



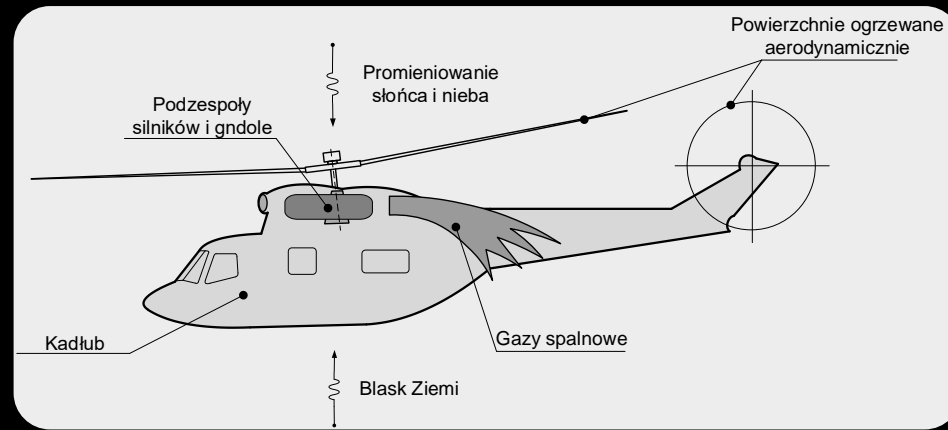
**WSPÓŁCZESNE METODY  
OGRANICZANIA EMISJI  
PODCZERWIENI EMITOWANEJ  
PRZEZ ŚMIGŁOWIEC W LOCIE**

# WPROWADZENIE W PROBLEMATYKĘ PROMIENIOWANIA PODCZERWONEGO

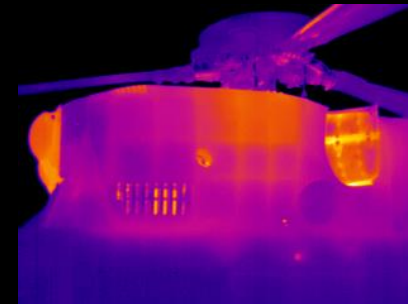
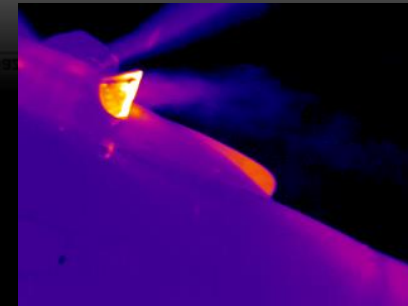
Śmigłowce w trakcie lotu emitują do otoczenia promieniowanie elektromagnetyczne o dwóch charakterystycznych widmach: radiowym i podczerwonym. Promieniowanie radiowe jest spowodowane wytwarzaniem zmiennych pól elektrycznych i magnetycznych przez jednostki i urządzenia elektroniczne działające na pokładzie helikoptera. Emisja promieniowania podczerwonego jest istotna w zakresie długości fal optycznych i wynika głównie z procesów wytwarzania ciepła na pokładzie śmigłowca. Główne obszary emisji podczerwieni śmigłowca w locie można podzielić na:

- promieniowanie ciał stałych - w tym wymiana ciepła wewnątrz przekładni, elementów silnika, osłon termicznych i gondoli,
- promieniowanie powierzchni ogrzewanych aerodynamicznie np. wirnik główny i ogonowy,
- promieniowanie spalin - emitowane w kulisty obszar otoczenia śmigłowca,
- odbite promieniowanie ze strumienia spalin, słońca, światła nieba i światła ziemi.

Źródła emisji podczerwieni przez śmigłowiec w locie.



Wybrane kadry z filmu nagranych w podczerwieni przedstawiające lot śmigłowca PZL W-3 Sokół.



# WSPÓŁCZESNE SYSTEMY WYKRYWANIA OBIEKTÓW W PODCZERWIENI

Wyścig zbrojeń tworzy coraz nowsze i bardziej zaawansowane technicznie systemy rakietowe do wykrywania, obserwacji, śledzenia i naprowadzania na podczerwień. Zmusza to konstruktorów samolotów do projektowania i dostosowywania rozwiązań przeciwdziałających w celu zmniejszenia ryzyka i konsekwencji potencjalnego uderzenia. Generalnie urządzenia wykrywające w podczerwieni można podzielić na dwie grupy, które mogą się wzajemnie uzupełniać:

- IRST (Infra Red Search and Track) - skanery podczerwieni opracowane przede wszystkim do wykrywania obiektów, lokalizacji i śledzenia oraz mapowania termicznego powierzchni terenu,
- FLIR (Forward Looking Infra Red) - urządzenia śledzące i celownicze, głównie do zastosowań naziemnych i powietrznych.

System ATFLIR firmy Raytheon Technologies





# METODY OGRANICZANIA WIDOCZNOŚCI ŚMIGŁOWCÓW W PODCZERWIENI

Współczesne śmigłowce wojskowe posiadają różnorodne rozwiązania konstrukcyjne mające na celu ograniczenie ich potencjalnego wykrycia w podczerwieni oraz zmniejszenie możliwości zniszczenia przez pociski naprowadzane na podczerwień. Systemy ochrony śmigłowców można podzielić na aktywne i pasywne. Ochrona aktywna służy jedynie do odrzucania pocisków kierowanych na podczerwień z zapachu i dzieli się na dwa rodzaje: sprzęt elektryczny, wysyłający silny wzrost promieniowania elektromagnetycznego w widmie podczerwonym, który powoduje ślepotę na pociski oraz urządzenia grzewcze, takie jak flary raketowe - ciepło pułapki utrudniające pociskowi znalezienie prawdziwego celu. Istotną wadą tego typu ochrony jest wysoki koszt. Urządzenia elektryczne są dość zawodne i zużywają duże ilości energii. Z drugiej strony, w zależności od ich ilości na tacy, flary mają zawsze skończoną liczbę. Pasywna ochrona na podczerwień to grupa komponentów zintegrowanych z konstrukcją helikoptera, do których należą:

1. Kształtowanie i powlekanie powierzchni kadłuba materiałami pochłaniającymi radary
2. Modyfikacje dyfuzorów wylotowych
3. Modyfikacje osłon silników i gondoli
4. Chłodzenie spalin w specjalnych wymiennikach ciepła

Śmigłowiec szturmowy Eurocopter Tiger UHT.



Śmigłowiec AH-64 Apache.

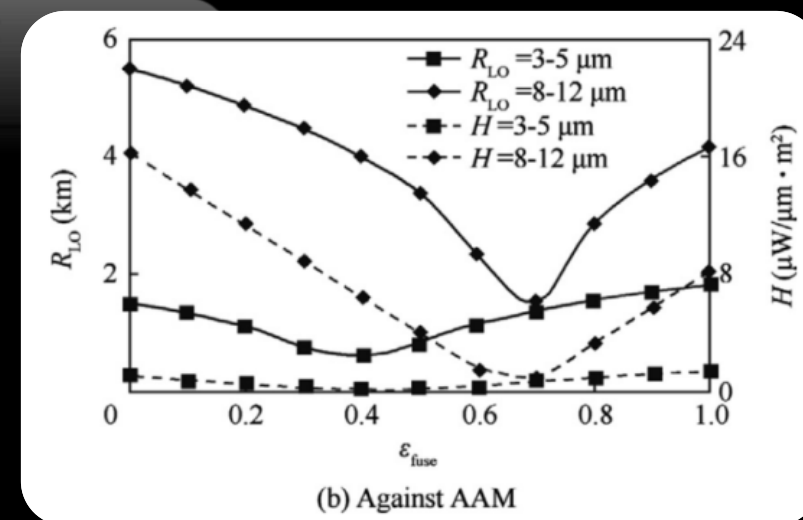
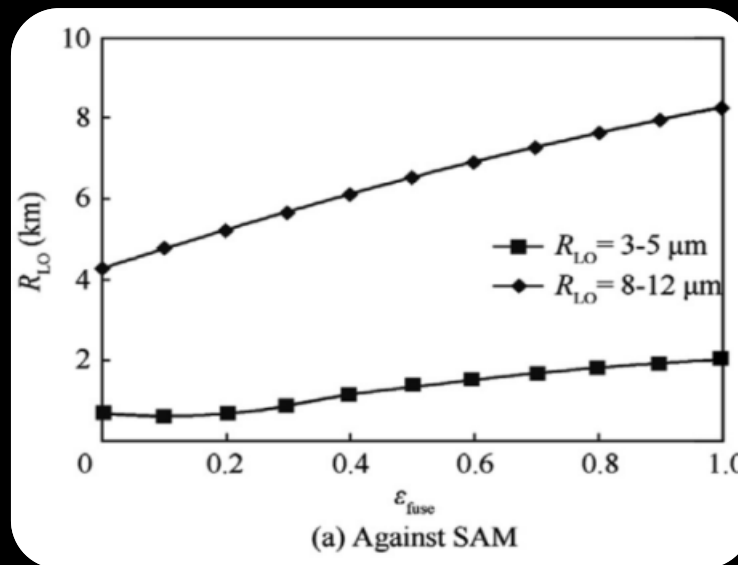


# MATWRIAŁY POCHŁANIAJĄCE PROMIENIOWANIE

Wpływ emisyjności poszycia tylnej części kadłuba na zasięg namierzania statku powietrznego.

Energia promieniowania emitowana na określoną powierzchnię ciała może być pochłaniana, odbijana lub przenoszona przez ciało. W większości ciał stałych, np. metale, przepuszczalność promieniowania jest równa zeru. Jedną z możliwych technik obniżenia poziomu sygnatury podczerwieni z powierzchni metalicznej jest zastosowanie specjalnych materiałów pochłaniających (RAM), które pochłaniają część odebranej energii elektromagnetycznej i rozpraszają ją na ciepło, zmniejszając w ten sposób energię odbitą. Pochłaniacze EM w statkach powietrznych mają kilka form:

- materiały konstrukcyjne i powłoki specjalnie zaprojektowane pod kątem ograniczenia poziomu odbicia promieniowania radarowego,
- powłoki, w tym farby, specjalnie zaprojektowane pod kątem zmniejszonego lub dostosowanego współczynnika odbicia lub emisyjności w widmach mikrofalowych, podczerwonych lub ultrafioletowych.





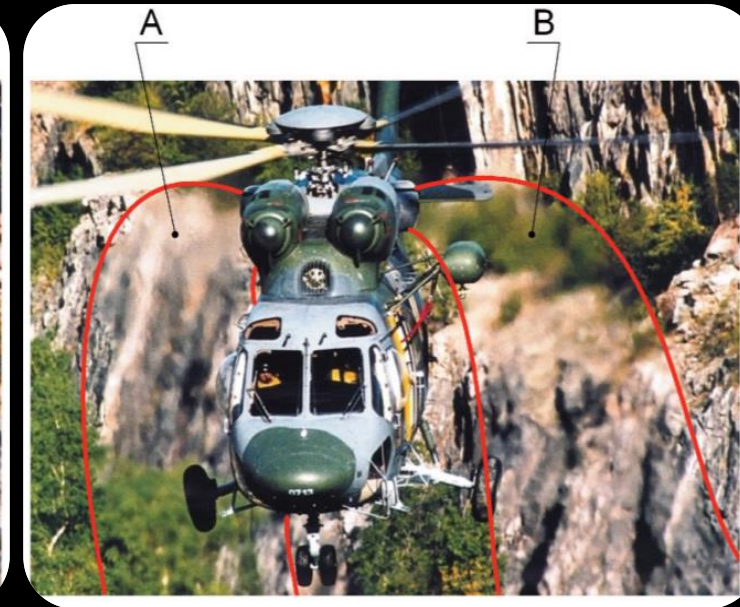
Większość materiałów używanych do kontroli poziomu emisyjności poszycia została pierwotnie opracowana dla samolotów wojskowych i można je znaleźć zarówno w stałopłatach jak i w wiroplatach. Zmodyfikowane wersje materiałów i technik obróbki można znaleźć na niektórych statkach, okrętach podwodnych, pojazdach bojowych i taktycznych. Podejście to było stosowane już od czasów II wojny światowej, kiedy specjalne farby zawierające węgiel (niedoskonały przewodnik) były używane w celu maskowania niemieckich okrętów podwodnych. Mimo, że węgiel jest nadal używany do takich celów, obecnie w systemach operacyjnych preferowane są absorbery magnetyczne oparte na związkach żelaza.

F117-Nighthawk jako przykład samolotu wykorzystującego podejście „STEALTH”.



# MODYFIKACJE UKŁADÓW WYDECHOWYCH

Rozkład temperatur na poszyciu kadłuba śmigłowca oraz w strumieniu spalin ma bezpośredni wpływ na jego widoczność w podczerwieni. Spaliny wypływające do otoczenia z silników napędowych śmigłowca początkowo tworzą zwarte geometryczne strumienie po czym ich kształt jest zaburzany i rozpraszany w wyniku działania wirnika nośnego. Rozkład spalin w otoczeniu śmigłowca jest ściśle uzależniony od wykonywanych manewrów oraz warunków atmosferycznych np. obecności wiatru.



Fotografia lotu śmigłowca PZL W-3 Sokół w terenie górzystym z umiarkowaną prędkością postępową z uwidocznionymi stygnącymi środowiskami gazów spalinowych obydwu silników napędowych,

a – fotografia lotu śmigłowca, b – fotografia lotu z zaznaczeniem obrzeży środowisk gazów spalinowych.

A – środowisko gazów spalinowych silnika prawego (strona nawietrzna),

B – środowisko gazów spalinowych silnika lewego (strona zawietrzna)



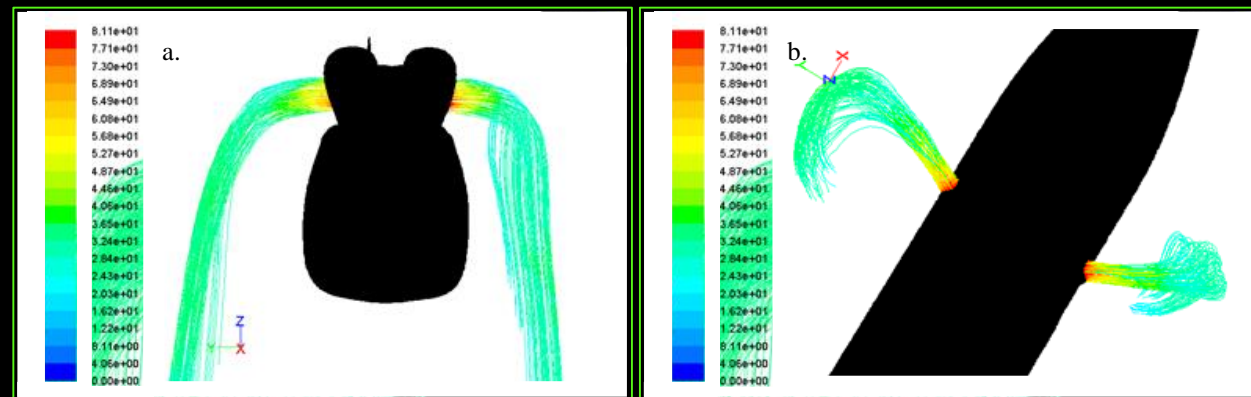


# MODYFIKACJE UKŁADÓW WYDECHOWYCH

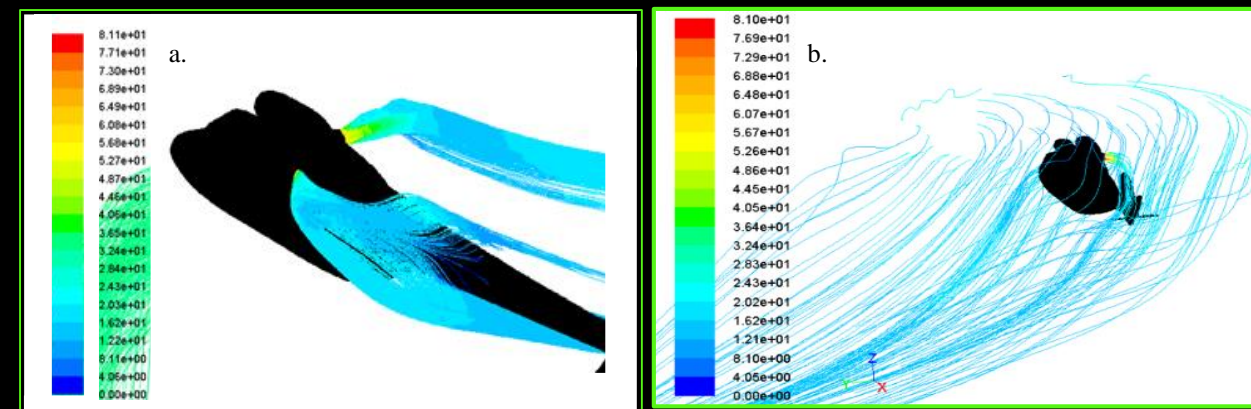
Wyniki analizy tych zjawisk były podstawą do opracowania programu komputerowego do symulacji, przedstawionego w „Numerical Model of Exhaust Gases Expansion in Rotor Wake Vortex During Vertical Helicopter Flight”, Fijałkowski S., Kania M. W artykule przedstawiono model 3D i symulację rozszerzania się spalin podczas różnych manewrów pionowych śmigłowca PZL W-3 dla różnych prędkości wiatru bocznego.

Symulowane prądy i rozkłady prędkości spalin wypływających z silników śmigłowca wskazują na obecność nieodchylonych (od kierunków osi kolektorów) zwartych części strumieni w pewnych odległościach od przekrojów wylotowych kolektorów. Jednocześnie energie pędu i kinetyczne spalin na ww. odległościach nie podlegają istotnym przemieszczeniom. Na podstawie wizualizacji uzyskanych rozkładów prądów i prędkości przepływu zaobserwowano istotne zmiany w zachowaniu się strumieni spalin poza obszarami zwartymi. Pod wpływem podmuchu i wiatru strumienie odchylają się od początkowych kierunków i odkształcają się, co w konsekwencji prowadzi do rozpraszania spalin w postaci chmur w dalszym obszarze strumienia zawirnikowego.

Linie prądu spalin wypływających z dyfuzorów silników śmigłowca w zawisie bez wiatru, a - widok z przodu, b - widok z góry.



Linie prądu spalin wypływających z dyfuzorów silników śmigłowca w zawisie z: a - czołowym wiatrem o prędkości 10 m/s, b - bocznym wiatrem o prędkości 10 m/s.



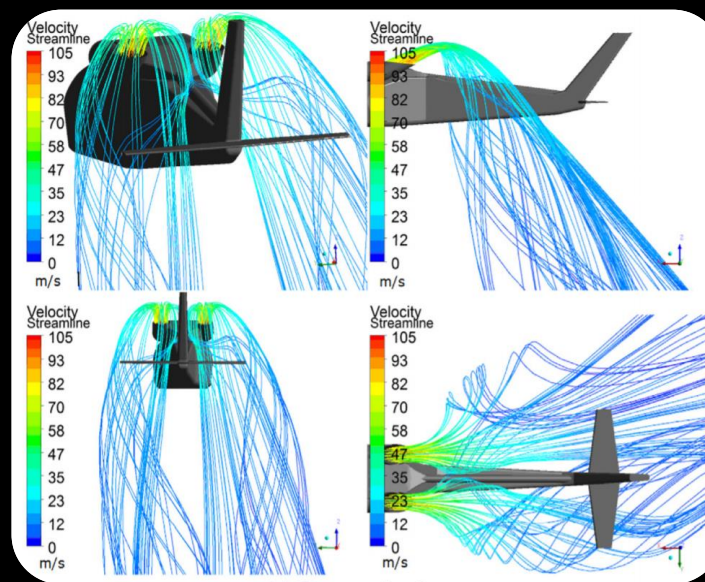


# MODYFIKACJE UKŁADÓW WYDECHOWYCH

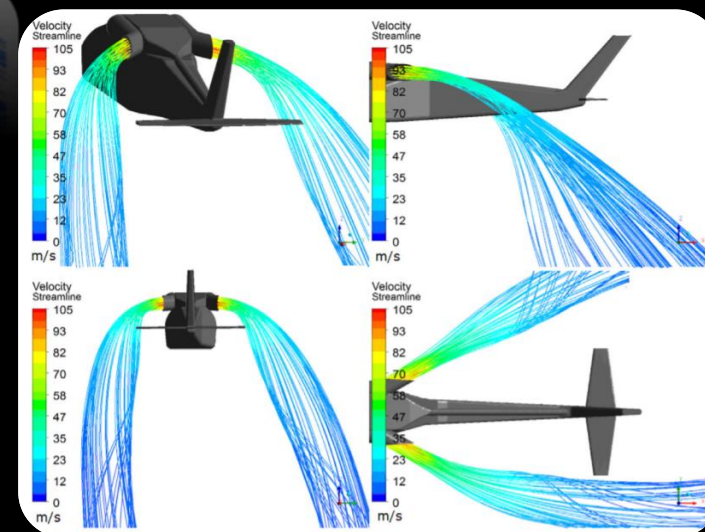
W technice śmigłowej, w celu ograniczenia widoczności łopatek turbiny, zmniejszenia emisji spalin, a także ograniczenia nagrzewania belki ogonowej, dyfuzory wylotowe są kształtowane pod określonym kątem w stosunku do wzdłużnej osi silnika.

Smuga spalin na skutek działania strumienia zawirnikowego nabiera silnego odchylenia w dół do tylnej części kadłuba, jak również odchylenia do kierunku obrotów wirnika. Gdy spaliny są kierowane w górę, strumień spalin może zderzyć się z belką ogonową, a wydajność układu wydechowego jest osłabiana. Podczas gdy spaliny są wyrzucane ukośnie lub na boki, smugi spalin nie kolidują z belką ogonową, a wydajność układu wydechowego jest zwiększana. Kierunek spalin ma znaczący wpływ na rozkład promieniowania podczerwonego. Gdy spaliny są wyrzucane w kierunku ukośnym, natężenie promieniowania podczerwonego wykrywane z góry jest prawie takie samo jak z kierunku bocznego. Podczas wyrzucania spalin w górę lub w bok, w niektórych kierunkach obserwacji występuje silny wzrost promieniowania podczerwonego, a tym samym widoczności śmigłowca w podczerwieni.

Górnio skierowany dyfuzor



Boczenie odchylony dyfuzor



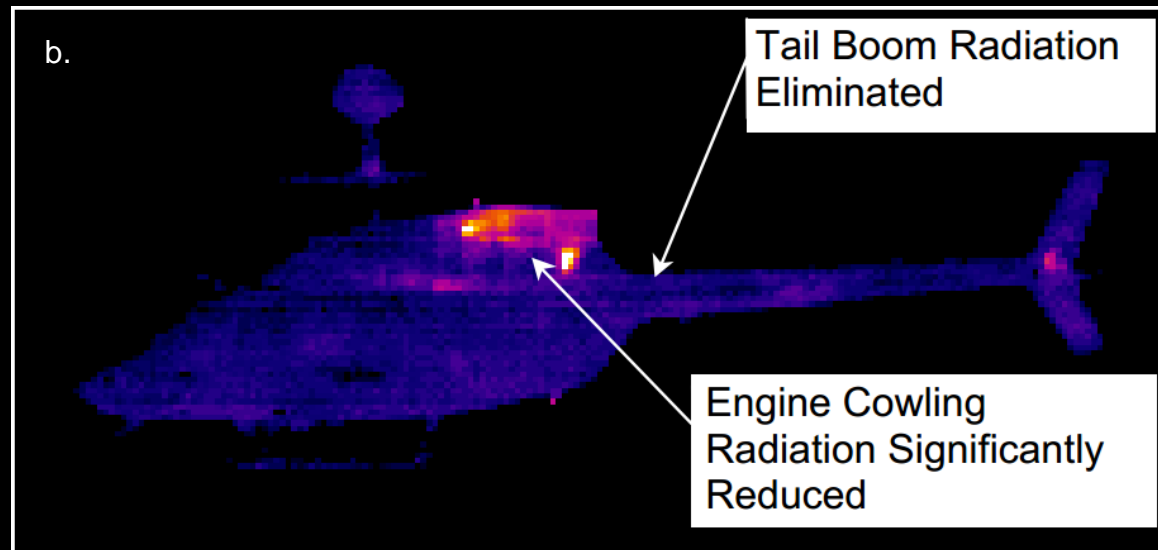
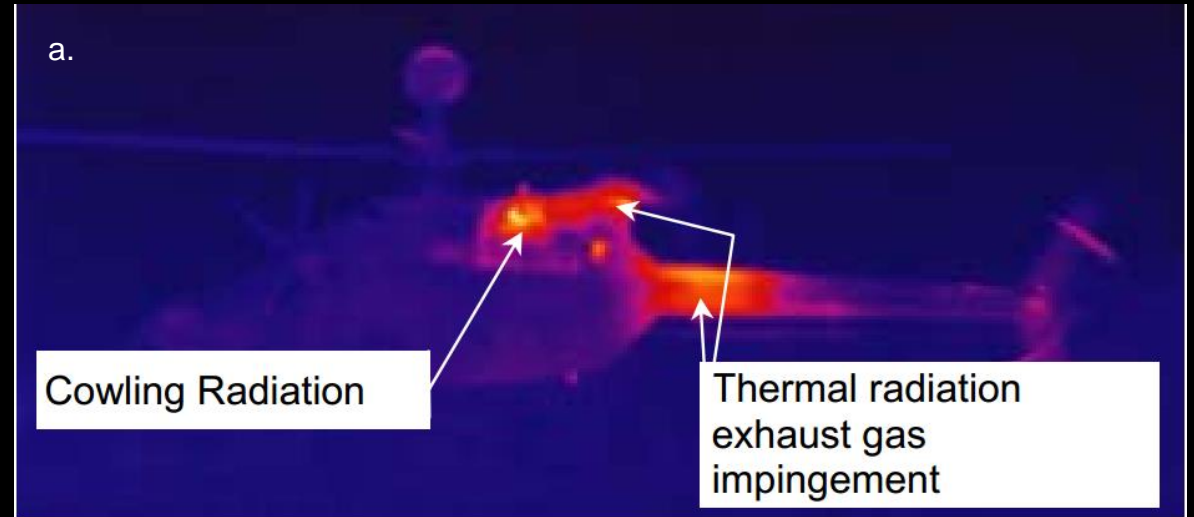
Linie prądu strumieni spalin w wyniku działania strumienia zawirnikowego z prędkością 10 m/s dla różnych konfiguracji dyfuzorów spalin



# MODYFIKACJE UKŁADÓW WYDECHOWYCH

Śmigłowiec OH-58D Kiowa Warrior w podczerwieni,  
a - przed modyfikacją, b - ze zmodyfikowanym układem wydechowym.

Przykładem modernizacji układu wydechowego jest śmigłowiec OH - 58D Kiowa Warrior. Układ wydechowy został umieszczony po prawej stronie górnej części kadłuba, a spaliny skierowano w górę. Zmodyfikowany wylot spalin wraz z chłodnicą spalin nie wpłynął znacząco na wzrost masy konstrukcji oraz na pracę silnika śmigłowca. Mieszanie gorącego strumienia spalin ze strumieniem zawirnikowym spowodowało obniżenie emisji podczerwieni.

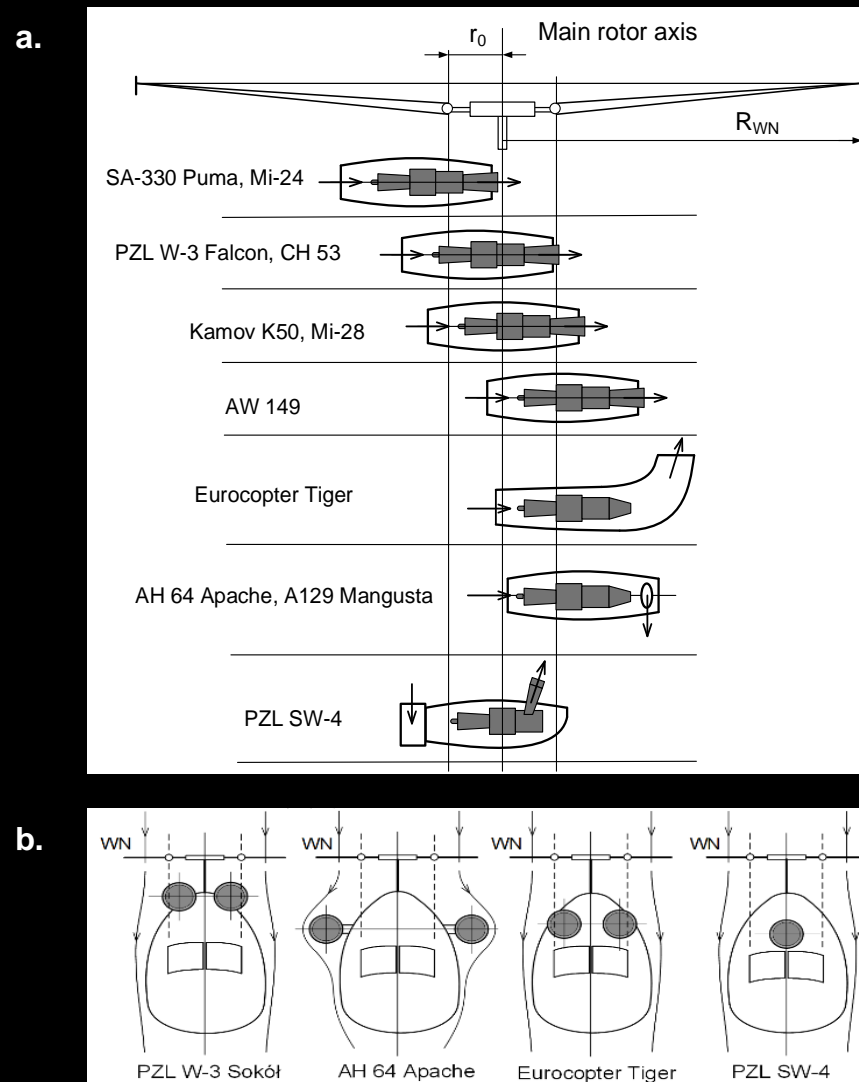




# OSŁONY I MODYFIKACJE GONDOLI

Ze względu na dużą moc przy stosunkowo niewielkiej masie silniki turbinowe zrewolucjonizowały przemysł lotniczy. Obecnie silniki turbowalowe pozostają niemal wyłącznym rodzajem napędu w śmigłowcach wojskowych. Przejściowe pola temperatur i gradienty temperatur, które występują we wszystkich sekcjach silnika turbinowego, tj. sprężarce, komorze spalania, zespole turbiny i dyfuzorze powodują znaczną emisję promieniowania podczerwonego. Jego obecność wynika z różnicy temperatur między powierzchnią silnika, a otoczeniem. Proces spalania mieszanki paliwowo-powietrznej w sposób ciągły nagrzewa otaczające powierzchnie i elementy silnika. Najbardziej obciążonymi termicznie częściami silnika turbinowego są łopatki turbiny pierwszego stopnia. W wyniku procesów wysokotemperaturowych wewnątrz przewodu silnika, duże ilości ciepła muszą być odprowadzane na zewnątrz konstrukcji silnika. Z drugiej strony, gorące spaliny i emisja ciepła z podzespołów silnika do otoczenia narażają statek powietrzny na wysokie ryzyko na polu bitwy. Konieczność ograniczenia śladu statku powietrznego w podczerwieni wymaga ograniczania emisji, szczególnie emitowanej przez układ napędowy.

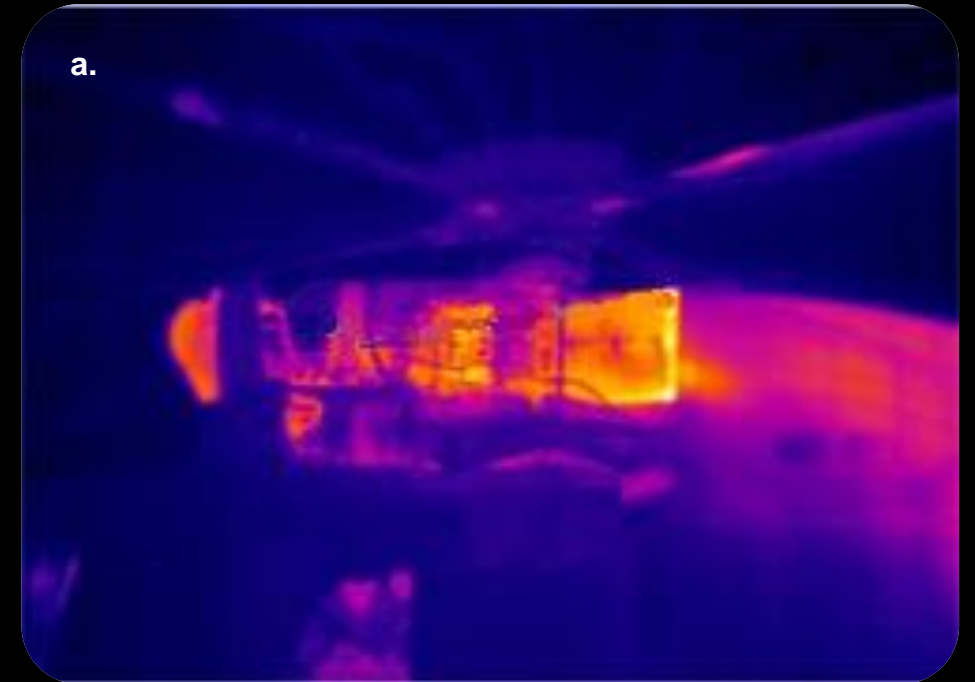
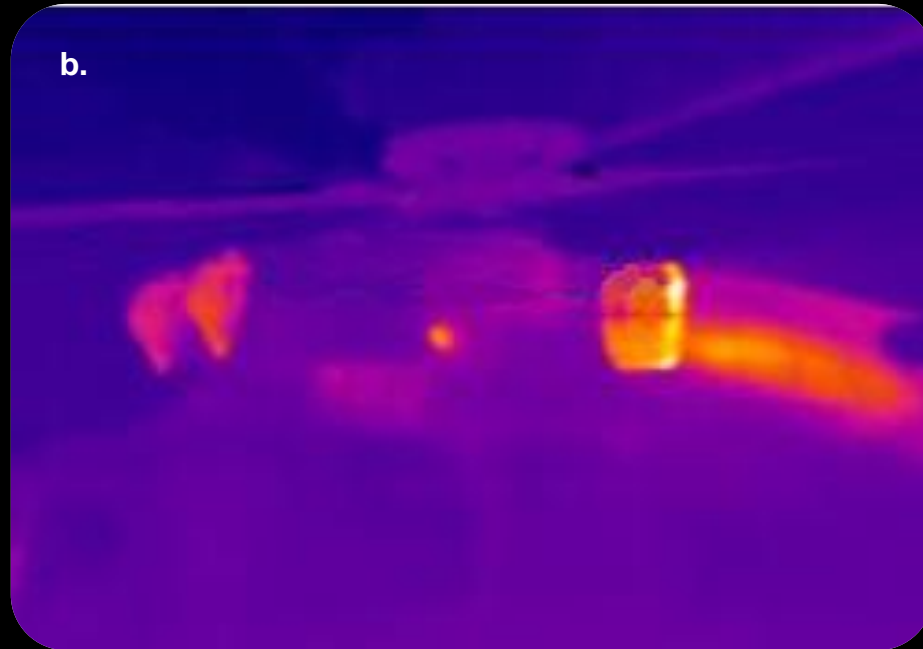
Typowe rozmieszczenie silników turbinowych we współczesnych śmigłowcach: a - w płaszczyznach podłużnych, b - w płaszczyznach poprzecznych



# OSŁONY I MODYFIKACJE GONDOLI

Silnik turbinowy PZL-10W zamontowany na śmigłowcu PZL W3 Sokół,  
a - z osłoną termiczną, b - bez osłony termicznej.

Odpowiednie umieszczenie silnika w konstrukcji kadłuba względem głównej osi wirnika jest ważne nie tylko dla procesu chłodzenia, ale także w celu zapewnienia płynnej pracy silnika.





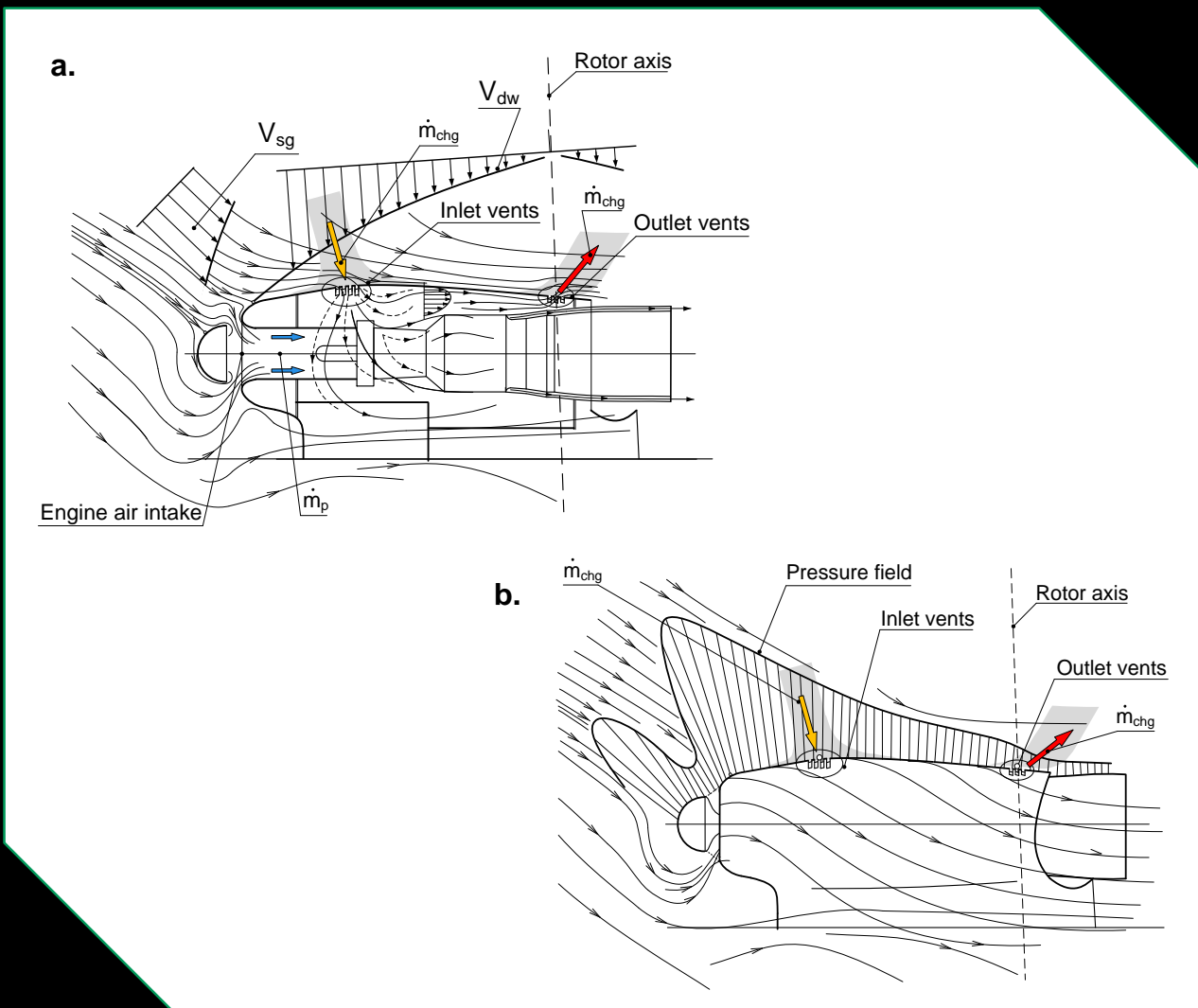
# OSŁONY I MODYFIKACJE GONDOLI

Oslony termiczne i gondole są systemami współpracującymi. Oslony termiczne są stosowane w większości silników w celu ochrony komponentów i nadwozia przed uszkodzeniem cieplnym, a gondole przed nagrzeniem. Oslony termiczne można podzielić na sztywne, elastyczne i tekstylne. Sztywne oslony termiczne są zwykle wykonane z aluminium, blachy aluminiowej lub innych kompozytów, z ceramiczną powłoką izolacji cieplnej. Elastyczna osłona termiczna jest zwykle wykonywana z cienkiej blachy aluminiowej, chociaż elastyczne oslony termiczne o wysokiej wydajności czasami zawierają dodatki, takie jak izolacja ceramiczna nakładana metodą natryskiwania plazmowego. Istnieją również tekstylne oslony termiczne służące do ochrony różnych elementów, takich jak przewody elektryczne czy układ paliwowy. Zwykle przestrzeń między silnikiem, a gondolą tworzy kanał przepływu dla powietrza chłodzącego silnik i układ wydechowy. Strumienie powietrza chłodzącego w wewnętrznych częściach silnika można generować na dwa sposoby:

1. Dodatkowym wentylatorem napędzonym z wału silnika - strumień powietrza wprowadzany jest do wnętrza układem kanałów
2. Poprzez zastosowanie nierównomiernego rozkładu prędkości i ciśnienia w strumieniu zawirnikowym.

Schemat przepływu wokół strefy gondoli z ekranem cieplnym w śmigłowcu PZL W-3 Sokół w locie poziomym:

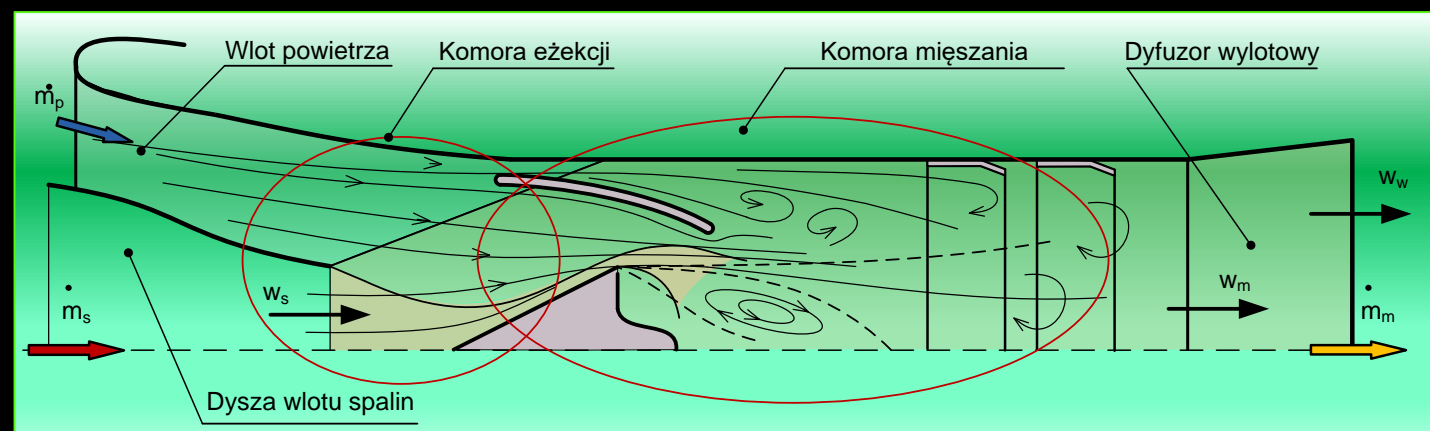
- a - przepływ powietrza chłodzącego w kanale gondoli,  
b - rozkład ciśnienia na powierzchni gondoli.



Projektując nowe typy śmigłowców, szczególnie do zastosowań bojowych, należy zwrócić ogromną uwagę na emisję w podczerwieni z części stałych tworzących konstrukcję śmigłowca, a także na spaliny odpływające z układu wydechowego silnika. Ze względu na wysoką temperaturę oraz znaczne ilości dwutlenku węgla i pary wodnej spaliny odprowadzane do otoczenia są głównym czynnikiem wpływającym na emisję promieniowania podczerwonego, a w konsekwencji wykrywalność śmigłowca wykonującego działania bojowe.

Jedną z metod ochrony śmigłowca w locie jest chłodzenie spalin emitowanych z silników do atmosfery w specjalnych wymiennikach ciepła. Obecnie proces ten realizowany jest w chłodnicach bezmembranowych, gdzie następuje silna wymiana ciepła i pędu pomiędzy gorącymi spalinami, a zimnym powietrzem atmosferycznym. Podczas mieszania oba czynniki wymieniają energię w przewodzie cieplnym, zmieniając swoją entalpię. Zmianie ulega również skład chemiczny spalin.

Schemat rozmieszczenia poszczególnych, charakterystycznych przestrzeni w eżekcyjnym schładzaczu spalin,  $\dot{m}_s$  - strumień masy spalin,  $\dot{m}_p$  - strumień masy powietrza,  $\dot{m}_m$  - strumień masy mieszaniny.





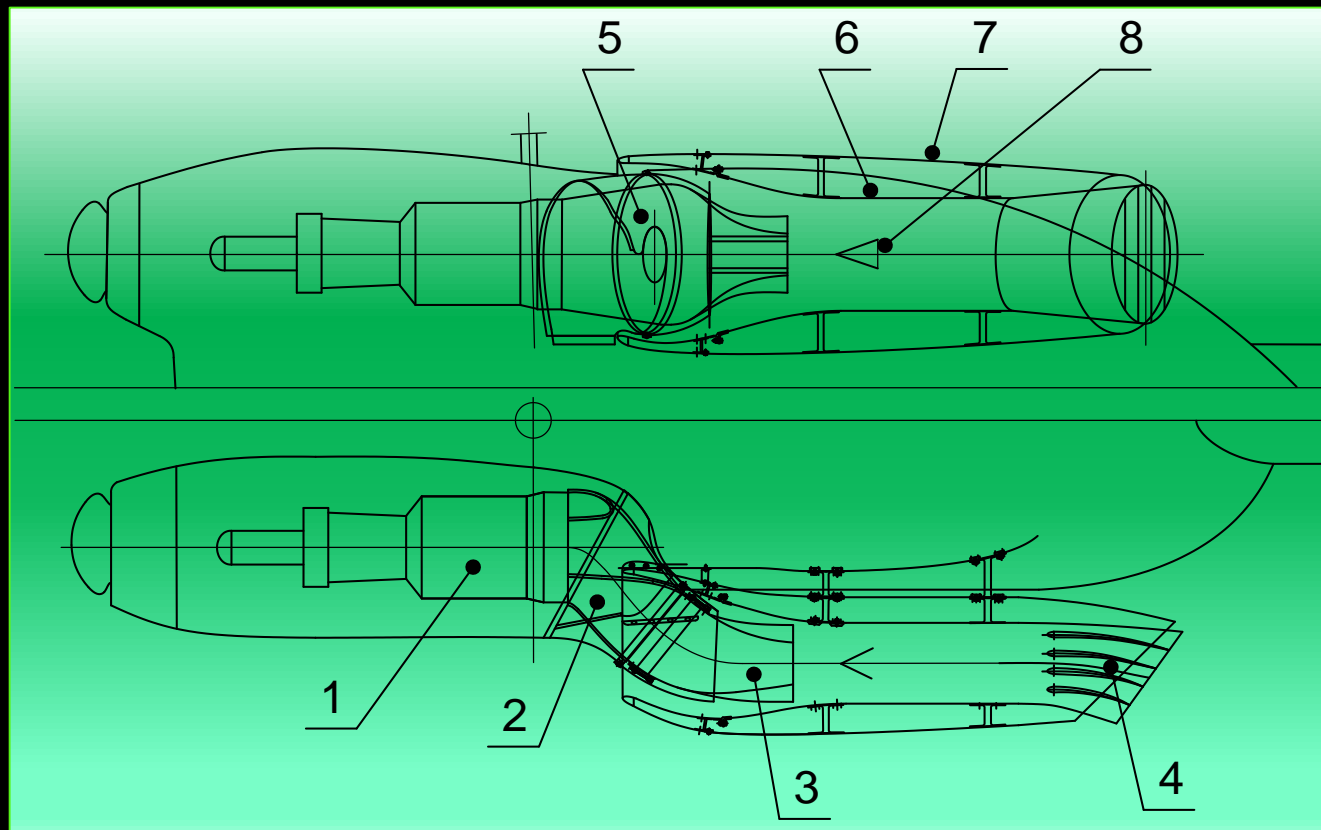
W lotnictwie wyróżnia się dwa rodzaje wymienników bezmembranowych, a mianowicie:

- wymienniki bezmembranowe, w których oba czynniki są wprowadzane do wspólnej komory mieszania przez urządzenia przepływowe takie jak pompy, wentylatory czy kompresory,
- wymienniki bezmembranowe, w których jeden z czynników (najczęściej chłodzący) jest wprowadzany do komory mieszania w wyniku zjawiska eżekcji wywołanego przepływem drugiego czynnika (chłodzonego).

Główną zaletą tego typu chłodnic jest duża intensywność wymiany ciepła, co pozwala na ograniczenie ich masy i wymiarów.

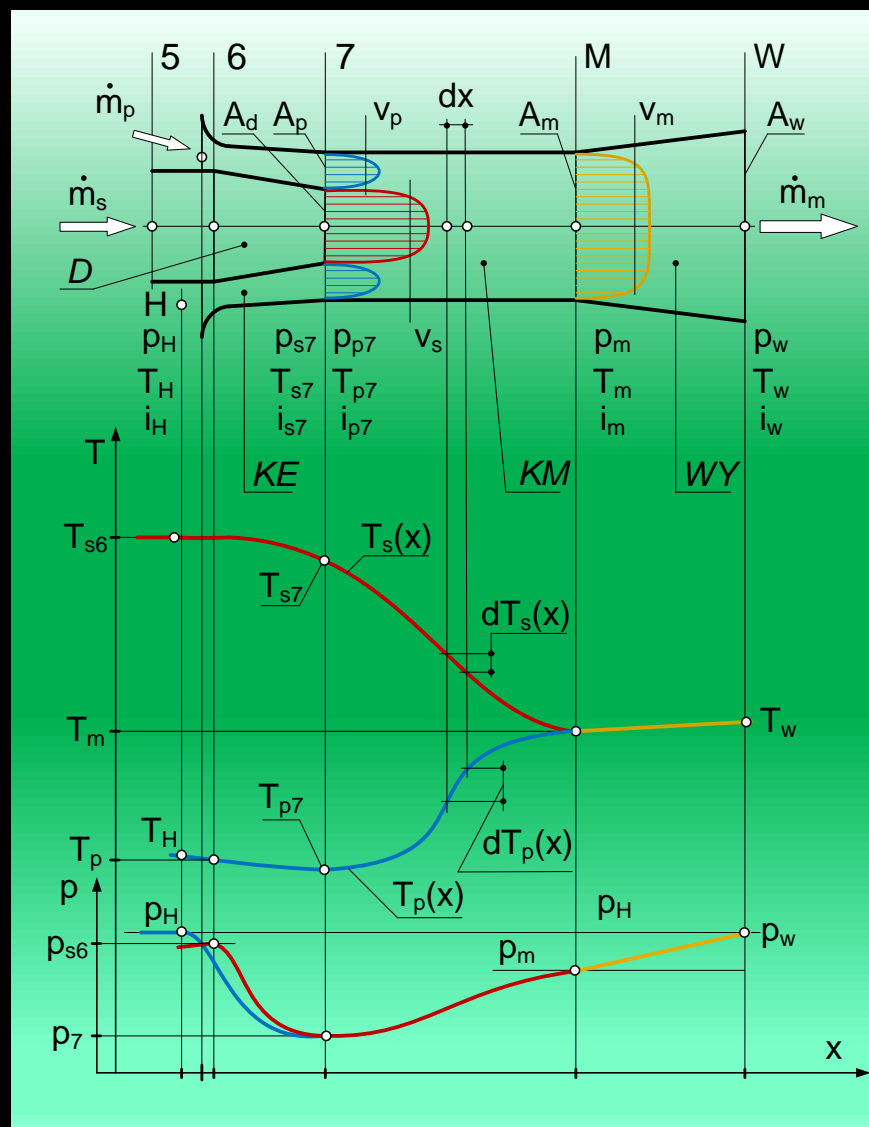
Widok schładzacza spalin przystosowanego do współpracy z silnikiem PZL 10W na pokładzie śmigłowca PZL W-3:

- 1 - silnik PZL 10W, 2 - zmodyfikowany dyfuzor spalin (od strony silnika), 3 - dysza wydechowa, 4 - dyfuzor schładzacza, 5 - osłona cieplna dyfuzora silnika, 6 - osłona wewnętrzna schładzacza, 7 - osłona termiczna zewnętrzna schładzacza, 8 - zawirywacz główny w komorze mieszania.



# SCHŁADZACZE SPALIN

W ujęciu ogólnych schładzacz spalin śmigłowca tworzy zmodyfikowany układ wydechowy silnika turbinowego, komora mieszania i dyfuzor końcowy. Spaliny wypływające z turbiny napędowej kierowane są przez dyfuzor do dyszy, gdzie ciśnienie statyczne jest obniżane poniżej ciśnienia atmosferycznego. W wyniku wzrostu prędkości, a co za tym idzie spadku ciśnienia statycznego spalin, następuje zasysanie strumienia zimnego powietrza do komory mieszania, gdzie dwa strumienie ulegają intensywnemu mieszaniu skutkującemu silną wymianą ciepła i pędu. W wyniku mieszania gorących spalin z zimnym powietrzem powstaje nowy strumień spalin o znacznie obniżonej temperaturze i zmienionym składzie chemicznym.



$\dot{m}_s$  – strumień spalin  
 $\dot{m}_p$  – strumień powietrza  
 $\dot{m}_m$  – strumień mieszaniny powietrze -  
spaliny  
KE – strefa eżekcji  
KM – strefa intensywnego mieszania  
WY – układ wylotowy





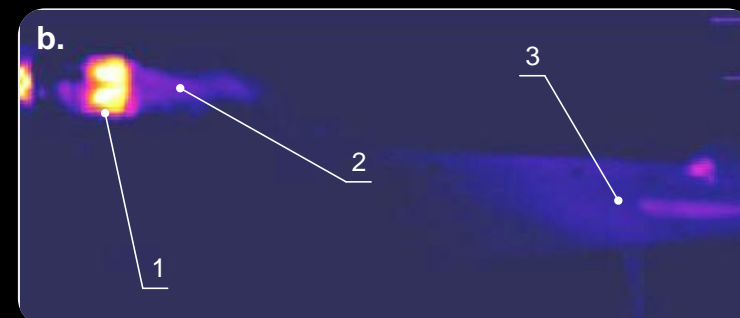
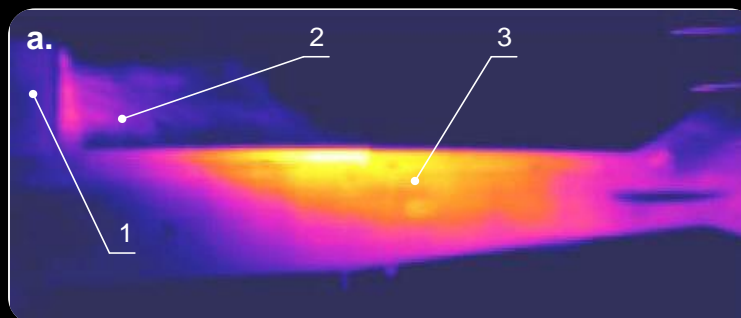
Innym przykładem bezmembranowego schładzacza spalin jest HIRSS (Hover InfraRed Suppression System), który został opracowany w celu ograniczenia emisji podczerwieni spalin z silników śmigłowcowych takich jak silnik General Electric T-700 stosowany w konstrukcjach takich jak Black Hawk UH-60, Apache AH-64 i AH-1.

System ogranicza emisję podczerwieni poprzez recyrkulację gorących spalin silnika i mieszanie ogrzanych gazów z otaczającym powietrzem przed ich odprowadzeniem do atmosfery.

Śmigłowiec Super Cobra:  
a - bez modyfikacji układu wydechowego,  
b - z układem HIRSS.



Belka ogonowa AH-1 Super Cobra w podczerwieni,  
a - bez modyfikacji układu wydechowego, b - z systemem HIRSS: 1 - dyfuzor spalin, 2 - spaliny, 3 - belka ogonowa

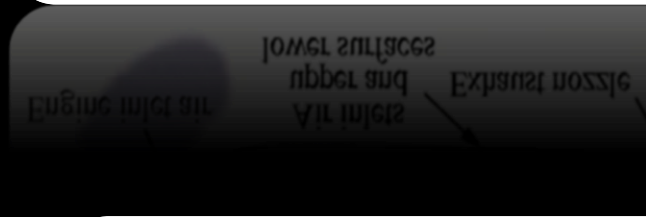
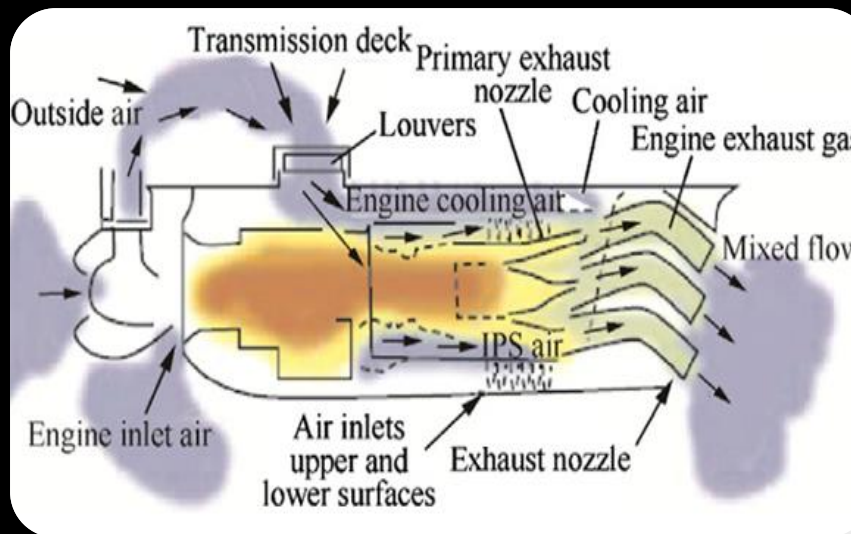


# SCHŁADZACZE SPALIN

Układ chłodzenia spalin w śmigłowcu AH-64 Apache zwany Black Hole również działa na zasadzie eżekcji powietrza atmosferycznego. BH to niedrogi system tłumienia podczerwieni bez ruchomych podzespołów.

Zasada działania tego układu polega na kierowaniu spalin z silnika przez specjalne kanały, które łączą strumień spalin z silnika ze strumieniem zimnego powietrza przepływającego nad śmigłowcem. Strumień świeżego powietrza równomiernie rozprasza gorące spaliny, które wydostają się z otworów wentylacyjnych. Również przed opuszczeniem systemu Black Hole mieszanina powietrza i spalin kierowana jest przez specjalną wkładkę wykonaną z materiału pochłaniającego ciepło.

Aby dodatkowo ograniczyć emisyjność śmigłowca, zasysane powietrze jest wykorzystywane zarówno do chłodzenia silników, jak i skrzyni biegów. Dysze wylotowe silnika są odchylone na zewnątrz od osi wzłużnej śmigłowca i są dodatkowo chłodzone przez strumień za wirnikowy (podczas zawisu w miejscu) lub turbulentnym strumieniem podczas lotu progresywnego.



System schładzania spalin w śmigłowcu AH-64 Apache,  
1 – silnik,  
2 – schładzacz spalin.





Najbardziej zaawansowanym na świecie śmigłowcem o niskiej wykrywalności jest prototyp RAH - 66 Comanche. Wykonany jest głównie z kompozytów i pokryty materiałami pochłaniającymi promieniowanie. Aby ograniczyć odbicie radaru, wszystkie kompozytowe boki kadłuba są płaskie i skośne, a dzięki zastosowaniu fasetowanej wieży i pokryw silnika unika się zaokrąglonych powierzchni. Śmigłowiec Comanche został wyposażony w innowacyjną metodę ograniczenia emisji podczerwieni, w której schładzacz spalin jest integralną częścią belki ogonowej. W rozwiązaniu tym wylot spalin umieszczony jest na całej długości belki ogonowej, zapewniając szybkie, pełne i efektywne mieszanie gorących spalin i zimnego powietrza ze strumienia zawirnikowego.

RCS Comanche'a był 360 razy mniejszy niż śmigłowca szturmowego AH-64 Apache. Z tego powodu szanse Comanche na wykrycie, śledzenie i zniszczenie przez pociski naprowadzające na ciepło są znikome. Dzięki tak efektywnemu systemowi chłodzenia spalin śmigłowiec nie potrzebuje aktywnego zakłóczacza w paśmie podczerwieni ani dodatkowych generatorów zakłóceń.



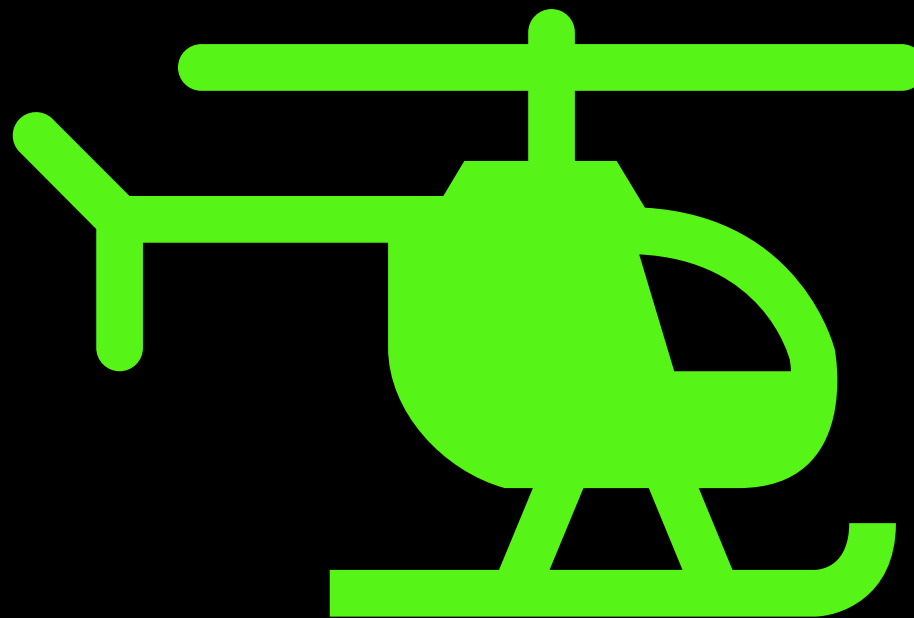
Prototyp RAH-66 Comanche w locie: 1 - wlot powietrza do silnika, 2 - wlot powietrza do schładzacza spalin, 3 - układ wydechowy.





Wykrycie śmigłowców na polu walki w znacznym stopniu zależy od poziomu jego emisji promieniowania podczerwonego, a także od metod, wyposażenia i systemów umożliwiających ich wykrycie przez wroga. Nowoczesne pociski rakietowe wyposażone w systemy naprowadzania poszukujące źródeł promieniowania podczerwonego są jednym z najważniejszych zagrożeń dla śmigłowców wykonujących misje bojowe. Systemy tłumienia podczerwieni zwiększają żywotność śmigłowców, zmniejszając możliwość namierzenia i zniszczenia przez systemy naprowadzane na podczerwień.

Ze względu na wysoką temperaturę chłodzenie spalin jest główną taktyką stosowaną w celu zmniejszenia emisji podczerwieni przez śmigłowiec w locie, ale najskuteczniejszą ochroną jest połączenie wszystkich technik, zarówno pasywnych, jak i aktywnych.



1. Fijałkowski S., 2008, „Performance model of turbine engine exhaust cooler in extreme conditions helicopter flights. Part 1. Identification of membranneless exhaust gas cooler interaction with the helicopter turbine engine”, Transactions of the Institute of Aviation 194-195 (in Polish).
2. Fijałkowski S., 2011, „The Experiment – Based Analysis of the Infrared Emission by a Helicopter in Flight Transactions of the Institute of Aviation 211 (in Polish).
3. Pan C., Zhang J., Shan Y., 2014, „Progress in helicopter infrared signature suppression”, Chinese Journal of Aeronautics 27(2): 189–199.
4. Mahulikar S.P., Rao G.A., Kolhe P.S., 2006, „Infrared signatures of low flying aircraft and their rear fuselage skin’s emissivity optimization”, J Aircraft; 43(1): 226–32.
5. Thompson J, Birk AM, Cunningham M., 1999, „Design of infrared signature suppressor for the Bell 205 (UH-1H) helicopters, Part I: aerothermal design”, Proceedings of seventh CASI propulsion symposium.
6. Vass S., 2003, „Stealth Technology Deployed in battlefield”, AARMS.
7. Zikidis K., Skondras A., Tokas C., 2014, „Low Observable Principles, Stealth Aircraft and Anti-Stealth Technologies”, Journal of Computations & Modelling, vol.4, no.1, 129-165.
8. Fijałkowski, S., 2011, „Identifying the Behaviour of a Jet Stream in the Environment After Leaving a Helicopter Engine Diffuser in Flight”, Transactions of the Institute of Aviation 219 (in Polish).
9. Fijałkowski S., Kania M., 2011, „Numerical Model of Exhaust Gases Expansion in Rotor Wake Vortex During Vertical Helicopter Flight”, Transactions of the Institute of Aviation 221 (in Polish).
10. Pan C., Zhang J., Shan Y., 2014, „Effects of rotor downwash on exhaust plume flow and helicopter infrared signature”, Applied Thermal Engineering 65(1–2): 135–149.



11. Groninga K., 2005, „Development and implementation of the H-1 turned exhaust system”, AHS Texas.
12. Fijałkowski S., 2013, „The Conditions for Cooling Termovision in the Turbine Engine Propulsion Helicopter in Varied Flight Conditions”, Transactions of the Institute of Aviation 230 (in Polish).
13. Szumański K., 2001, „Helicopters tests during extreme tasks”, Transactions of the Institute of Aviation 165-166 (in Polish).
14. Fijałkowski S., „The Impact of the Change in the Geometry of an Exhaust Gas Outlet Manifold on the Operation of a Helicopter Turbine Engine”, Transactions of the Institute of Aviation 219 (in Polish).
15. Fijałkowski S., Wójcik P., 2008, „Performance model of turbine engine exhaust cooler in extreme conditions helicopter flights. Part 2. Performance simulation of exhaust cooler in helicopter flight extreme conditions”, Transactions of the Institute of Aviation 194-195 (in Polish).
16. Kuck K., 2005, „Commercial Operations and Support Saving Initiative for the OH-58D Kiowa Warrior”, AHS Texas.
17. Barlow B., Petach A., 1977, „Advanced design infrared suppressor for turbo-shaft engines,” Proceedings of the 33rd annual national forum of the American helicopter society.
18. Butowski P., Gruszyński J., Fiszer M., 2006, „Śmigłowiec bojowy Mi-24”, Wydawnictwo Magnum X, Warszawa.
19. Bonds R., Miller D., 2002, „Boeing Sikorsky RAH-66 Comanche”, Illustrated Directory of Modern American Weapons. Grand Rapids, Michigan.
20. Siuru W., Busick J.D., (1993). "Future Flight: The Next Generation of Aircraft Technology", McGraw-Hill Professional





# DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ !!!

*Współczesne metody ograniczania emisji podczzerwieni  
emitowanej przez śmigłowiec w locie*

POLITECHNIKA LUBELSKA  
Katedra Termodynamiki, Mechaniki Płynów  
i Napędów Lotniczych  
dr inż. Grzegorz Barański  
mgr inż. Mateusz Paszko

---

Projekt „ Politechnika Lubelska – Regionalna Inicjatywa Doskonałości”  
– finansowany ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego



Ministerstwo  
Nauki  
i Szkolnictwa  
Wyższego

