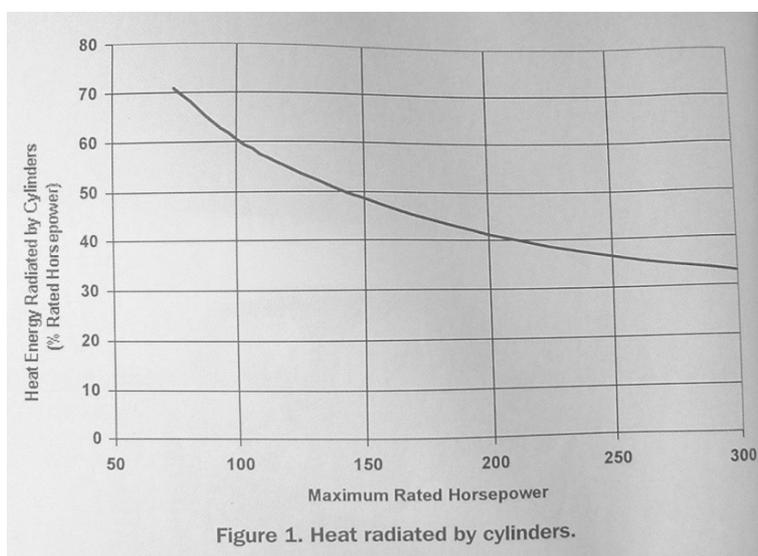
l'aria, perché, muovendosi lentamente nel percorso, riuscirà ad avere una pressione statica superiore. La pressione sarà più alta di quella a valle dei cilindri del motore e, di conseguenza, l'aria scorrerà attorno ai cilindri e asporterà più calore dalle alette dei cilindri. Quest'azione di asportazione provoca una riduzione della pressione totale e quest'ultima è la resistenza di raffreddamento. La potenza richiesta per vincere questa resistenza è data da:

portata in volume di aria x caduta di pressione

potenza di raffreddamento =

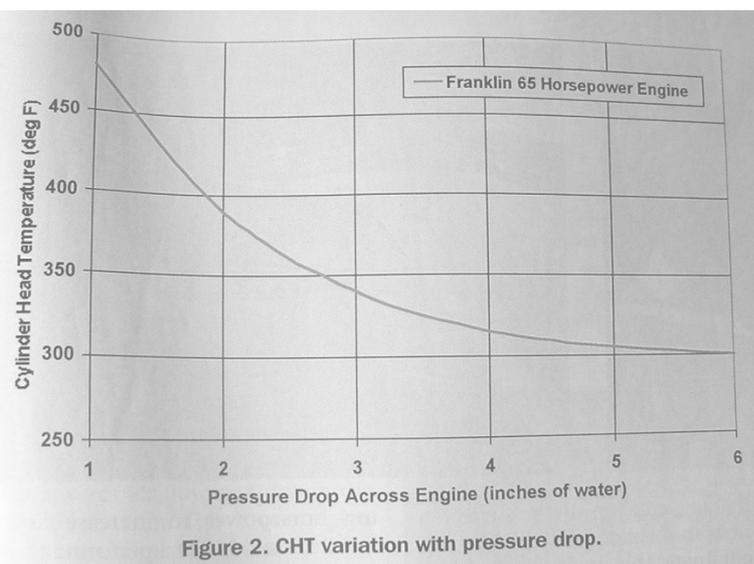
550 x rendimento dell'elica

La figura 2 mostra l'effetto della caduta di pressione dell'aria attraverso il motore sulla temperatura delle teste cilindri di un motore Franklin da 65 hp. Potete vedere che più elevato è il limite di CHT, più bassa è la caduta di pressione necessaria (e la conseguente resistenza aerodinamica). Non dobbiamo mai ridurre la resistenza di raffreddamento a spese del riscaldamento



del motore, ma questa curva illustra come la resistenza di raffreddamento aumenta in maniera significativa in caso di eccessivo raffreddamento delle teste dei cilindri.

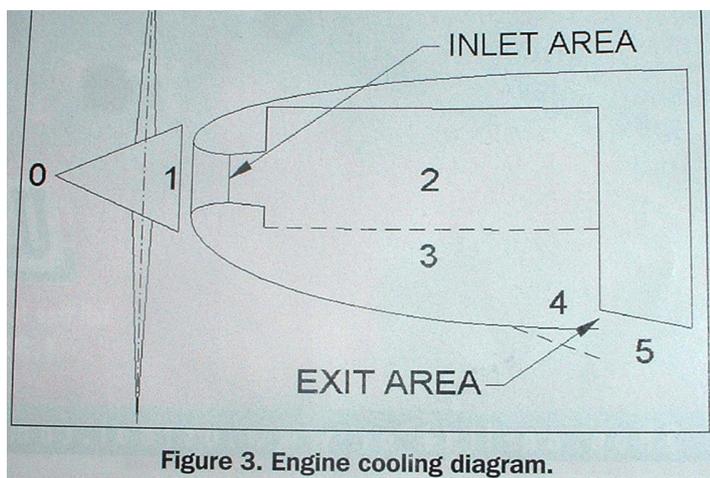
Osservando la figura 1, potreste supporre che la potenza necessaria per raffreddare un motore dovrebbe essere abbastanza elevata. E' sorprendente che, in condizioni ideali, questo non valga. Per esempio, un velivolo con un motore da 150 hp. sta volando col 75% della



potenza a 8000 ft. in condizioni standard avrebbe bisogno di 1.4 lb./s di aria di raffreddamento, corrispondenti a 24 cu.ft./s (0.680 m³/s). Per questa portata d'aria, la curva di raffreddamento del costruttore del motore indica che quella dovrebbe avere una caduta di pressione di 21 cu.ft./s (0.595 m³/s) o 4 in.H₂O. Servendosi di questi valori e assumendo che il rendimento dell'elica in crociera sia dello 80%, servirebbe un po' più di un cavallo vapore al freno (bhp) per raffreddare il motore. Come vedremo, la potenza effettiva per il raffreddamento sarà maggiore per altri motivi.

La figura 3 indica lo schema del raffreddamento ad aria di un'installazione del motore. Le cifre indicano le differenti stazioni lungo

il percorso attraverso l'impianto e ogni stazione può contribuire al raffreddamento o alla resistenza aerodinamica.



All'esterno della cappottatura

La stazione 0 indica un punto sufficientemente distante dal velivolo, dove l'aria che investe la carenatura possiede la medesima velocità del velivolo. Appena l'aria attraversa il piano dell'elica, la pressione totale media aumenta. Mi riferisco al valore medio perché la pressione effettiva è più bassa verso il mozzo e aumenta di molto spostandosi lungo la pala

verso l'esterno (dove si genera la maggior parte della trazione dell'elica). Sfortunatamente, è difficile che le bocche d'ingresso posizionate ai due lati dell'ogiva siano abbastanza distanziate per avvantaggiarsi di quest'aumento di pressione. Le prove hanno mostrato che una sola presa d'aria, posta sotto l'ogiva, è in una condizione migliore per beneficiare un poco di quest'aumento, risultando più favorita nelle condizioni di salita. La figura 4 (?) mostra questa soluzione sul Mooney molto filante della CAFE Foundation.

La posizione bassa della presa d'aria offre la possibilità di ridurre la resistenza di raffreddamento avvantaggiandosi dell'aumento della pressione dovuto all'elica. Comunque, dopo la seconda guerra mondiale, alcuni costruttori l'hanno provata con successo limitato. Alcune di esse hanno applicato un raffreddamento verso l'alto, in cui l'aria entra in basso in una camera sotto il motore e, poi, passa attraverso i cilindri. I tromboncini di scarico riscaldano l'aria, riducendo l'efficacia del raffreddamento. Per eliminare il problema, il Piper Saratoga, che usa questo sistema di raffreddamento, ha i tromboncini sopra il motore. Altre installazioni, come il CAFE Mooney, indirizzano l'aria dalla presa inferiore al plenum sopra il motore. Questa soluzione richiede di essere eseguita con cura, servendosi di un buon diffusore e di una camera ampia, diversamente le perdite interne di pressione vanificheranno il guadagno dovuto all'elica.

L'ingresso nel vano motore

Abbiamo detto prima che la potenza necessaria per il raffreddamento dipende dalla quantità d'aria e dalla caduta di pressione attraverso il motore. Ogni aumento di flusso e di caduta di pressione causano un incremento della potenza di raffreddamento e una riduzione di prestazioni. Peggio, possono anche comportare un peggior raffreddamento del motore.

Rallentare l'aria, prima dell'ingresso nel vano è un modo per aiutare la riduzione delle perdite di pressione. Quando l'aria è rallentata rispetto al velivolo, la pressione statica aumenta. Idealmente, ci piacerebbe rallentare l'aria fino a fermarla prima del suo ingresso nella cappottatura. Questo richiederebbe, in realtà, delle prese d'ingresso grandi, che non solo sarebbero brutte all'aspetto, ma che causerebbero anche un aumento della resistenza esterna.

Prove eseguite negli anni 1930 e 1940 hanno mostrato che il miglior compromesso tra resistenza esterna e minima perdita di pressione all'interno si ha quando:

$$0,3 < \frac{\text{velocità all'ingresso}}{\text{velocità del velivolo}} < 0,7$$

Le prove suggeriscono, inoltre, che un rapporto 0,4 è quasi l'ottimo per la crociera. Dato che le prese d'aria, di solito, hanno un'area stabilita, il rapporto della velocità all'ingresso dipende dalla velocità e, in qualche modo, dal flusso massico che attraversa il vano. Alla velocità di salita il rapporto sarà più elevato e alla velocità di crociera sarà inferiore. Quanto al progetto, si raccomanda di dimensionare la sezione d'ingresso per la velocità di crociera desiderata e di verificare che non si ecceda 0,7 durante la salita. Se dovesse succedere, allora bisogna scegliere un rapporto inferiore per la crociera (cioè una sezione maggiore). Il foglio di lavoro (scaricato dal sito EAA, ndt) vi consente di verificare sia la condizione di crociera che quella di salita, per cui potrete regolare la vostra sezione d'ingresso in modo da restare all'interno dell'intervallo raccomandato. Se la presa alimenta d'aria anche il radiatore dell'olio e il motore stesso, allora questi flussi aggiuntivi influenzeranno la sezione d'ingresso necessaria.

Se da una parte la quantità di aria di raffreddamento determina la sezione d'ingresso, la sezione d'uscita controlla la quantità di aria che attraversa il vano motore. Questo è il motivo per cui alcuni velivoli hanno i flabelli sulla cappottatura. Aprendoli in salita, i flabelli aumentano il flusso d'aria di raffreddamento, chiudendoli durante la crociera, lo diminuiscono. Il flusso d'aria sarà regolato in base alla pressione e all'area di uscita.

Passeggiate lungo una linea di volo e vedrete un varietà di forme delle prese: rotonde, rettangolari, ovali o altre configurazioni. Spesso l'estetica, non l'aerodinamica, ne ha determinato la forma. Un vantaggio di quelle rotonde è che possono essere più lontane dal mozzo dell'elica. A parte ciò, la forma della sezione non è così critica come la forma del suo labbro all'ingresso e se la presa ha un diffusore. Eseguendo delle sezioni trasversali dell'imbocco, la forma di ogni sezione dovrebbe essere simile ad una semiellisse o al bordo d'entrata di un profilo. Questi mezzi aiutano a ridurre le probabilità di una separazione e causare una perdita di pressione all'ingresso nella cappottatura.

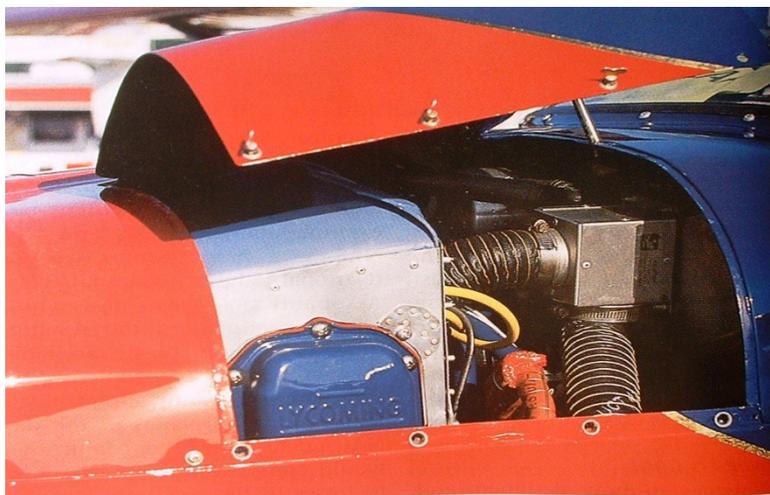
Potete, ancora, ridurre le perdite di pressione mediante un diffusore dietro la gola dell'ingresso. Un diffusore rallenta l'aria di raffreddamento ancor prima di immettersi nel plenum ad alta pressione (sta. 2 fig. 3). Un angolo tra le pareti del diffusore rettilineo non superiore a 10° circa evita una perdita di carico eccessiva. Se costruite un diffusore con pareti curve, aumenterete gli angoli. Se non volete servirvi di un diffusore, dovrete dimensionare l'ingresso dell'aria di raffreddamento per un rapporto di velocità più piccolo per ridurre le perdite di pressione all'interno.

All'interno del vano motore

Se facciamo un buon lavoro per rallentare l'aria al suo ingresso, noi recupereremo quasi lo 85% della pressione dinamica e la convertiremo in pressione statica alla sta. 2. Questo significa che il 15% perso si trasformerà in resistenza di raffreddamento. Se il rapporto di velocità all'ingresso è elevato e non c'è un diffusore, le perdite possono raggiungere il 40%. Il plenum ad alta pressione dovrebbe essere il più possibile ampio per comportarsi come un grande serbatoio. Molti velivoli

hanno il plenum sopra il motore, cosicché l'aria ad alta pressione fluirà in basso attraverso i cilindri, creando il raffreddamento verso il basso (*down draft cooling*). Di solito, ci sono dei deflettori che chiudono questo vano. L'eliminazione delle fessure tra deflettori e guarnizioni è fondamentale, perché le prove in volo hanno dimostrato che dei deflettori ottimi possono perdere il 55% dell'aria di raffreddamento, in questo modo il flusso non transita attraverso le alette dei cilindri. Questa perdita significa, anche, che la resistenza di raffreddamento aumenta della stessa percentuale.

Un modo per ridurre le perdite è di usare un plenum separato e attaccato direttamente al motore. Un plenum di questo genere rende l'accesso al motore e l'ispezione più difficili, ma può ridurre la perdita dell'aria di raffreddamento dal 55% al 17%. La figura 5 mostra questa soluzione sul velivolo di Formula Uno Madder Maxx. La lunga estensione dell'elica permette un diffusore a pareti rettilinee che rallenta l'aria prima dell'ingresso nel plenum. Un collegamento flessibile consente un movimento relativo tra il motore e il diffusore vincolato alla presa d'ingresso, come si vede alla fine del diffusore nella foto (?).



I costruttori, spesso, usano il plenum ad alta pressione, per fornire aria al radiatore dell'olio. La soluzione più semplice, che funziona bene, consiste nel fissarlo alla parete del deflettore posteriore. Altri installano il radiatore da un'altra parte e lo alimentano con un tubo SCAT. Questi tubi sono molto rugosi al loro interno e determinano delle perdite di pressione, cosicché dovrete prevedere un diffusore di forma appropriata, vincolato al radiatore stesso oppure aggiungerete ancora altre perdite, di solito evidenziate da un'alta temperatura dell'olio.

All'uscita dal vano motore

Poiché l'uscita della cappottatura controlla il flusso di raffreddamento, la sua area e la pressione statica agiscono come una farfalla. Aree d'uscita più ampie (o flabelli aperti) assicurano un flusso di raffreddamento maggiore. Se il velivolo possiede una sezione d'uscita fissa, essa dev'essere sufficientemente ampia per garantire il raffreddamento adeguato durante la salita in giornata calda, di conseguenza avrà, forse, un'area troppo grande per la crociera e, quindi, una resistenza più elevata. I flabelli della cappottatura del motore aggiungono una certa complessità alla costruzione e alla manutenzione, cosicché i progettisti devono decidere se i benefici superano il costo.

La condizione della pressione statica, esterna al velivolo, sulla sezione d'uscita gioca un ruolo chiave nel flusso di raffreddamento. Su molti velivoli, l'uscita del flusso è sul fondo della cappottatura. E' una buona disposizione, dal punto di vista del drenaggio; durante il volo la pressione statica esterna è inferiore a quella dentro la cappottatura. Questo elemento attiva l'uscita dell'aria fuori dal vano motore e aiuta il raffreddamento. I flabelli, non solo aumentano l'area di uscita, ma, quando deflessi, riducono la pressione, incrementando il flusso di raffreddamento.

Poiché la pressione bassa aiuta il flusso di raffreddamento, c'è la tentazione di ricercare le sezioni d'uscita a più bassa pressione, dove mettere la bocca di scarico. Un esempio di ciò è il velivolo ad ala bassa con le uscite posizionate ai lati della fusoliera al di sopra dell'ala. La pressione in quella zona è bassa e perciò aumenterà il flusso di raffreddamento; ma prove sistematiche eseguite su uscite in zone di bassa pressione hanno dimostrato una resistenza totale più elevata dovuta, probabilmente, alla separazione del flusso.



Forse, l'aspetto più importante dell'uscita dell'aria di raffreddamento è di indirizzare l'aria verso il basso, come in figura 6. La resistenza totale di raffreddamento dipende non solo dalla quantità del flusso d'aria, ma anche dalla velocità e dalla direzione dell'aria all'uscita dalla cappottatura. Delle uscite costituite solo da un foro eseguito sul fondo della cappottatura e che non dirige il flusso verso il dietro, fa perdere basicamente tutta la quantità di moto dell'aria e la resistenza di raffreddamento è sostanzialmente più elevata.

Mettiamo tutto insieme

L'esempio fatto all'inizio dell'articolo ha mostrato che la potenza minima richiesta è di circa 1 bhp per la condizione scelta. Servendosi del foglio di lavoro scaricabile questo mese (dal sito EAA), potete stimare le aree d'ingresso e d'uscita, così come la resistenza interna. L'esempio sul foglio è stabilito per un velivolo con 150 hp. che vola a 140 kts in crociera a 8000 ft. in una giornata standard.

Per ridurre le perdite di pressione, l'esempio sul foglio prevede un ingresso convenzionale ben sigillato, con un buon diffusore, deflettori convenzionali, radiatore dell'olio. Io ho determinato le aree necessarie d'ingresso e d'uscita per la salita in una giornata calda e con un buon recupero (di

pressione) in crociera. Ho trovato che la potenza necessaria per il raffreddamento è superiore a 3 bhp, tre volte il minimo possibile. Se decidessi di non utilizzare i flabelli, allora la potenza per il raffreddamento salirebbe a 4 bhp. In questa condizione, la resistenza di raffreddamento è all'incirca il 3% della resistenza totale del velivolo e il 4% usando l'uscita fissa. Per questo velivolo, l'uso dei flabelli non incide molto sulle prestazioni.

Se fossimo un po' distratti e non facessimo un'uscita che diriga il flusso all'indietro, la potenza per il raffreddamento salirebbe a circa 10 bhp, anche con la minima area d'uscita, e la resistenza di raffreddamento sarebbe circa il 10% della resistenza totale del velivolo.

Coloro che sono interessati al progetto di un'installazione di un motore con raffreddamento a liquido ed alla sua resistenza, dovranno attendere un'altra occasione. Nel frattempo, sigillate bene i deflettori e indirizzate l'uscita verso il dietro del velivolo!

Riferimenti.

Aircraft power plants; Fraas Arthur; McGraw-Hill, 1943.

Cowling and cooling tests of a fleetwing model 33 airplane in flight; NACA WR-L-632; Ellerbrock, Herman and Wilson Herbert.

Design of power plant installations pressure loss characteristics of duct components; NACA WR-L-208; Henry John, 1944

An experimental investigation of the aerodynamics and cooling of a horizontally opposed air cooled aircraft engine installation; NASA CR 3405; Miley Stan; 1981.