

ZJAWISKO OBLODZENIA W UKŁADZIE ZASILANIA SILNIKA LOTNICZEGO LEKKIEGO SAMOLOTU

CZĘŚĆ 2

Jan WEINAR

Zenon BONCA

Wydział Mechaniczny
POLITECHNIKA GDAŃSKA

3. OBLODZENIE W UKŁADZIE ZASILANIA SILNIKA – OBLODZENIE GAŹNIKA

3.1 Oblodzenie w układzie zasilania

Jak już wspomniano w części pierwszej artykułu, oblodzenie w układzie zasilania silnika jest przyczyną ponad połowy wypadków lotniczych związanych z tym zjawiskiem. Najwrażliwszym na oblodzenie elementem tego układu jest gaźnik (głównie ze względu na bardzo szeroki zakres warunków w jakich oblodzenie to może występować), jednak również inne elementy wymagają szczególnej uwagi podczas lotów tzw. „zimowych”. Ponieważ problemem powstawania lodu w gaźniku silnika lotniczego zostanie omówiony szerzej w dalszej części publikacji, tutaj zwrócona zostanie uwaga na kilka charakterystycznych problemów, jakie mogą powstać w niektórych elementach instalacji zasilającej silnik w paliwo.

Niezwykle ważne podczas lotów w niskich temperaturach jest sprawdzenie (jeszcze przed startem) odpowiedników zbiorników paliwa (muszą być drożne!), w przeciwnym razie w miejscu po zużytym paliwie wytworzyć się może podciśnienie, które zatrzyma dopływ paliwa do silnika. Kryształki lodu mogą pojawić się też w odstojnikach paliwa. Złanie odstojników przed lotem zapobiegnie „wędrowaniu” tych kryształków w układzie paliwowym. Zaleca się również, aby w zimie zbiorniki paliwa utrzymywać w stanie napełnionym, przez co ogranicza się możliwość skraplania się pary wodnej w powietrzu znajdu-

jącym się nad powierzchnią paliwa. Przy dużych wahaniami temperatury i wilgotności jest to zjawisko nieuniknione i dlatego trzeba bardzo rygorystycznie przestrzegać zlewania paliwa przed lotem ze wszystkich punktów drenażowych instalacji paliwowej.

3.2 Oblodzenie gaźnika – podstawy fizyczne i warunki powstawania

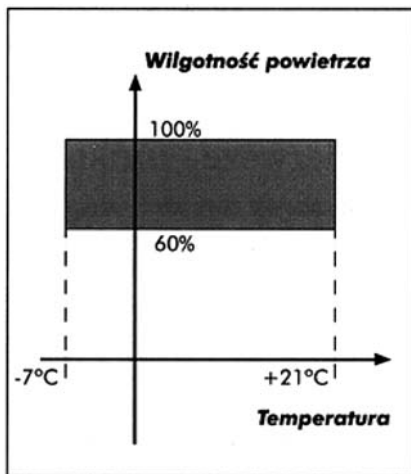
Oblodzenie wewnątrz gaźnika jest zjawiskiem nieco odmiennym niż omawiane do tej pory oblodzenie strukturalne (płatowca), tj. tworzące się na powierzchniach zewnętrznych samolotu lecącego w chmurze lub opadzie przy ujemnej temperaturze i odpowiednio wysokiej wilgotności (wodności chmury). Cechą oblodzenia w gaźniku

jest to, że w wyniku zachodzących tam procesów termodynamicznych, temperatura wewnątrz może spaść poniżej 0°C nawet w letni dzień! Na rysunku 15 przedstawiającym korpus gaźnika zasilającego silnik do motolotni widać wyraźnie, że spadek temperatury wewnątrz gaźnika przyczynił się nawet do powstania szronu na fragmentach jego wewnętrznych ścianek.

W praktyce przyjmuje się pewną obwiednię warunków atmosferycznych, w których pilot powinien zwrócić szczególną uwagę na możliwość powstania lodu wewnątrz gaźnika. Warunki te, to duża wilgotność względna powietrza – powyżej 60 % (czasami przyjmuje się 50 %) i zakres temperatury od -7°C do 21°C (rys.



Rys. 15. Korpus gaźnika lekkiego silnika lotniczego pokryty warstwą szronu



Rys. 16. Zakres warunków atmosferycznych sprzyjających oblodzeniu gaźnika [8]

16). Oczywiście poza tym zawsze należy spodziewać się oblodzenia w gaźniku podczas lotu w chmurze lub w opadzie.

Przepływająca przez gardziel gaźnika mieszanka paliwowa – powietrzna, na skutek rozprężania w dyfuzorze oraz za przepustnicą, podlega znacznemu ochłodzeniu. Dodatkowe ciepło pobierane jest od niej przez odparowujące wewnątrz kanału gaźnika paliwo. Odparowywanie paliwa (a zatem i pobieranie ciepła) jest najintensywniejsze w miejscach przewężenia przepływu (w gardzieli i szczelinach między przepustnicą a kanałem gaźnika), czyli tam, gdzie prędkość przepływu jest największa a ciśnienie spada. Dodatkowo, im przepustnica jest bardziej przymknięta, tym większy jest w tym miejscu spadek ciśnienia (nawet o 0,035 MPa i więcej [10]), czyli bardziej intensywne odparowanie paliwa (jeszcze niższa temperatura wewnątrz). Przy dużej wilgotności względnej powietrza (>50 %), temperatura w tych szczególnych miejscach w gaźniku spaść może poniżej temperatury punktu rosy (rys. 18 i 26) - spowoduje to wykroplenie się wody na ściankach i na przepustnicy gaźnika - a nawet poniżej 0°C, co powodować będzie zamarzanie kropelek wody i osadzanie się lodu w tych miejscach (rys. 17 i 20).

Duże znaczenie ma tutaj ilość ciepła jaką pobiera gaźnik od silnika (zależy to od rozwiązania konstrukcyjnego układu zasilania i silnika – rys. 21).

Lód w gaźnikach tworzy się nie tylko na ściankach dyfuzora i na przepustnicy. Przy bardziej „zimowych” warunkach powstaje on również w załamaniach kanału dolotowego powietrza do gaźnika (przechłodzone krople wody zamarzają bardzo szybko w kontakcie z metalem), co pokazuje rysunek 17.

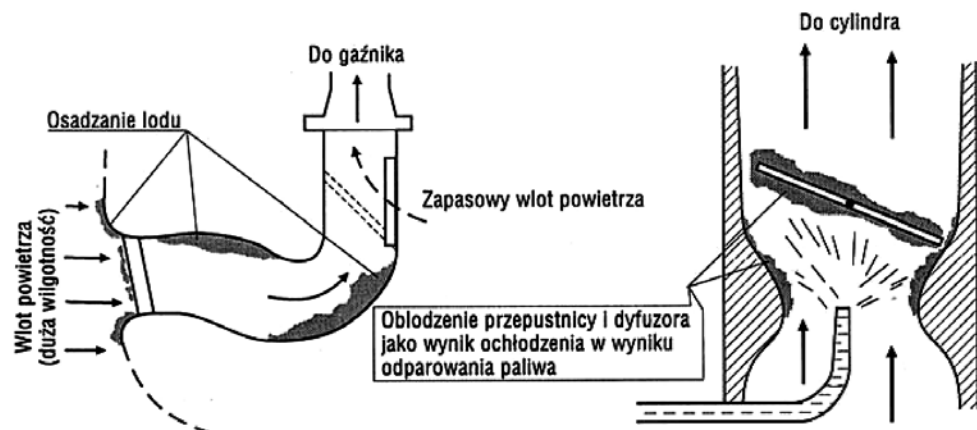
Informację o możliwości powstania oblodzenia wewnątrz gaźnika niesie wiedza na temat wilgotności względnej powietrza oraz jego temperatury i temperatury punktu rosy. Na rysunku 18 przedstawione są warunki, w jakich może dochodzić do oblodzenia gaźnika. Z wykresu tego widać, że przy odpowiednio dużej wilgotności powietrza (ok. 50 %), silne oblodzenie gaźnika możliwe jest nawet przy temperaturze powyżej 30°C. Wykres ten podpowiada również, że jednym z możliwych działań pozwalających zmniejszyć ryzyko silnego oblodzenia w gaźniku (a tym samym spadek mocy, a nawet przerwę w pracy silnika) jest zwiększenie obrotów. Natomiast gdy trzeba zmniejszyć moc silnika (np. podczas schodzenia do lądowania), wówczas należy, ze względu na większe ryzyko wystąpienia oblodzenia, włączyć system ogrzewania gaźnika. Kolejną ważną informacją, jaką można odczytać z wykresu jest to, że poniżej temperatury powietrza -5°C ryzyko jakiegokolwiek oblodzenia gaźnika jest znikome.

Ponieważ większość lekkich sa-

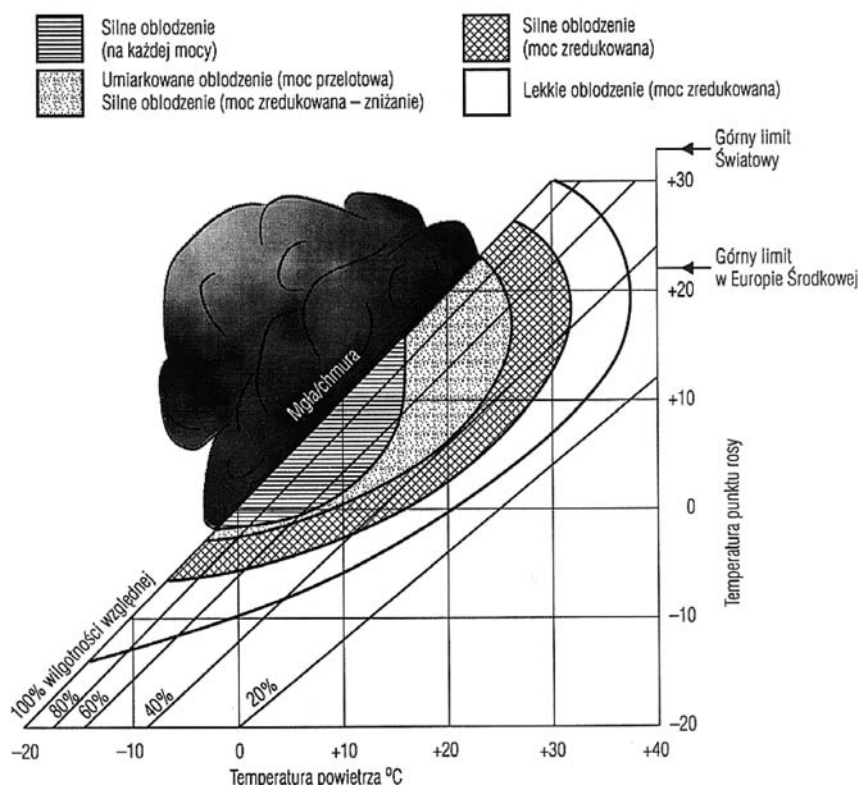
molotów wykorzystywanych np. w aeroklubach do szkolenia, to samoloty typu Cessna, które wyposażone są w silniki firm Lycoming lub Continental w układzie bokser (razem ok. 80 % wszystkich silników tego typu), zasilane gaźnikiem pływakowym górnośącym, takim jak pokazany na rys. 19 i 21 (gaźnik Marvel-Schebler), w związku z tym szerzej omówione zostanie oblodzenie właśnie w gaźnikach tego typu. Na rysunku 20 widać ogólny schemat takiego gaźnika w przekroju z zaznaczonymi miejscami, w których osadza się lód (na niebiesko). Według biuletynu bezpieczeństwa wydane-go przez Cessna Aircraft Company [8], temperatura w gaźniku w wyniku opisanych wyżej zjawisk spaść może nawet o 33 K względem temperatury otoczenia, a więc nawet w upalny dzień może tam panować temperatura bliska temperatury zamarzania wody.

Obliczenia teoretyczne wykazują, że dla mieszanki stechiometrycznej (wagowo 1:14,7) pobranie samego ciepła odparowania paliwa może obniżyć temperaturę w gaźniku o 4,5 K [10]. Dla mieszanki paliwowo – powietrznej bogatej (~1:12) – zazwyczaj na takiej mieszance wykonuje się większość lotu – nawet więcej. Według publikacji Lycominga, zakres temperatury powietrza zewnętrznego, w której może się tworzyć lód w gaźniku tego typu wynosi od ok. -7°C do ok. 33°C [10], co pozostaje w dobrej zgodności z poprzednio podanymi zakresami temperatury.

Na rysunku 21 pokazano zabudowę oraz szczegóły konstrukcyjne gaźnika typu Marvel – Schebler w



Rys. 17. Miejsca powstawania oblodzenia w gaźniku [2]



Rys. 18. Warunki powstawania oblodzenia w gaźniku [1]



Rys. 19. Gaźnik typu Marvel – Schebler, widoczna przepustnica oraz zespół dysz wraz z rozpylaczem paliwa



Rys. 20. Schemat gaźnika Marvel z zaznaczonymi miejscami osadzania się lodu [9]

silnika Lycoming. W tym miejscu warto zauważyć, w jaki sposób zakłady Lycoming w odróżnieniu od firmy Continental, rozwiązały zabudowę tego gaźnika, w celu zwiększenia odporności układu zasilania na zjawisko

oblodzenia. Korpus gaźnika zamontowany jest bezpośrednio do miski olejowej (w której znajduje się oczywiście gorący olej z silnika), sama mieszanka natomiast po opuszczeniu gaźnika przepływa kanałem poprzez

tą miskę do kolektorów wlotowych. Dodatkowo gaźnik znajduje się tuż za tłumikiem gazów wylotowych z silnika. Wszystko to sprawia, że korpus gaźnika przejmuje znaczną ilość ciepła od silnika i w konsekwencji jest mniej wrażliwy na oblodzenie.

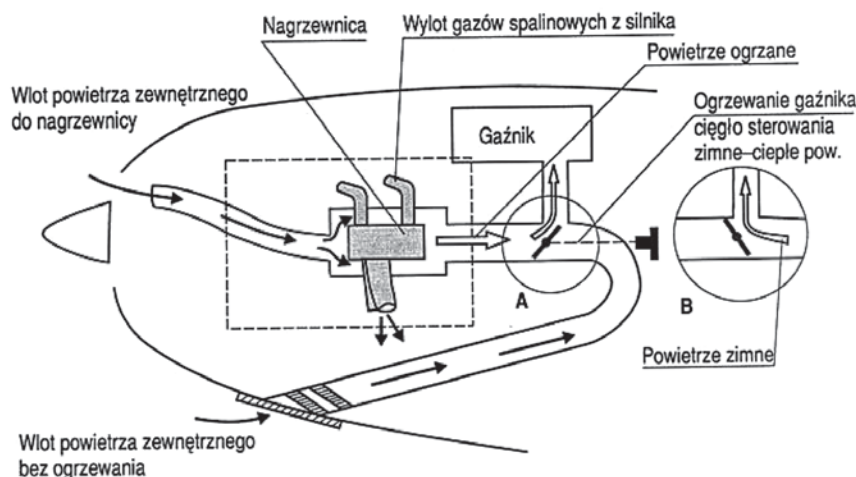
3.3 Identyfikacja zagrożenia oblodzeniem w gaźniku i możliwości przeciwdziałania przez załogę

Bardzo ważną cechą oblodzenia gaźnika, decydującą w ocenie zagrożenia bezpieczeństwa lotu, jest „podstępny” charakter pojawiania się tego zjawiska. Oblodzenie gaźnika pojawia się początkowo w sposób niezauważalny, a dopiero po pewnym czasie (zależnym od konstrukcji układu zasilania i intensywności oblodzenia) można zauważyć jego objawy w postaci, bądź nierównomiernej pracy silnika, bądź stopniowego, początkowo delikatnego zmniejszania się jego obrotów o ok. 150–300 obr/min (w samolotach ze stałym śmigłem) lub ciśnienia ładowania (w samolotach ze śmigłem stałobrotowym), a w konsekwencji prędkości samolotu przy nie zmienionym położeniu dźwigni przepustnicy. Brak właściwej reakcji ze strony pilota na takie objawy (włączenie podgrzewania gaźnika i możliwie najszybsze opuszczenie strefy, w której zjawisko wystąpiło), może być nawet przyczyną zatrzymania silnika.

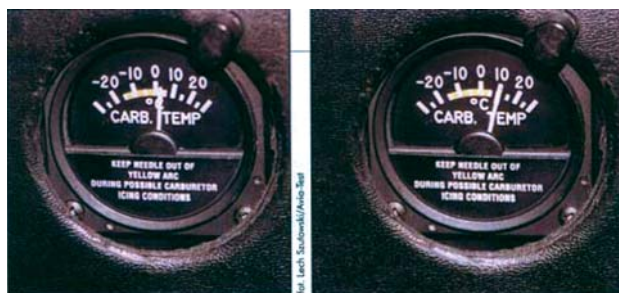
Jak już wspomniano, podstawowym narzędziem do eliminowania lodu z gaźnika jest instalacja jego ogrzewania. W tego rodzaju systemach podgrzewane są zazwyczaj dyfuzory gaźników poprzez wykorzystanie gorącego oleju z instalacji olejowej silnika lub gorących spalin. W mniejszych samolotach dominują jednak rozwiązania prostsze, takie jak podgrzewanie powietrza dostarczanego do gaźnika. Przykład takiego rozwiązania przedstawiony jest schematycznie na rysunku 22, na którym widać, że podstawowymi elementami takiego układu są nagrzewnica oddająca ciepło gorących spalin z silnika do dostarczanego powietrza oraz klapka kierująca do gaźnika powietrze zimne lub gorące, sterowana oczywiście przez pilota z kabiny.



Rys. 21. Zabudowa i szczegóły konstrukcyjne gaźnika typu Marvel na silniku Lycoming



Rys. 22. System ogrzewania gaźnika [3]



Rys. 23. Wskaźnik temperatury gaźnika [6]

mieszanki wynosi od +5 do +20°C, natomiast w wyniku podgrzewania powietrza dostarczanego do gaźnika przez nagrzewnicę, jej temperatura w gaźniku może osiągać ok. 40°C.

Należy pamiętać również o tym, że ogrzewanie gaźnika nie powinno być używane na ziemi, gdyż zwykle układ dostarczania ciepłego powietrza do gaźnika pozbawiony jest filtra powietrza (rys. 22) – stąd możliwość dostania się do cylindrów drobnych zanieczyszczeń. Gdy już zaistnieje konieczność użycia „podgrzewu” na ziemi – najlepiej zrobić to na możliwie czystej, utwardzonej nawierzchni.

Podstawowym przyrządem, dzięki któremu można ocenić zagrożenie wystąpienia oblodzenia w gaźniku, a dzięki temu zapobiegać utracie mocy przez silnik w wyniku odkładania się lodu, jest pokazany na rysunku 23 wskaźnik temperatury gaźnika. Pilot widząc, że temperatura gaźnika zbliża się do 0°C (do żółtego paska), włącza „podgrzew” i dzięki temu niebezpieczeństwo oblodzenia jest zazwyczaj zażegnane. Dodatkowo, mając taki wskaźnik, można się również posługiwać pośrednimi położeniami dźwigni podgrzewu. Gdy jednak samolot nie jest wyposażony w ten prosty przyrząd, pilot stosownie do panujących warunków atmosferycznych (rys. 18) i doświadczenia, powinien okresowo (co kilka, kilkanaście minut) włączać „podgrzew” podczas lotu. Oprócz tego, każdorazowo podczas zniżania na zdławionych obrotach silnika (np. podczas schodzenia do lądowania) należy wyciągnąć dźwignię ogrzewania gaźnika w położenie robocze.

3.4 Szacunkowe obliczenia termodynamiczne

Ponieważ zjawiska i przemiany termodynamiczne zachodzące podczas przepływu powietrza i paliwa przez gaźnik są bardzo złożone, korzystając z podstawowych zależności, można oszacować, jak bardzo może spaść temperatura w gaźniku typu Marvel-Schebler (podczas przepływu i rozprężania mieszanki w dyfuzorze i za przepustnicą) przy kilku wybranych wyjściowych

Natychmiastowe włączenie tzw. „podgrzewu” nie zawsze musi od razu poprawić pracę silnika, często zdarza się, że na krótki czas nawet ją pogarsza - wynika to z dostarczania do silnika wody ze stopionego w gaźniku lodu. Należy również pamiętać o tym, że podgrzewanie mieszanki paliwowo

– powietrznej prowadzi do zmniejszenia mocy silnika o 10-20 %, co jest szczególnie ważne podczas manewrów, w których należy mieć możliwość dysponowania możliwie maksymalnym nadmiarem mocy, czyli głównie startu i końcowego podejścia do lądowania. Zalecana temperatura

parametrach powietrza (temperatura i wilgotność) oraz prędkości obrotowej silnika (pełna moc i moc zdławiona). Można również wyznaczyć przybliżoną ilość możliwej do wydzielenia się w danych warunkach pary wodnej/ lodu na ściankach gaźnika.

STRATY CIŚNIENIA W GAŹNIKU

Jedną z podstawowych danych potrzebnych do przeprowadzenia obliczeń jest spadek ciśnienia w gardzieli (przy pełnym otwarciu przepustnicy – pełnej mocy silnika), oraz podczas przepływu przez przymkniętą przepustnicę (obroty jałowe) – w tej sytuacji spadek ciśnienia jest dużo większy i odgrywać będzie decydującą rolę w obniżeniu temperatury i osadzeniu się lodu w gaźniku. Wartości te przyjęto na podstawie dostępnych danych źródłowych.

- Ciśnienie powietrza w dyszy gaźnika przy pełnym otwarciu przepustnicy [11]:

$$p_d = 26 \text{ [inHg]} = 88,05 \text{ [kPa]}$$

- Spadek ciśnienia w dyszy (założono ciśnienie atmosferyczne $p_{atm} = 101,3 \text{ [kPa]}$):

$$\Delta p_d = p_{atm} - p_d = 13,25 \text{ [kPa]}$$

- Możliwy spadek ciśnienia mieszanki podczas przepływu przez przymkniętą przepustnicę [10]:

$$\Delta p_p = 35 \text{ [kPa]}$$

- Ciśnienie w gaźniku:

$$p_p = p_{atm} - \Delta p_p = 66,3 \text{ [kPa]}$$

MAKSYMALNA MOC SILNIKA (pełne otwarcie przepustnicy)

Prędkość oraz przybliżona wartość strumienia masy powietrza przepływającego przez gaźnik podczas pracy silnika na pełnej mocy

- Prędkość powietrza przepływającego przez gardziel:

$$w = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_d}{\rho_p}} = 147,1 \text{ [m/s]}$$



Rys. 24. Widok układu podwójnej dyszy w gaźniku Marvel [11]

- Strumień masy dla powietrza o założonej wilgotności względnej $\varphi = 60\%$ i temperaturze $t = 15^\circ\text{C}$:

$$\dot{m}_1 = 0,073 \text{ [kg/s]}$$

Spadek temperatury powietrza przepływającego przez dysze przy pełnym otwarciu przepustnicy

- Temperatura początkowa powietrza:

$$t_1 = 20^\circ\text{C}, t_2 = 15^\circ\text{C}, t_3 = 10^\circ\text{C}$$

Korzystając z zależności pomiędzy temperaturą a ciśnieniem podczas przemiany adiabatycznej (przepływ powietrza przez gaźnik można w przybliżeniu traktować jako przemianę adiabatyczną ze względu na dużą szybkość przepływu czynnika) można wyznaczyć szukane temperatury:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

gdzie:

T_1, T_2, P_1, P_2 - odpowiednio temperatury (w Kelwinach) i ciśnienia początkowe i końcowe,

$\kappa \approx 1,4 \text{ [kJ/kgK]}$ - wykładnik izentropy dla powietrza wilgotnego w temperaturze 0°C .

Powyższy wykładnik κ dla gazów doskonałych (w przybliżeniu można traktować powietrze jako gaz półdoskonały) wyraża się stosunkiem ciepła

właściwych przy stałym ciśnieniu i przy stałej objętości, które zmieniają się wraz ze wzrostem temperatury:

$$\kappa = \frac{c_p(T)}{c_v(T)}$$

a zatem sam wykładnik również jest funkcją temperatury ($\kappa = \kappa(T)$). Zmiany jego wartości są jednak na tyle niewielkie, że nie popełniając dużego błędu, można do obliczeń przyjąć podaną wyżej wartość.

W celu określenia końcowej temperatury panującej w dyfuzorze (bądź za przepustnicą), należy uwzględnić również tak ważny czynnik, jak spadek temperatury w wyniku odparowania zassanego w dyszy paliwa. Według dostępnych informacji [10], ciepło pobrane na odparowanie paliwa w gaźniku, może obniżyć temperaturę mieszanki o ok. $\Delta T \approx 4,5 \text{ K}$, a nawet więcej. Ostatecznie zależność, na podstawie której można wyznaczyć w przybliżeniu temperaturę końcową, przybierze następującą postać:

$$T_k = T_{1,2,3} \cdot \left(\frac{P_d}{P_{atm}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - \Delta T_{op}$$

- Dla temperatury początkowej $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ($T_1 = 293,15 \text{ K}$):

$$T_{k20} = T_1 \cdot \left(\frac{P_d}{P_{atm}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - \Delta T_{op} = 277,14 \text{ K}$$

$$t_{k20} \approx 4^\circ\text{C}$$

- Dla $t_2 = 15^\circ\text{C}$ ($T_2 = 288,15\text{ K}$):

$$T_{k15} = T_2 \cdot \left(\frac{p_d}{p_{atm}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - \Delta T_{op} = \underline{272,34\text{ K}}$$

$$t_{k15} \approx -0,8^\circ\text{C}$$

- Dla $t_2 = 10^\circ\text{C}$ ($T_2 = 283,15\text{ K}$):

$$T_{k10} = T_3 \cdot \left(\frac{p_d}{p_{atm}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - \Delta T_{op} = \underline{267,53\text{ K}}$$

$$t_{k10} \approx -5,6^\circ\text{C}$$

Ilość wykroplonej pary wodnej (ilość potencjalnie wytworzonego lodu)

Jak widać z powyższych wyliczeń, już przy temperaturze powietrza $t_2 \approx -15^\circ\text{C}$ możliwe jest osiągnięcie w dyfuzorze gaźnika temperatury ujemnej, a co za tym idzie, wykroplona para wodna z wilgotnego powietrza będzie zamarzać w kontakcie z jego ściankami. Ilość możliwej do wykroplenia pary wodnej wyznaczono dla tej temperatury oraz dla trzech wartości wilgotności powietrza: $\varphi_1 = 40\%$, $\varphi_2 = 60\%$, $\varphi_3 = 80\%$. Szukane wielkości wyznaczyć można z następującej zależności:

$$\Delta \dot{m}_p = \dot{m}_g \cdot \Delta X,$$

gdzie:

\dot{m}_g [kg/s] - masa gazu suchego, $\Delta X = X_{15} - X_{max0}$ [g/kg] - różnica między daną zawartością wilgoci a maksymalną zawartością wilgoci dla określonej temperatury (w tym przypadku dla temperatury 0°C),

która opisuje ilość wykroplonej pary wodnej podczas objętościowego oziębiania powietrza wilgotnego (rys. 25).

Wartości zawartości wilgoci X_{15} i X_{max0} dla danej temperatury i wilgotności względnej, odczytać można z tablic [7] lub z wykresu $h - X$ (wykresu Moillera) dla powietrza wilgotnego pod ciśnieniem atmosferycznym.

- Wilgotność względna $\varphi_1 = 40\%$:

$$\Delta \dot{m}_{p1} = \dot{m}_{g1} \cdot \Delta X_1 = 0,12 \text{ [g/s]}$$

$$\Delta \dot{m}_{p1} \approx 7 \text{ [g/min]}$$

- Wilgotność względna $\varphi_1 = 60\%$:

$$\Delta \dot{m}_{p2} = \dot{m}_{g2} \cdot \Delta X_2 = 0,192 \text{ [g/s]}$$

$$\Delta \dot{m}_{p2} \approx 11,5 \text{ [g/min]}$$

- Wilgotność względna $\varphi_1 = 80\%$:

$$\Delta \dot{m}_{p3} = \dot{m}_{g3} \cdot \Delta X_3 = 0,334 \text{ [g/s]}$$

$$\Delta \dot{m}_{p3} \approx 20 \text{ [g/min]}$$

ZREDUKOWANA MOC SILNIKA

(przepustnica przymknięta)

Przybliżona wartość strumienia masy powietrza przepływającego przez gaźnik

Na podstawie obliczeń wykonanych dla silnika R-R Continental 0-200 A [12] przyjęto:

$$\dot{m}_r \approx 0,03 \text{ [kg/s]}$$

Spadek temperatury powietrza przepływającego przez przymkniętą przepustnicę

Ponieważ silnik pracuje na zredukowanych obrotach, a zatem zużywa dużo mniej paliwa (ok. dwukrotnie mniej), stąd też należy zmniejszyć

udział ciepła odparowania paliwa w obniżeniu temperatury w kanale gaźnika – przyjęto:

$$\Delta T_{opr} = \frac{\Delta T_{op}}{2}$$

- Dla temperatury początkowej $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ($T_1 = 293,15\text{ K}$):

$$T_{k20r} = T_1 \cdot \left(\frac{p_p}{p_{atm}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - \frac{\Delta T_{op}}{2} = \underline{257,5\text{ K}}$$

$$t_{k20r} \approx -15,7^\circ\text{C}$$

- Dla $t_4 = 30^\circ\text{C}$ ($T_4 = 303,15\text{ K}$):

$$T_{k30r} = T_4 \cdot \left(\frac{p_p}{p_{atm}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - \frac{\Delta T_{op}}{2} = \underline{266,3\text{ K}}$$

$$t_{k30r} \approx -6,8^\circ\text{C}$$

- Dla $t_5 = 35^\circ\text{C}$ ($T_5 = 308,15\text{ K}$):

$$T_{k35r} = T_5 \cdot \left(\frac{p_p}{p_{atm}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - \frac{\Delta T_{op}}{2} = \underline{270,8\text{ K}}$$

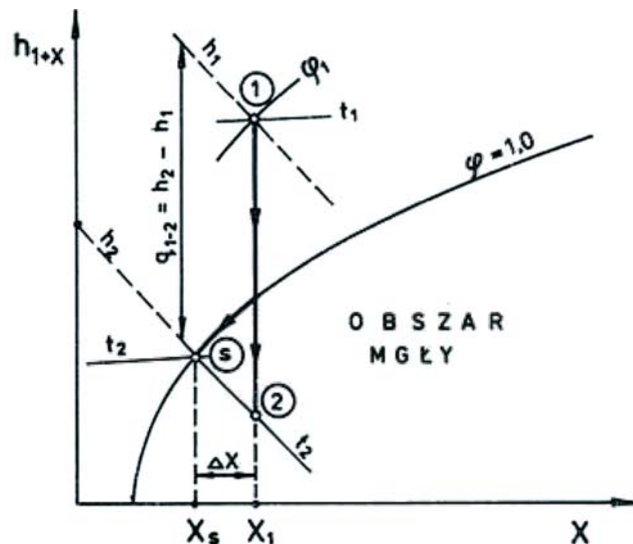
$$t_{k35r} \approx -2,3^\circ\text{C}$$

- Dla $t_6 = 40^\circ\text{C}$ ($T_6 = 313,15\text{ K}$):

$$T_{k40r} = T_6 \cdot \left(\frac{p_p}{p_{atm}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - \frac{\Delta T_{op}}{2} = \underline{275,2\text{ K}}$$

$$t_{k40r} \approx 2^\circ\text{C}$$

Jak widać z powyższych szacunko-



Rys. 25. Oziębianie objętościowe na wykresie $h - X$ [5]

wych wyliczeń, ryzyko oblodzenia gaźnika na mocy zredukowanej zanika dopiero przy temperaturze powietrza w granicach 40°C, co odpowiada wartości naniesionej na rysunku 18.

Ilość wykroplonej pary wodnej (ilość potencjalnie wytworzonego lodu)

- Wilgotność względna $\phi_1 = 40\%$, temperatura powietrza $t_3 = 35^\circ\text{C}$ ($T_3 = 308,15\text{ K}$):

$$\Delta \dot{m}_{p1} = \dot{m}_{g1} \cdot \Delta X_{1r} = 0,316 \text{ [g/s]}$$

$$\Delta \dot{m}_{p1} \approx 19 \text{ [g/min]}$$

- Wilgotność względna $\phi_1 = 60\%$:

$$\Delta \dot{m}_{p2} = \dot{m}_{g2} \cdot \Delta X_{2r} = 0,519 \text{ [g/s]}$$

$$\Delta \dot{m}_{p2} \approx 31 \text{ [g/min]}$$

- Wilgotność względna $\phi_1 = 80\%$:

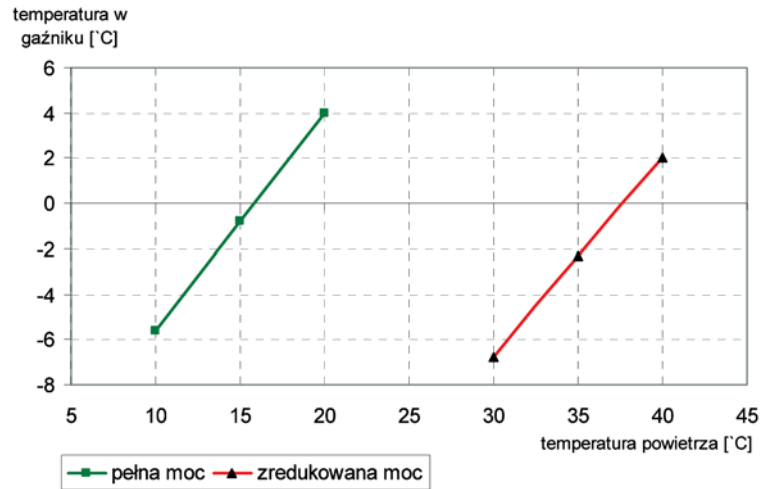
$$\Delta \dot{m}_{p3} = \dot{m}_{g3} \cdot \Delta X_{3r} = 0,734 \text{ [g/s]}$$

$$\Delta \dot{m}_{p3} \approx 44 \text{ [g/min]}$$

WNIOSKI KOŃCOWE

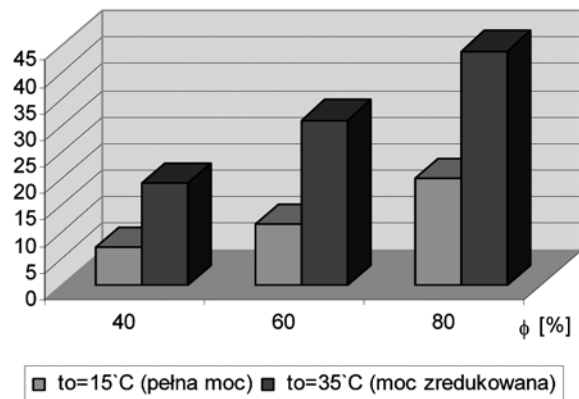
Wyniki przeprowadzonych w sposób szacunkowy i przy bardzo ogólnych założeniach obliczeń wykazały zaskakującą zgodność z przedstawionymi wcześniej danymi źródłowymi (rys.18).

Podczas pracy silnika na maksymalnych obrotach (maksymalnej mocy), oblodzenia gaźnika można się spodziewać (według obliczeń) już przy temperaturze otaczającego powietrza równej 15°C – niemal dokładnie taką samą wartość odczytać można z rysunku 18. Wykonane obliczenia potwierdzają również, że ryzyko oblodzenia gaźnika jest dużo większe podczas pracy silnika na mocy zredukowanej, gdyż ujemne temperatury w gaźniku (dokładnie w rejonie przepustnicy) osiągane są dla temperatur powietrza nawet 35 do 40°C ! – dokładnie tak,



Rys. 26. Obliczona temperatura w gaźniku w funkcji temperatury otaczającego powietrza

ilość wydzielonej pary wodnej/lodu [g/min]



Rys. 27. Szacunkowe wartości ilości osadzonego w gaźniku lodu w ciągu jednej minuty lotu dla danej temperatury początkowej i wilgotności; to – temperatura powietrza, przy której możliwe jest osiągnięcie temperatury ujemnej wewnątrz gaźnika (dla określonej mocy silnika)

jak na wspomnianym rysunku 18. Zestawienie obliczonych temperatur wewnątrz gaźnika w zależności od temperatury początkowej powietrza przedstawiono na rysunku 26.

Ponadto, ze względu na możliwy wzrost zawartości wilgoci w powietrzu wraz z jego temperaturą (wzrost temperatury punktu rosy), ilość wykroplonej, a następnie zamarzającej w gaźniku wody w wyższych temperaturach powietrza jest bardzo duża i osiągać może wartości rzędu kilkudziesięciu gramów na minutę lotu (rys. 27). Dodatkowo, w czasie schodzenia samolotu na niższy pułap ze zredukowaną mocą silnika (np. podczas podejścia do lądowania), przez zimny gaźnik zaczyna przepływać coraz cieplejsze i bardziej wilgotne powietrze (pionowy gradient temperatury powietrza wy-

nosi średnio 0,65°C/100 m), co może znacznie przyspieszać oblodzenie i w rezultacie po kilku minutach takiego lotu w gaźniku może narosnąć już ok. kilkuset gramów lodu, co na pewno nie „spodoba się” silnikowi. W świetle powyższych wniosków, uzasadniony staje się obowiązek włączania „podgrzewu” gaźnika podczas każdorazowego zniżania do lądowania, niezależnie od pory roku.

Analizując wykonane obliczenia (oraz wykres h-X), zrozumiały staje się również fakt, dlaczego groźba oblodzenia gaźnika jest tak znikoma dla temperatury zewnętrznej poniżej -5°C, bowiem ilość zawartej w takim powietrzu wilgoci w postaci kryształków (mgła lodowa, szadź) jest już zbyt mała, aby zagrozić prawidłowej pracy gaźnika.