

# LUZY WIERZCHOŁKOWE TURBIN SILNIKÓW LOTNICZYCH

**A. Rowiński, S. Szczeciński**

Instytut Lotnictwa

**R. Chachurski, A. Kozakiewicz**

Wojskowa Akademia Techniczna

**P. Głowacki**

Central European Engine Services

**J. Szczeciński**

General Electric Poland

## Streszczenie

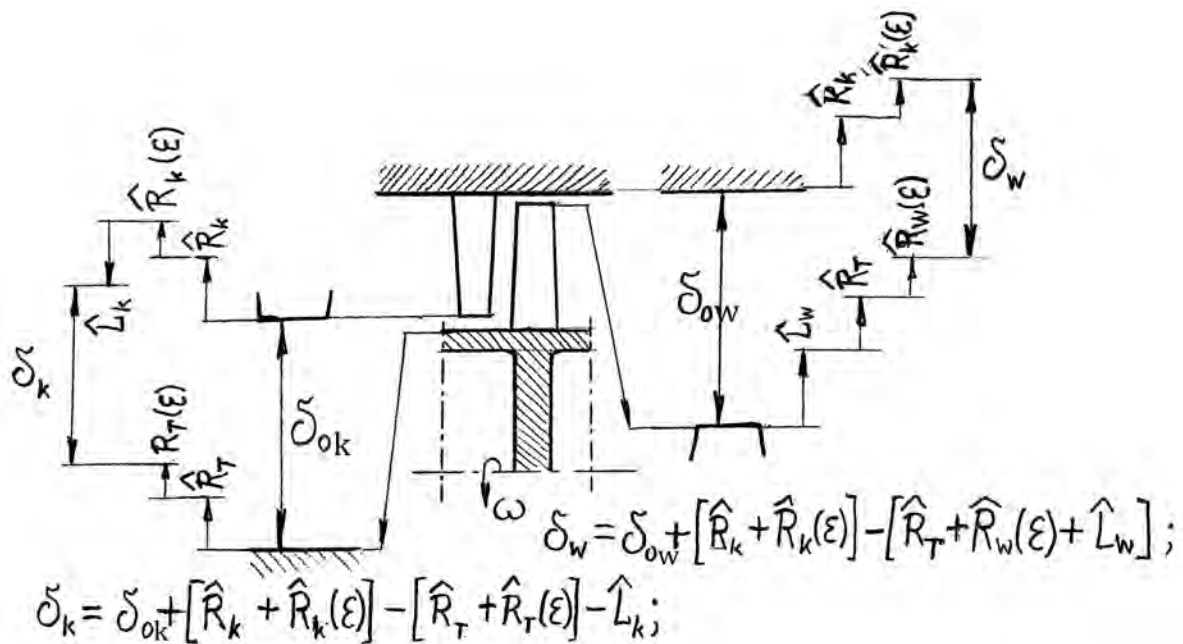
*W artykule przedstawiono fizyczny obraz przyczyn zmienności luzów wierzchołkowych łopatek wirnikowych względem nieruchomych ścian kadłubów w zależności od zakresów pracy silnika i warunków lotu samolotu. Obciążenia wpływające na przemieszczenia promieniowe wieńców tarcz nośnych i łopatek wirnikowych oraz ścian kadłubów zilustrowano odpowiednimi szkicami o wartościach liczbowych uzyskanych z obliczeń uproszczonego modelu obliczeniowego. Wskazano sposoby konstrukcyjne minimalizacji luzów zapewniających jednocześnie bezpieczne użytkowanie silników.*

**Słowa kluczowe:** turbina, pełzanie metali, luz wierzchołkowy

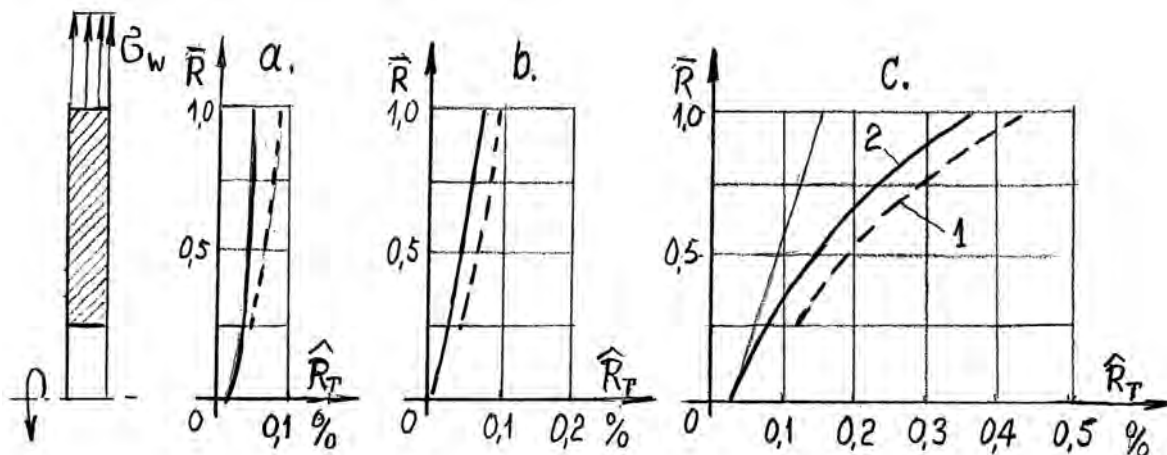
Problem doboru luzów między wierzchołkami łopatek turbin i sprężarek osiowych, a ich nieruchomymi ścianami kadłubów, a także wierzchołków kierownic a wirnikami jest bardzo skomplikowany. Musi on uwzględniać promieniową odkształcalność sprężystą i cieplną wszystkich części tych węzłów konstrukcyjnych dążąc do bezpiecznej minimalizacji luzu – we wszystkich przewidywanych warunkach pracy silnika i lotu samolotu oraz liczby przepracowanych godzin i cykli zmęczeniowych. Na eksploatacyjne zmniejszanie luzów wierzchołkowych mają także wpływ zużywanie się łożysk oraz ugięcia podatnych podpór i wałów wirnikowych. Dążność do minimalizacji luzów wierzchołkowych zwłaszcza turbin, pozwala osiągać większą sprawność tych węzłów – minimalizując eksploatacyjne zużycie paliwa.

Na bieżące wartości luzów wierzchołkowych łopatek wirnikowych  $\delta_w$  oraz kierownic  $\delta_k$  (rys.1) składają się promieniowe przemieszczenia wynikające z odkształceń sprężystych i cieplnych części wirnika, jego tarczy nośnej  $\hat{R}_r$  i łopatki wirnikowej  $\hat{L}_w$  oraz ściany kadłuba  $\hat{R}_k$ . Wartości tych przemieszczeń zależą przede wszystkim od zakresu pracy silnika (jego prędkości obrotowej  $\omega$ ) ale i od warunków lotu samolotu ( $V, H$ ). W turbinach znaczący wpływ na zmniejszanie luzów wierzchołkowych mają odkształcenia trwałe  $\hat{R}(\varepsilon)$  wynikające z pełzania użytych materiałów. Podjęcie zadania doboru luzu między wierzchołkami łopatek wirnikowych turbiny a nieruchomą ścianą jej kadłuba wymaga przeprowadzenia oceny obliczeniowej odkształ-

łceń promieniowych części składowych wirnika uwzględniających oddzielnie wpływy specyfiki konstrukcji i sposobów chłodzenia.



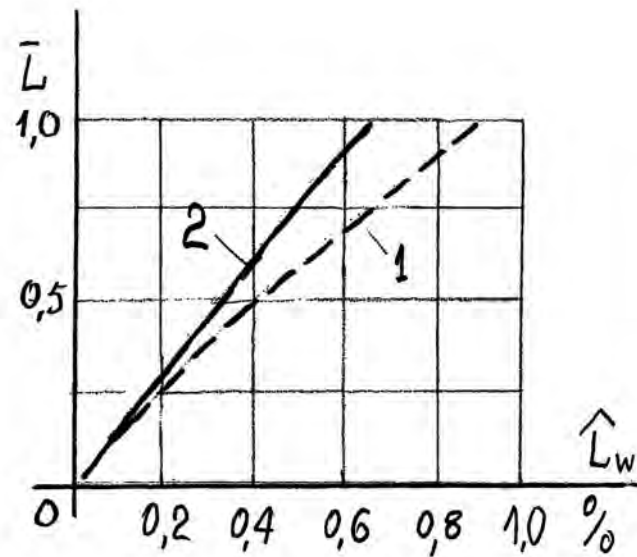
Rys. 1. Schemat stopnia zespołu wirnikowego i kadłuba z zaznaczeniem składowych przemieszczeń promieniowych części wirnikowych i ściany kadłuba oraz luzów wierzchołkowych



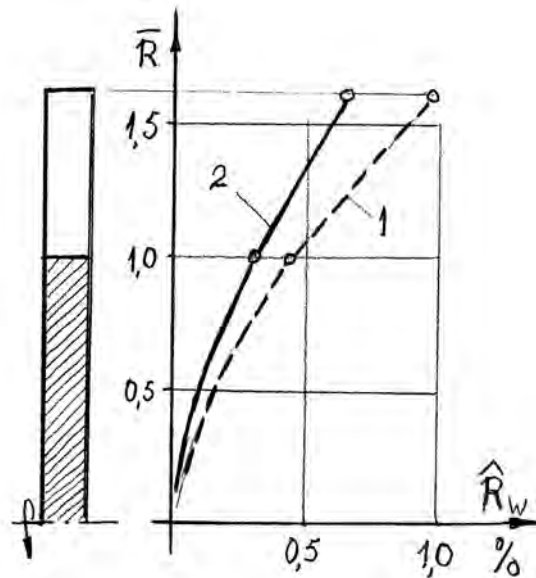
Rys. 2. Zależność przemieszczeń promieniowych tarczy nośnej wirnika turbiny od: (a) - sił masowych samej tarczy, (b) - obciążenia wieńcowego, (c) - nagrzania tarczy, 1 - z łopatkami niechłodzonymi, 2 - łopatkami chłodzonymi.

Z przytoczonych na rys. 2 wykresów (dla uproszczonego modelu obliczeniowego) wynika sensowność zastosowania chłodzenia łopatek - gdyż największe odkształcenia tarcz nośnych wirników turbin spowodowane jest ich nagrzaniem, a chłodzone łopatki ograniczają dopływ ciepła do tarcz. Ponadto powłokowe pióra łopatek są lżejsze i w mniejszym stopniu obciążają tarcze. Na rys. 3 porównano odkształcenia wzdłużne łopatek chłodzonych i niechłodzonych, a na rys. 4 - przemieszczenia promieniowe tarcz i łopatek pod działaniem sumarycznych obciążeń.

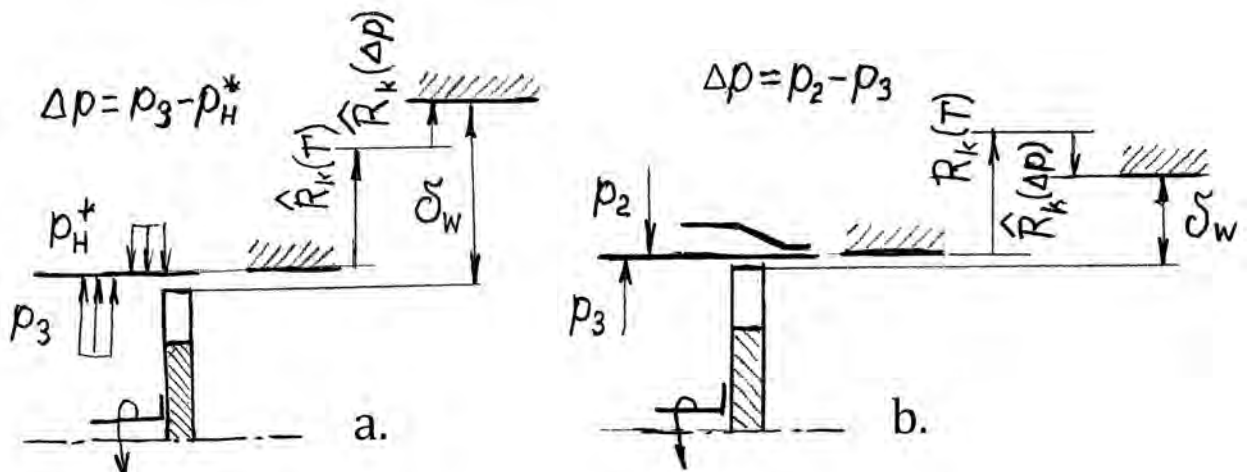
Przemieszczenia promieniowe ścian kadłubów są uzależnione nie tylko od ich temperatury ale i od różnicy ciśnień działających na ich powierzchni (różnica ciśnienia spalin na stopniu turbiny jest 2...5 razy większa niż różnica ciśnienia na stopniu sprężarki silnika). Ciśnienia działające od wnętrza kanału przepływowego zależą od zakresu pracy silnika ale i od warunków lotu ( $V, H$ ), natomiast od zewnątrz może zależeć od tych samych przyczyn lub tylko od warunków lotu - co wyjaśniają przykłady na rys. 5.



Rys. 3. Zależność przemieszczeń promieniowych piór łopatki wirnikowej  
1- niechłodzonej, 2- chłodzonej

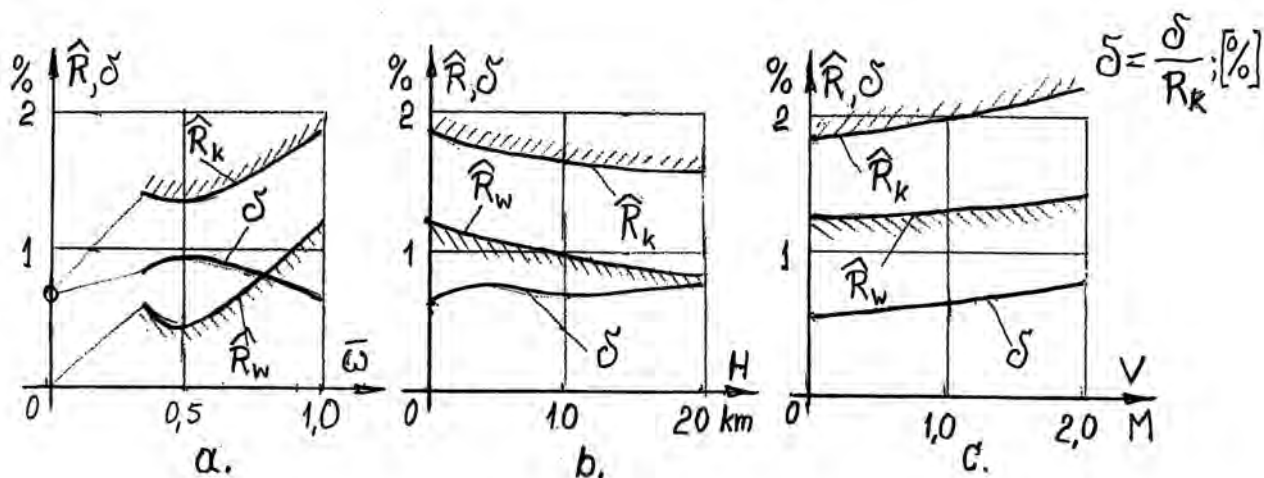


Rys. 4. Sumaryczne przemieszczenia promieniowe stopnia wirnikowego turbiny  
1- łopatki niechłodzone, 2 - łopatki chłodzone



Rys. 5. Schemat przemieszczeń promieniowych ściany kadłuba stopnia turbiny  
(a) - o ciśnieniu zewnętrznym jak w kanale płotowca, (b) - o ciśnieniu jak za sprężarką silnika

Powyższe uwarunkowania narzucają konieczność przeprowadzenia analizy wpływu zakresu pracy silników  $\omega$  oraz prędkości  $V$  i wysokości  $H$  lotu na przebieg zmian przemieszczeń promieniowych ścian kadłubów i wierzchołków łopatek oraz luzów wierzchołkowych. Na rys.6 zilustrowano te zależności wynikami obliczeniowymi uproszczonego modelu turbiny silnika odrzutowego samolotu bojowego.



**Rys. 6. Charakterystyczne zależności przemieszczeń promieniowych ścian kadłuba i wierzchołków łopatek wirnikowych turbiny silnika odrzutowego od jego prędkości obrotowej (a), wysokości lotu (b) oraz prędkości lotu (c)**

Możliwości minimalizacji luzów wierzchołkowych turbin – zwłaszcza w odniesieniu do silników odrzutowych stanowiących napęd samolotów bojowych są dość ograniczone. Wynika to z konieczności zapewnienia niezbędnych luzów w każdym zakresie pracy silników i warunkach lotu samolotu – także dynamicznie zmiennych.

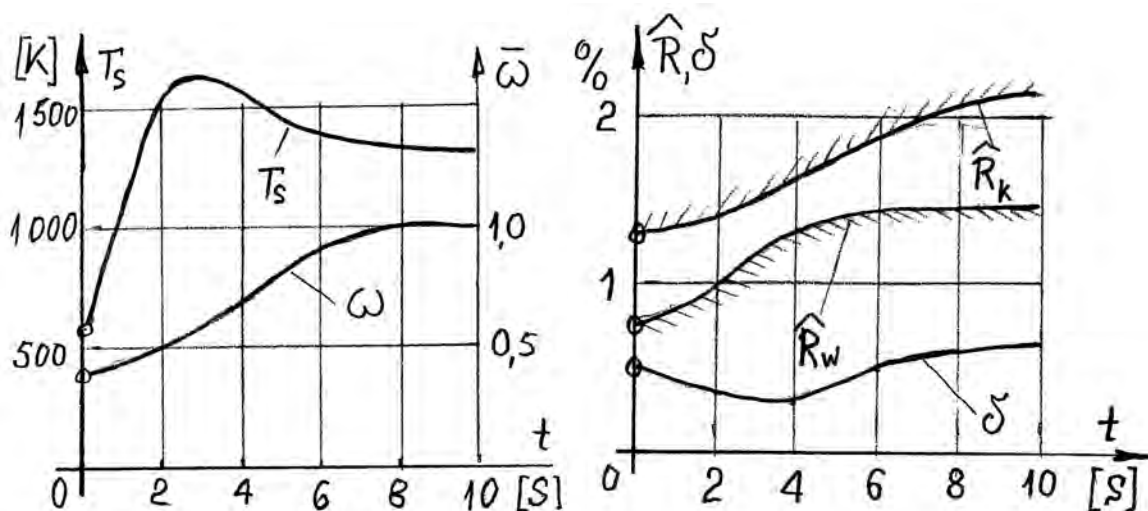
Silniki samolotów bojowych muszą się charakteryzować zdolnością do szybkiej akceleracji, czyli przejścia z zakresu biegu jałowego do zakresu ciągu maksymalnego w czasie 4...6 sekund w każdym warunkach lotu. Na rys. 7 przedstawiono charakterystyczne przebiegi temperatury spalin  $T_s$  przed turbiną oraz odpowiadającej jej narastającej prędkości obrotowej  $\omega$  wirnika turbiny. Należy mieć na uwadze, że czasy akceleracji mało się zmieniają podczas lotu wysokościowego – natomiast poziom zakresu biegu jałowego jest znacząco wyższy w tych warunkach. W warunkach akceleracji następują bardzo szybkie zmiany dopływu ciepła do łopatek turbiny (nagrzewając silnie ich powierzchnie) przy znacznie opóźnionym odprowadzaniu ciepła systemem powietrznego chłodzenia zespołu turbiny.

Dążność do zadawalających osiągnięć silników samolotów bojowych – które muszą cechować się dynamiką zmian prędkości i wysokości lotu lepszymi niż potencjalny przeciwnik (czy tylko konkurent) powoduje przyspieszone „zużycie” silnika wynikające z częstych przeciążeń, ale i wydłużeń łopatek wirnikowych na skutek pełzania materiału. Dla zapewnienia niezbędnego bezpieczeństwa latania pozostaje konieczność obserwacji procesu zmniejszania luzu wierzchołkowego, którego ideę przedstawiono na rys. 8.

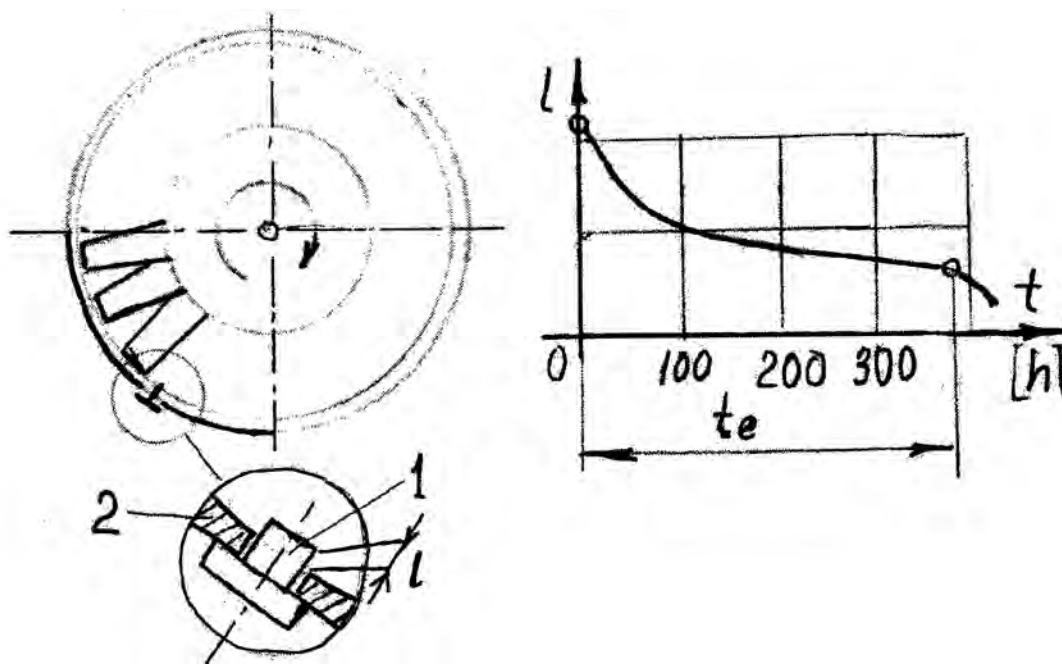
W zasadzie już od powstania lotniczych silników turbinowych – a zwłaszcza odrzutowych, które opanowały pasażerskie lotnictwo dalekiego zasięgu starano się osiągać jak największe sprawności silników (minimalizując zużycie paliwa) i ich trwałość przy pełnej gwarancji bezpieczeństwa latania. Wśród wielu czynników wpływających na wymienione wymogi ważną rolę odgrywa minimalizacja luzów wierzchołkowych turbin.

W silnikach samolotów bojowych dla uzyskiwania minimalnych wartości luzów wierzchołkowych turbin w maksymalnych zakresach ich pracy oraz warunków lotu – bez możliwości wykasowania tych luzów – wykorzystuje się półki na wierzchołkach łopatek wirnikowych, łopatki z programowaną intensywnością ich chłodzenia, wkładki ściernalne w kadłubach oraz dobiera się odpowiednie

wartości ciśnienia na zewnątrz ściany kadłuba turbiny (por.rys.5). Spowolnienie procesu nagrzewania łopatek podczas akceleracji silnika umożliwia pokrycie ich piór żaroodpornymi emaliami.



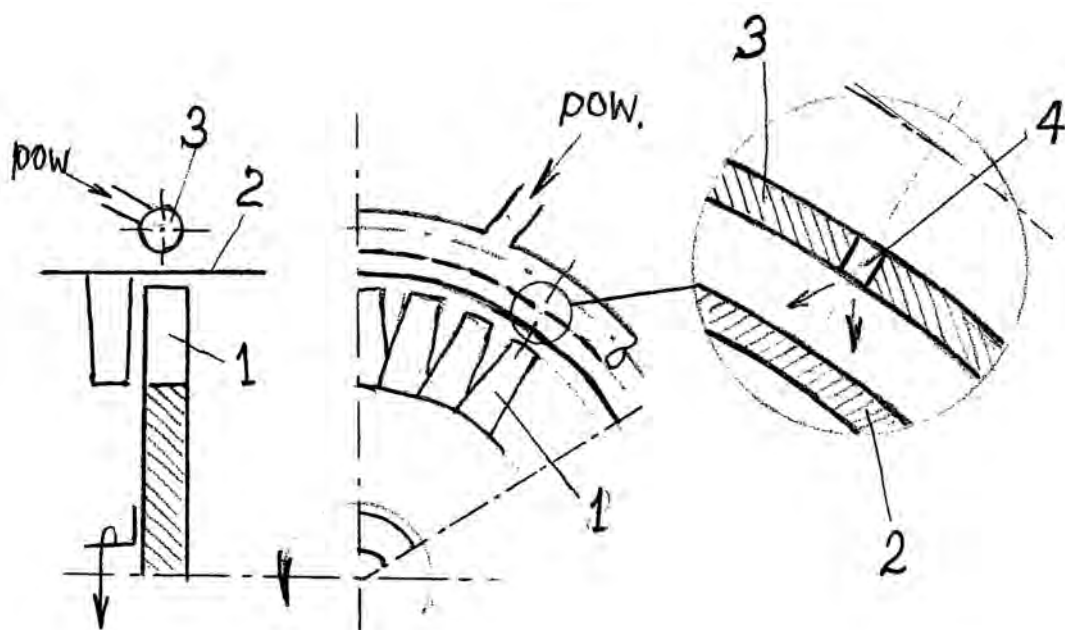
Rys. 7 Zależność temperatury spalin  $T_s$  i prędkości obrotowej  $\omega$  wirnika od czasu  $t$  (a) oraz przemieszczeń promieniowych ściany kadłuba  $\hat{R}_k$ , wierzchołków łopatek wirnikowych  $\hat{R}_w$  turbiny i jej luzu wierzchołkowego  $\delta$  (b) w procesie akceleracji silnika odrzutowego



Rys. 8. Schemat pomiaru minimalnej wartości luzu wierzchołkowego za pomocą kontrolnego pomiaru długości  $l$  ścieralnego kołka (1) w kadłubie (2) turbiny oraz jej zależności od czasu  $t$  eksploatacji silnika

W dwuprzepływowych wentylatorowych silnikach odrzutowych dużych i bardzo dużych ciągów – obecnie powszechnie wykorzystywanych w pasażerskim lotnictwie między- i transkontynentalnym, od ponad ćwierćwiecza stosuje się, coraz doskonalsze systemy zewnętrznego schładzania kadłubów turbin strumieniem powietrza. (rys. 9). Powietrze do chłodzenia jest pobierane z za określonych stopni sprężarki – ze względu na jego ciśnienie i temperaturę, a o intensywności strumienia decyduje liczba i średnice dysz w rurce rozprowadzającej powietrze wokół ściany kadłuba. Taki sposób minimalizacji luzów wierzchołkowych turbin o opisywanym zastosowaniu silników (oraz ich wymiarów geometrycznych i masie) jest możliwy (i dostatecznie

skuteczny) ze względu na znacznie powolniejsze przebiegi wszystkich procesów silnikowych i lotnych samolotów transportowych (zwłaszcza pasażerskich – ze względu na komfort przebywających na pokładzie pasażerów) niż w przypadku lotnictwa bojowego.



**Rys. 9. Schemat schładzania kadłuba turbiny dla zapewnienia minimalizacji luzu wierzchołkowego w różnych warunkach lotu. 1 - łopatki wirnikowe, 2 - ściana kadłuba turbiny, 3 - rurka rozprowadzająca powietrze chłodzące, 4 - dysza powietrzna**

Wprawdzie doraźne zyski ze zmniejszenia zużycia paliwa są niewielkie (niewiele przekraczające 1...2%) to oszczędność jednego przelotu 200...300 pasażerów przez Atlantyk kształtuje się na poziomie kilkuset USD.

Analogiczna problematyka odnosi się również do wirników sprężarek osiowych lotniczych silników turbinowych z tym, że praktykę minimalizacji luzów wierzchołkowych wspomaga możliwość doboru materiałów konstrukcyjnych o różnych gęstościach, rozszerzalnościach i sztywnościach oraz ściernych wykładziny ścian kadłubów.

## LITERATURA

- [1] **Birger I.A.:** *Raszot rotorow na prochnost*, Maszgiż, Moskwa 1956.
- [2] **Brown R. F.:** *Monitoring equipment for turbine engine development*. Instrument for Aerospace Industry, 1958, vol.14.
- [3] **Gundlach W. [i inni]:** *Silniki turbinowe małych mocy*. WNT, Warszawa, 1965.
- [4] **Lipka J.:** *Wytrzymałość maszyn wirnikowych*. WNT, Warszawa, 1967.
- [5] **Lewitowicz J. [i inni]:** *Eksperymentalne badania wielkości luzów wierzchołkowych zespołów wirnikowych*. Biuletyn WAT z. 1/1971.
- [6] **Nowacki W.:** *Teoria pełzania*. Arkady, Warszawa, 1963.
- [7] **Stodola A.:** *Dampf- und Gasturbinen*. Berlin, 1924.
- [8] **Szczeciński S.:** *Studium o luzach wierzchołkowych zespołów wirnikowych lotniczych silników turbinowych jako parametrze konstrukcyjnym i eksploatacyjnym*. Dodatek do Biuletynu WAT z. 4/1973.