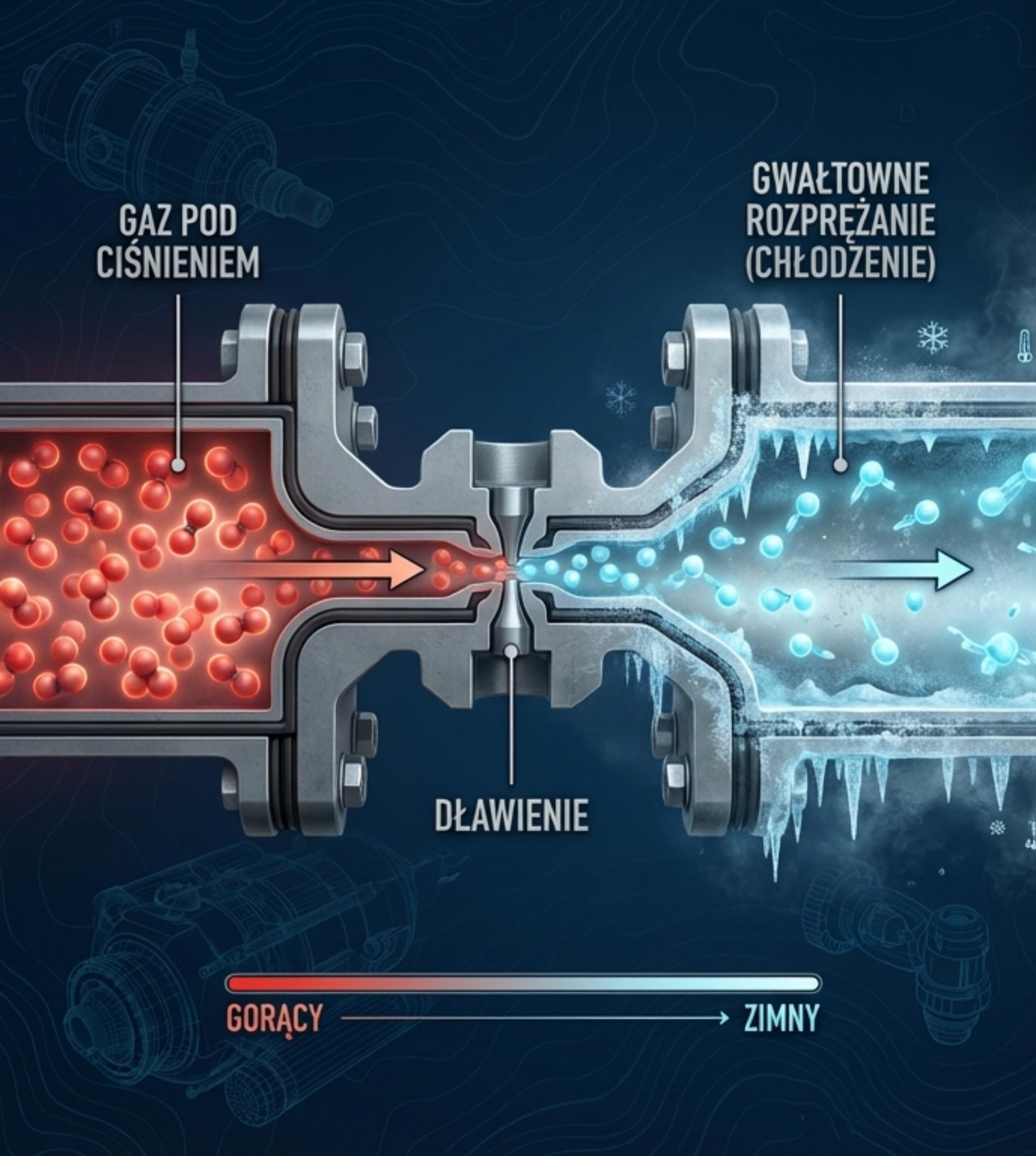


# TERMODYNAMIKA W AUTOMACIE ODDECHOWYM

Dlaczego automaty zamarzają? Analiza Efektu Joule'a-Thomsona.



Analiza zjawiska fizycznego, mechanizmów awarii i inżynierii bezpieczeństwa.



# FIZYKA CHŁODU: EFEKT JOULE'A-THOMSONA

GWAŁTOWNE  
ROZPRĘŻANIE



SPADEK  
TEMPERATURY



**DEFINICJA:** Zjawisko zmiany temperatury gazu podczas jego rozprężania (dławienia) bez wymiany ciepła z otoczeniem (proces adiabatyczny).



**MECHANIZM:** Gaz przeciskający się przez zawór zużywa energię wewnętrzną na oddalenie cząsteczek od siebie. Skutkuje to drastycznym ochłodzeniem.

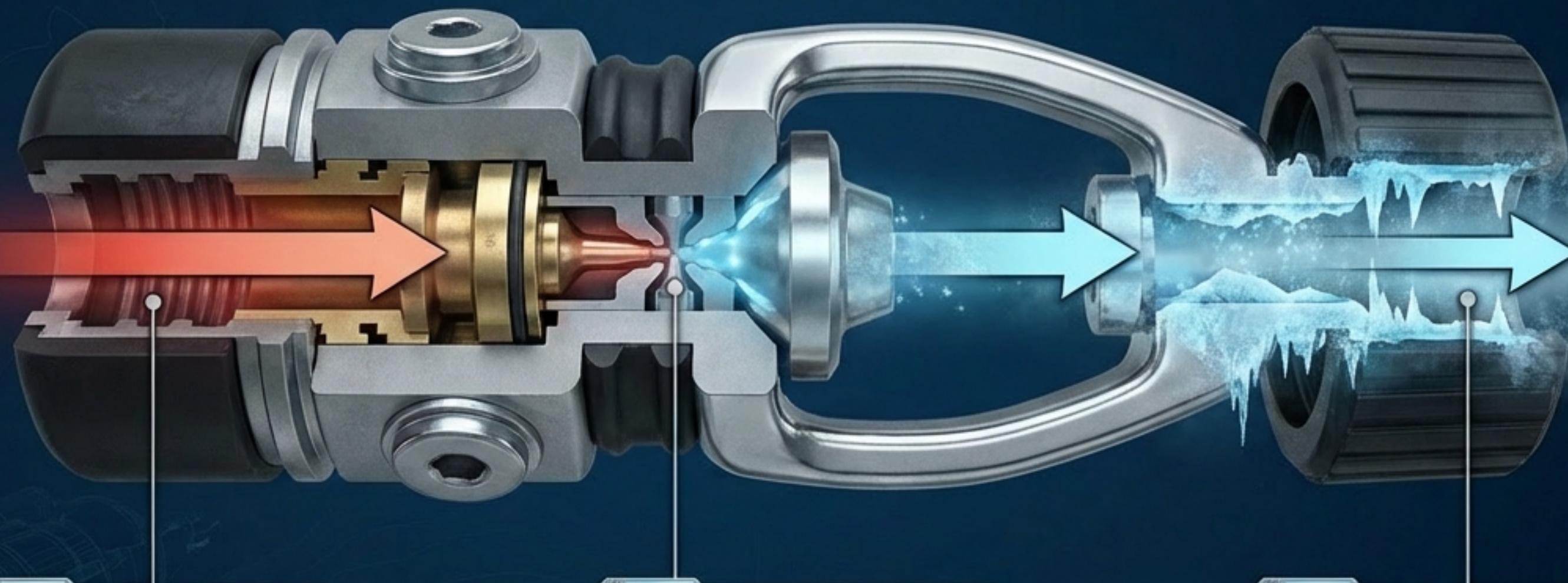


**WNIOSZEK:** Twój automat działa jak lodówka – każdy wdech to cykl chłodzenia.



# I STOPIEŃ: SKOK ENERGETYCZNY

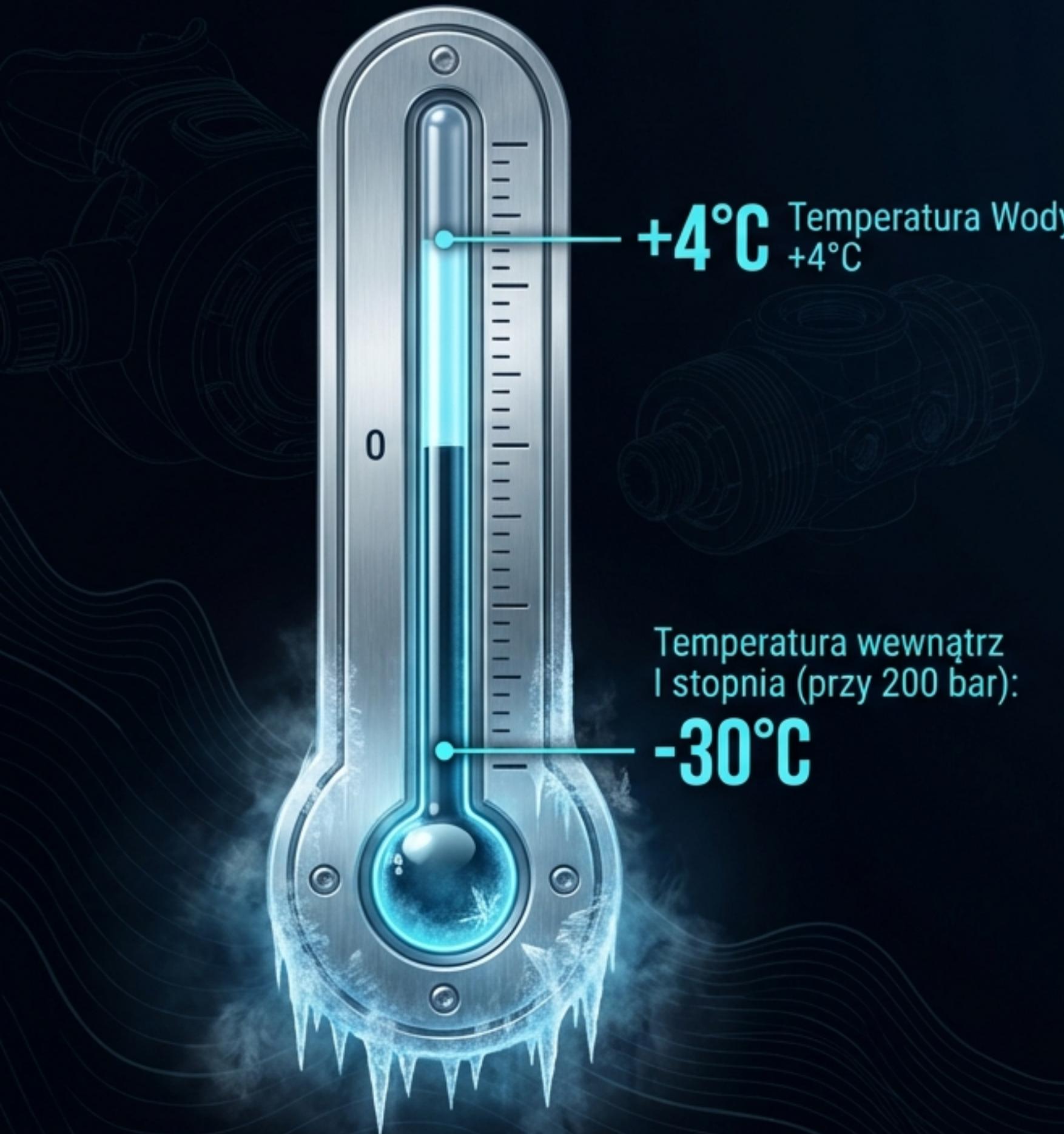
Wewnątrz pierwszego stopnia następuje redukcja ciśnienia o **190+ barów**. Gaz osiąga prędkość dźwięku. W tym 'wąskim gardle' temperatura spada najbardziej ekstremalnie.



Wlot (Z butli):  
**200 bar**

Punkt Krytyczny:  
Skok ciśnienia  
w ułamku sekundy

Wylot (Średnie ciśnienie):  
**~10 bar**



## ZIMNE LICZBY: TEMPERATURA WEWNĄTRZ MECHANIZMU

Nawet w wodzie o temperaturze dodatniej, wnętrze automatu pracuje w warunkach arktycznych.

Metalowe elementy błyskawicznie schładzają się poniżej 0°C, stając się idealnym podłożem dla lodu.

Im głębiej nurkujesz (gęstszy gaz), tym niższa temperatura.

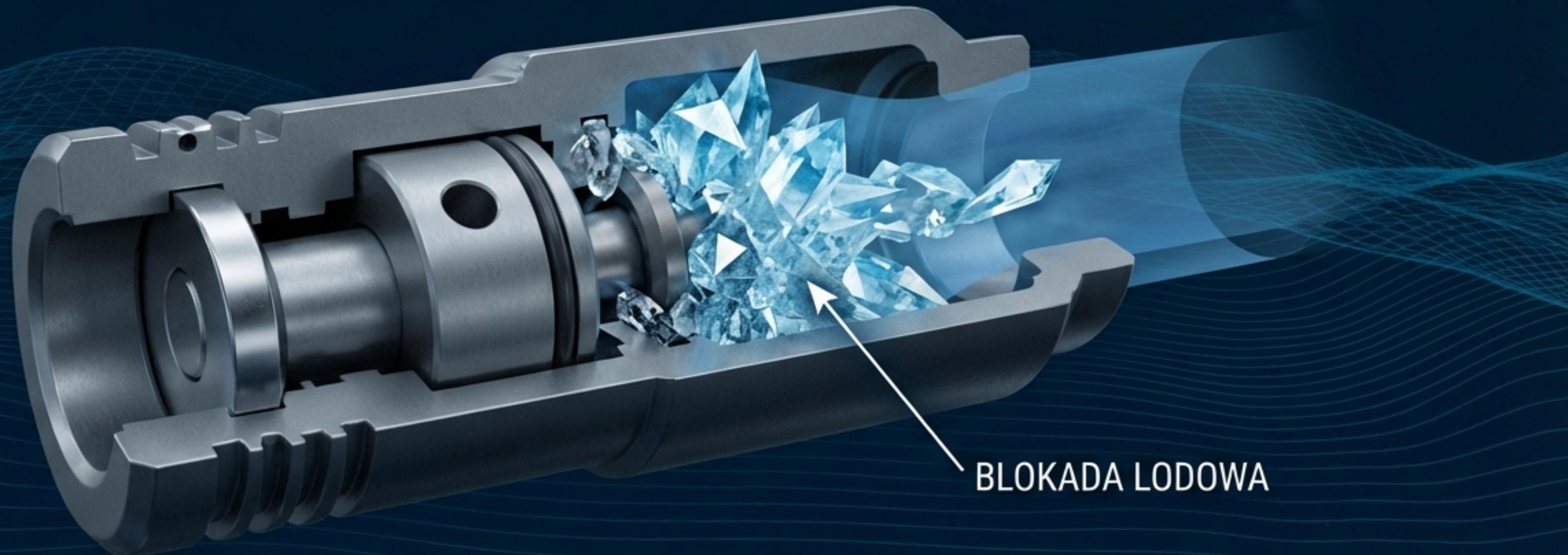
# ZAGROŻENIE 1: ZAMARZANIE WEWNĘTRZNE (WILGOĆ)

**Przyczyna:** Zanieczyszczone powietrze (wilgoć powyżej punktu rosy  $-54^{\circ}\text{C}$ ).

**Mechanizm:** Para wodna skrapla się i zamarza pod wpływem efektu Joule'a-Thomsona.

**Skutek:** Kryształy lodu działają jak żwir – blokują tłok lub grzybek zaworu w pozycji otwartej.

**Prewencja:** Czyste powietrze i sprawne filtry sprężarki.



## ZAGROŻENIE 2: ZAMARZANIE ZEWNĘTRZNE

**Mechanizm:** Korpus automatu schładza się od wewnątrz. Woda otaczająca automat zamarza w kontakcie z zimnym metalem.

**Lokalizacja:** Komora wodna (sprężyna regulująca ciśnienie).

**Blokada:** Lód 'betonuje' sprężynę. Automat traci zdolność reagowania na ciśnienie otoczenia.

**Ryzyko:** Największe w wodach poniżej 4-10°C przy dużym przepływie gazu.

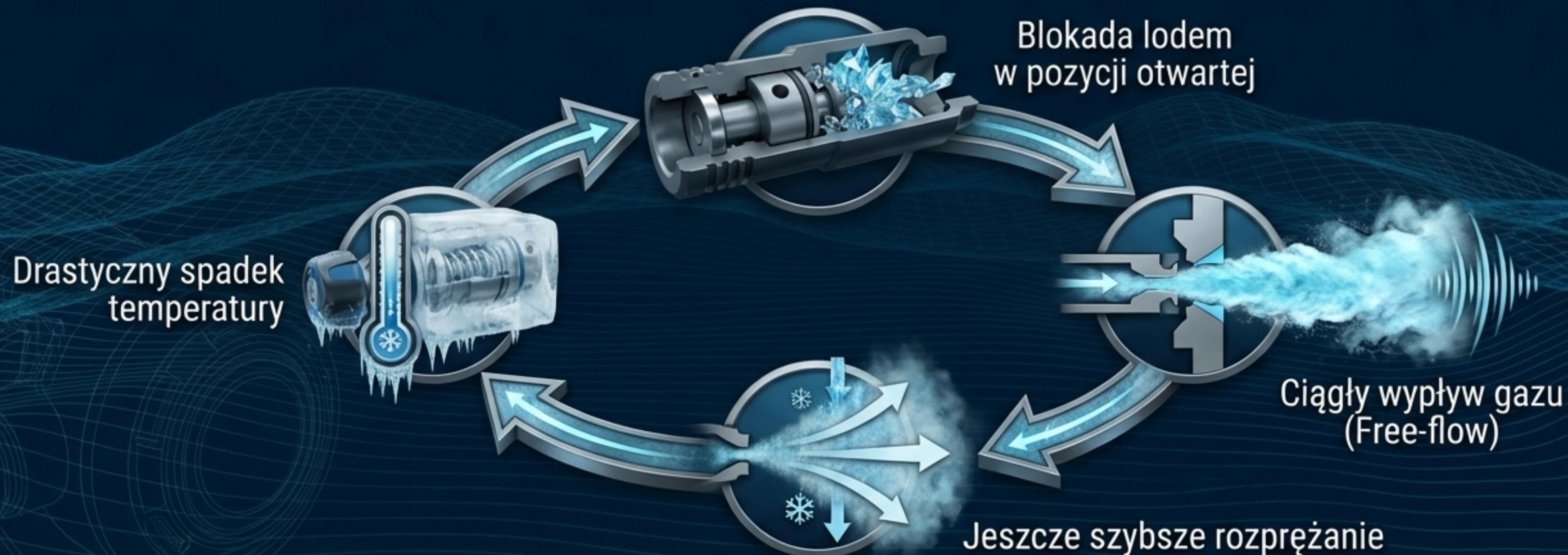


# ANATOMIA AWARII: WZBUDZENIE (FREE-FLOW)

**Dlaczego syczy?** Fail-Safe: konstrukcja zakłada, że lepiej podawać powietrze ciągłe, niż odciąć je zupełnie.

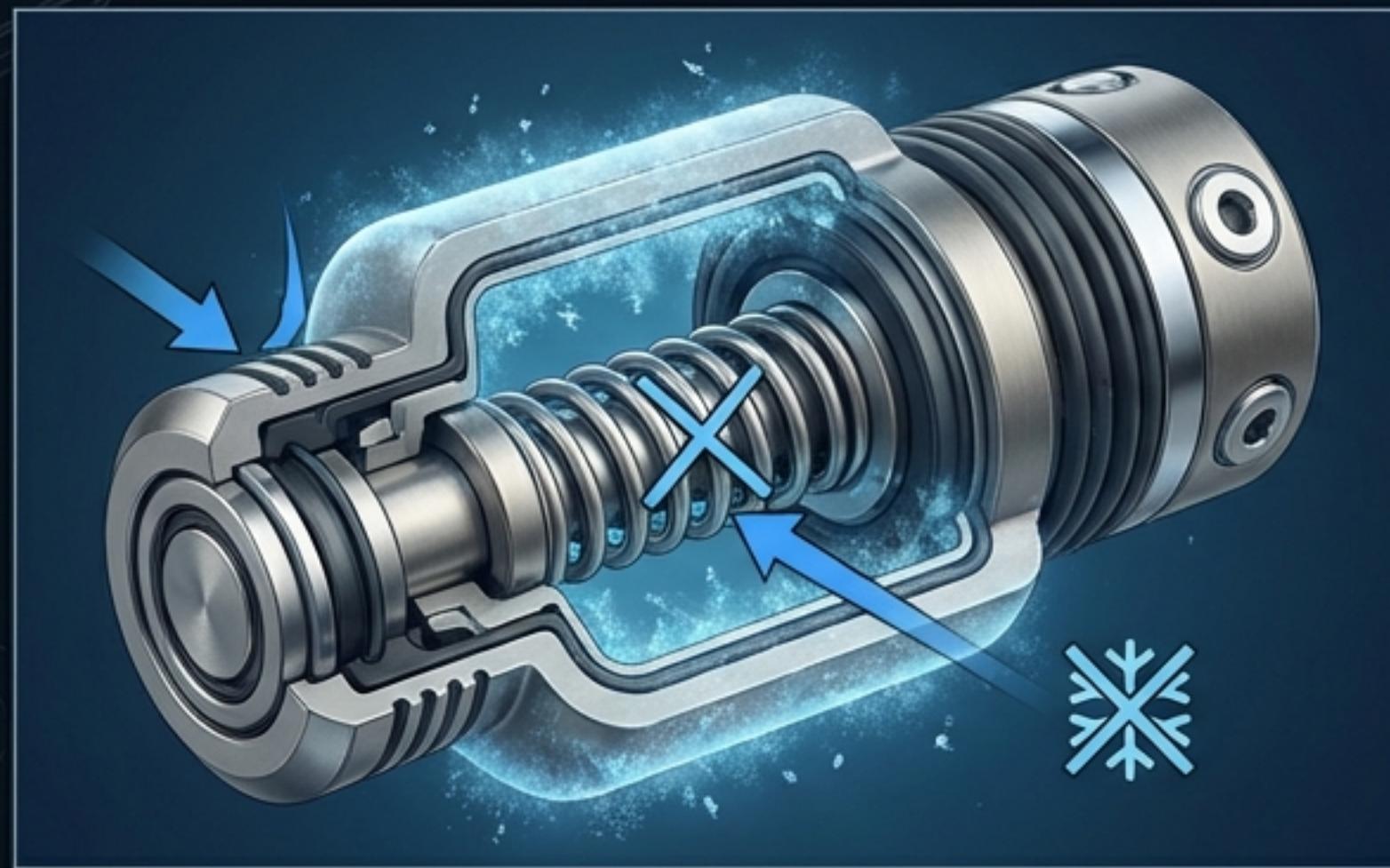
**Błędne koło:** Uciekający gaz chłodzi system jeszcze bardziej, generując więcej lodu.

**Efekt:** Gwałtowna utrata czynnika oddechowego.



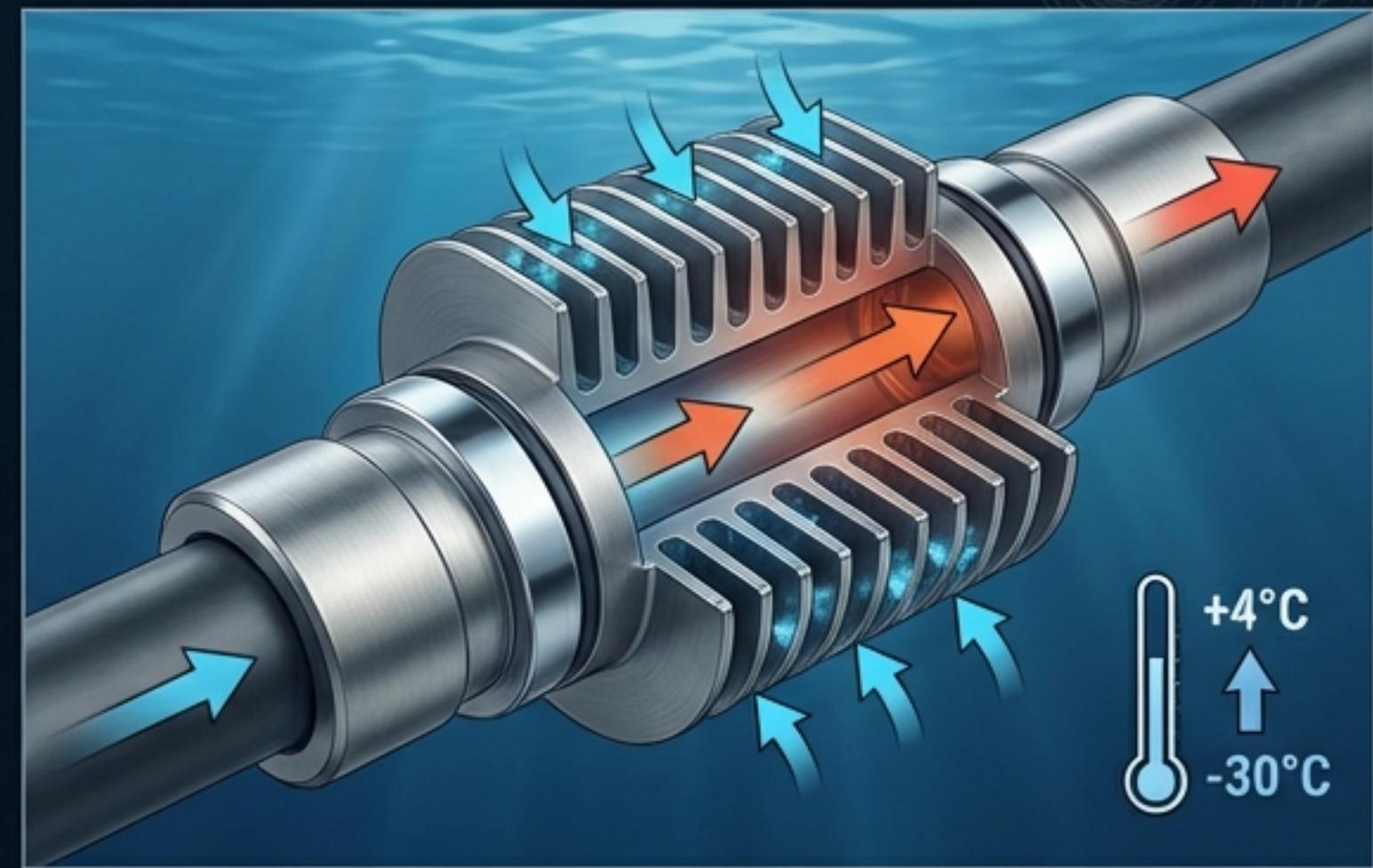
# INŻYNIERIA PRZECIW LODU

## SUCHA KOMORA (Dry Sealed Chamber)



**Sucha Komora:** Izolacja mechanizmu od wody. Lód nie może zablokować sprężyny, bo woda nie ma do niej dostępu.

## WYMIENNIK CIEPŁA



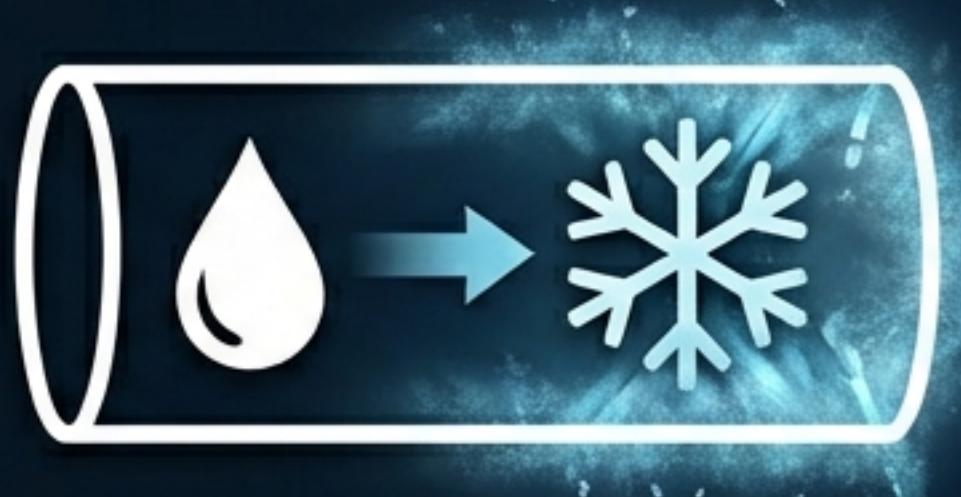
**Radiatory:** Działają jak kaloryfer – ogrzewają zimne powietrze ciepłem wody z otoczenia (+4°C to 'gorąco' dla gazu o temp. -30°C).

**Standard:** Szukaj oznaczenia EN250A.

# PROFILAKTYKA: PROCEDURY NA POWIERZCHNI



Nie oddychaj na mrozie



Wilgoć z wydechu zamarza

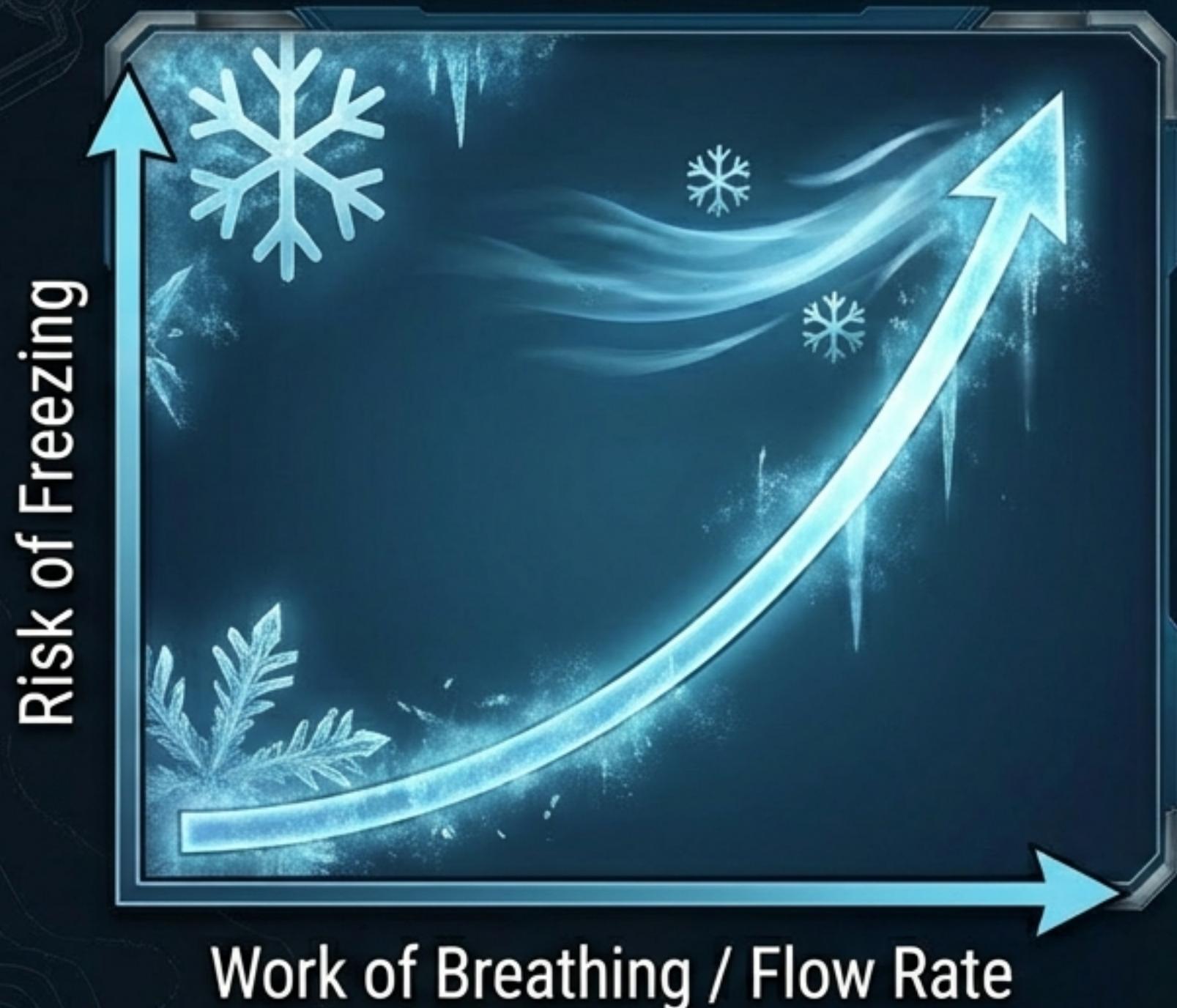


Osusz kapturek

**Zasada:** Wilgoć z Twojego wydechu natychmiast zamarznie wewnątrz II stopnia przy ujemnej temperaturze powietrza.

- Nie wciskaj przycisku dodawczego (bypass) podczas płukania automatu.
- Chroń wnętrze I stopnia przed kroplami wody z mokrego kapturka.

# PROFILAKTYKA: ZARZĄDZANIE ODDECHEM



- **Zasada Przepływu:** Im więcej powietrza przepływa w jednostce czasu, tym silniejszy efekt chłodzenia.



- **Technika:** Spokojny, powolny oddech to najlepszy system antyzamarzeniowy.



- **Unikaj:** Jednoczesnego pompowania inflatora i brania głębokiego wdechu.



- **Sprzęt:** Nie używaj nadmiernie przycisku bypass.

# REAKCJA NA AWARIĘ: FREE-FLOW



- 1. Nie panikuj:** Masz nadmiar powietrza.
- 2. Technika:** Nie uszczelniaj ust. Pozwól gazowi uciekać bokiem, "siorbiąc" powietrze ze strumienia.
- 3. Decyzja:** Przejdź na automat zapasowy i zakręć zawór uszkodzonej butli (jeśli to możliwe).
- 4. Koniec:** Przerwij nurkowanie i rozpoczętaj bezpieczne wynurzanie.

# PODSUMOWANIE: SPOKÓJ CHRONI PRZED LODEM



1. **Fizyka:** Rozprężanie zawsze generuje ekstremalne zimno (-30°C).
2. **Sprzęt:** Wymagana sucha komora i zgodność z EN250A.
3. **Technika:** Powolny oddech minimalizuje ryzyko.
4. **Umysł:** Wzbudzenie to sytuacja awaryjna, ale w pełni zarządzalna.