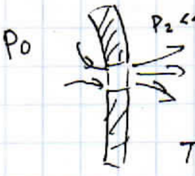
Rozwiążemy kilka zadań.
Typowe zadanie związane z dyszą zbieżną to:

(I) Samolot na dużej wysokości został porwany. W trakcie porwania przestrzelono kadłub serią z pistoletu maszynowego. Powstało 30 otworów o średnicy 8 mm każdy.*) Wyznaczyć wydatek masowy, jeśli w samolocie panuje ciśnienie 0.8 b i 295°K.

Na dużej wysokości ciśnienie jest niskie, z pewnością $< p_* = p_0\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = 0.528 p_0 \cong 0{,}42 b$.
Wobec tego w otworach jest ruch z prędkością dźwięku, i $M_u = 1$



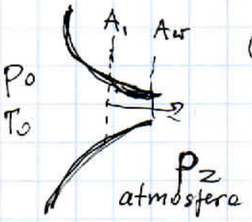
$P_z \ll p_0$ A więc $u = a = a_* = (\text{wykres!}) \simeq 0.91 a_0$, $a_0 = \sqrt{kRT_0} \cong 344\,m/sek$.
$\rho = \rho_* = \rho_0 \cdot 0{,}63$ (z wykresu), $\rho_0 = p_0/RT_0 = 0.8 \cdot 10^5/RT_0 = 0.945\,kg/m^3$
$Q_m = A \cdot \rho_* \cdot a_* = n \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \rho_* \cdot a_* \cong 0{,}49\,kg/sek.$

To całkiem mało i system klimatyzacyjny zapewni utrzymanie właściwego ciśnienia...

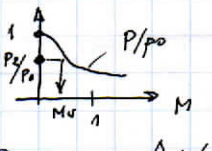
(II) Butla z tlenem (150 b) utraciła zawór. Otwór ma średnicę = 25 mm. Temperatura wynosi 300°K. Wyznacz siłę działającą na butlę. Na zewnątrz 1 bar.

$-R_x = \rho u^2 A + (p_* - p_{otocz})A$ $\quad p_* = 0.528 p_0$, $\rho_* = 0.63 \rho_0$, $a_* = 0.91 a_0$.
$a_0 = \sqrt{kRT_0}$, $R = \frac{8315}{32} \cong 259$, $a_0 \cong 330$, $\rho_0 = p_0/RT_0 \cong 193$ (duże ciśnienie...)
$-R_x = \frac{\pi d^2}{4}\left(\rho_0 \cdot 0.63 \cdot a_*^2 + (79 - 1) \cdot 10^5\right) \cong 9{,}2 \cdot 10^3\,N$
Butla "pofrunie"!

(III) Powietrze wypływa ze zbiornika w którym panuje 1.2 b. i 300°K. W otoczeniu jest 1 b. Jaka jest prędkość w przekroju 2* większym od wylotowego?



Ciśnienie zewnętrzne $= 1 b > p_* = 0{,}528 \cdot p_0 \cong 0{,}63 b$.
Wobec tego w przekroju wylotowym $M_u < 1$. O prędkości wypływu decyduje ciśnienie w przekroju wylotowym ($= p_z$).
Jest: $p_z/p_0 \cong 0{,}83$. Wynika z tego, że $M_w = 0{,}46$ (wykres)

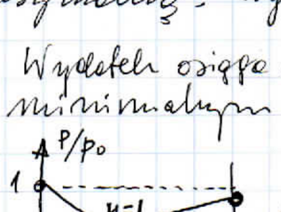


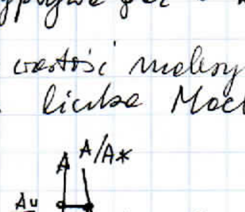
Znajdujemy liczbę Macha w przekroju $A_1 = 2 A_w$:
$\frac{A_1}{A_*} = \frac{A_1}{A_w} \cdot \frac{A_u}{A_*}$. Znamy $\frac{A_u}{A_*} = F(M_w) = (\text{wykres}) \cong 1{,}27$

Dalej: $A_1/A_* = 2.54 \rightarrow M_1 \cong 0{,}22$. Przy $M_1 = 0{,}22$ $\frac{a}{a_0}(M_1) = 0{,}99$.
Prędkość u_1 to: $u_1 = M_1 \cdot a_1 = M_1 \cdot 0{,}99 \cdot a_0 \cong 75{,}6\,m/sek.$

(IV) Dysza Lavala ma przekrój wylotowy 2* większy od minimalnego. Ciśnienie w zbiorniku zasilającym wynosi 2,5 bara. Wyznacz ciśnienie zewnętrzne przy którym wydatek masowy osiąga wartość maksymalną. Wypływa gaz o $k = 1.4$.

Wydatek osiąga wartość maksymalną, gdy w przekroju minimalnym liczba Macha będzie jednością.





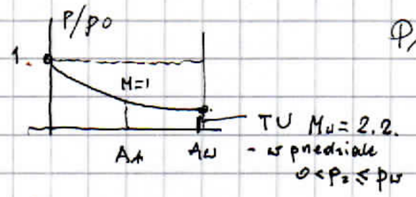
Wtedy $A_{min} = A_*$ i $A_u/A_* = 2$.
Poddźwiękowy wypływ odbywa się z liczbą Macha $M_w \approx 0.3$.
Wtedy $p_u/p_0 = p_z/p_0 = 0.93$

*) Typowy kaliber: 7,62. To nic innego, niż 0,3" – czyli $0.3 \cdot 2{,}54 = 7.62$.
Zwykle 0.3 cala – ze względów historycznych kaliber broni strzeleckiej jest w calach...

(V) Jaka jest prędkość wypływu z dyszy opisanej w zadaniu (IV) gdy na zewnątrz dyszy jest próżnia? Jakie jest wtedy ciśnienie w przekroju wylotowym?

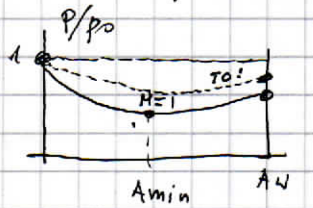
Oczywiście, $p_{zew} < p_{wylotowe}$, bo $p_{zewn} = 0$. Ciśnienie p_{wyl} jest oczywiście dodatnie.
Przy wypływie naddźwiękowym liczba Macha w przekroju wylotowym wynika z geometrii dyszy. Oczywiście, $A_{min} = A_*$.

Posługujemy się wykresem znajdujemy $M_W = 2.2$.
Dla takiej liczby Macha $\frac{p}{p_0} = \frac{p_W}{p_0} = 0{,}09$ i $p_W = 0{,}225$ b
Jeśli ciśnienie zewnętrzne jest mniejsze, niż obliczone p_W, to ruch pozostaje niezmienny.



Prędkość w przekroju wylotowym: $u_W = M_W \cdot a_W = M_W \frac{a_W}{a_0} \cdot a_0 =$
$= M_W \frac{a}{a_0}(M_W) \cdot a_0$. Dla danych zadania: $u_W = 2{,}2 \cdot 0{,}68\, a_0$

(VI) Wydatek maksymalny jest dla $p_z < 0.93\, p_0$. (Dla omawianej dyszy).
Wyznaczymy wydatek dla $p_z = 0.95\, p_0$, czyli dla $p_z = 2.375$.



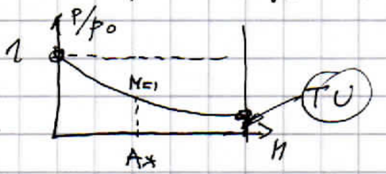
Wypływ jest poddźwiękowy. Wtedy $p_W = p_z$.
A więc $\frac{p_W}{p_0} = \frac{p_z}{p_0} = 0{,}95 \Rightarrow M_W = 0{,}25$ (wykres)
Wydatek: $Q_m = \frac{\rho}{\rho_0}(M_W)\cdot\rho_0 \cdot \frac{a}{a_0}(M_W)\cdot a_0 \cdot M \cdot A_{wylot}$.
Odczytujemy: $\frac{\rho}{\rho_0} = 0{,}9$, $\frac{a}{a_0} = 0{,}992$. Jest: $Q_m = 0{,}9 \cdot 0{,}992 \cdot 0.25 \cdot \rho_0 \cdot a_0 A_W$

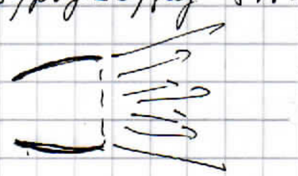
(VII) Prędkość w A min: $u_m = M_m \cdot a_m = M_m \frac{a}{a_0}(M_m) \cdot a_0$. Trzeba znaleźć M_m

$$\frac{A_m}{A_*} = F(M_m) = \frac{A_m}{A_W}\cdot\frac{A_W}{A_*} = 2 \cdot F(M_W) = 2 \cdot 2.26 = 4.52 \Rightarrow M_m = 0{,}21$$

Pozostałe rachunki są całkowicie trywialne.

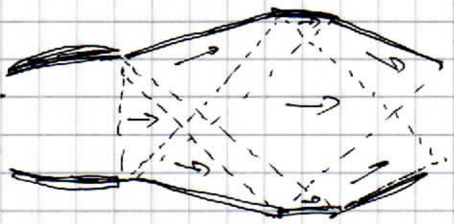
Wtedy, gdy ciśnienie zewnętrzne jest niższe, niż ciśnienie odpowiadające prawidłowemu wypływowi z naddźwiękową liczbą Macha, to wypływający strumień **rozszerza się na zewnątrz.**





Stopień rozszerzenia jest taki, by
- w nieodległym miejscu – ciśnienie malało...
- Omawiany ruch w zewnątrz dyszy nie może być opisany teorią nieuwzględniającą wielowymiarowości...

Najprostsza teoria takiego ruchu – zewnętrznego – to teoria przepływów naddźwiękowych płaskich. Nieco bardziej złożona jest teoria przepływu z symetrią osiową.



Typowy schemat ruchu pokazuje rysunek. Powstaje struktura komórkowa w której liczby Macha są różne w rozmaitych częściach strumienia.
Czytelnik z pewnością widział zdjęcie startującego myśliwca (nawet z odpalonym dopalaczem). Zdjęcie takie można znaleźć w internecie. To, co dzieje się w wypływającym strumieniu można, oczywiście, dokładnie wyznaczyć. Trzeba jednak użyć bardziej zaawansowanej teorii.