

Politechnika Wrocławska
Katedra Inżynierii Kriogenicznej, Lotniczej i Procesowej

LABORATORIUM Z PODSTAW KRIOGENIKI

ĆWICZENIE NR 3:

**OCENA BEZPIECZEŃSTWA POSŁUGIWANIA SIĘ CIECZAMI
KRIOGENICZNYMI W ZAMKNIĘTYCH POMIESZCZENIACH.**

ZAGROŻENIA WYNIKAJĄCE Z NIEDOBORU TLENU

W czasie posługiwania się cieczeniami kriogenicznymi istnieje niebezpieczeństwo niedoboru tlenu w atmosferze, co może doprowadzić do zagrożenia życia człowieka. Symptomy braku tlenu w organizmie ludzkim przedstawia Tabela 1.

TABELA 1

| Zawartość O ₂ [%] przy p=1ata | Symptomy |
|---|--|
| 15—19 | Spadek zdolności do wykonywania czynności; początek zaburzeń pracy serca, płuc i układu krążenia |
| 12-15 | Głębsze oddychanie, szybszy puls, słaba koordynacja ruchów |
| 10-12 | Zawroty głowy, spadek zdolności myślenia, sinienie ust |
| 8-10 | Mdłości, wymioty, utrata świadomości, sina twarz |
| 6-8 | Śmierć po 8 min.; po 6 min. 50% szans odzyskania zdrowia po leczeniu, po 4-5 min. 100% szans |
| 4 | Po 40 s śpiączka, konwulsje, śmierć |

Do zubożenia atmosfery w tlen może doprowadzić np. nagle odparowanie kriocieczy w niekontrolowanych warunkach i niepożądanym miejscu, kiedy to zachodzi ekspansja powstałego wówczas gazu. Podobne zagrożenie może wystąpić w przypadku rozlania dużych ilości cieczy, która natychmiast odparowuje oraz w przypadku ogrzewania cieczy do temperatury otoczenia. Wynika to przede wszystkim ze zmiany objętości - powstały w wyniku odparowania gaz zajmuje znacznie wyższą objętość w porównaniu z objętością jaką zajmuje ta sama ilość cieczy.

Niebezpieczeństwo uduszenia występuje także w czasie pracy z kriogenami w pomieszczeniu zamkniętym oraz w pomieszczeniach, w których są one przechowywane i gromadzone. Istotne staje wówczas oszacowanie ilości cieczy, która może zostać uwolniona do otoczenia bez poważniejszych konsekwencji, tzn. bez ryzyka uduszenia się człowieka. Niebezpieczeństwo wynika tu szczególnie z faktu, że gazy te są zazwyczaj niewidzialne i bezwonne.

W związku z tym wyniknął problem oszacowania potencjalnego zagrożenia niedoboru tlenu w miejscu, w którym znajdują się ludzie. Dokonano tego w laboratoriach, w Stanach Zjednoczonych, nazywając opisywane zagrożenie skrótem ODH. Oszacowanie ODH polega przede wszystkim na określeniu prawdopodobieństwa uszkodzenia danej części instalacji lub wystąpienia zdarzenia, które w konsekwencji mogą doprowadzić do wyzwolenia do otoczenia czynnika powodującego zagrożenie.

Dokonać można tego stosując proste zależności matematyczne podane poniżej.

$$\Phi = \sum_{i=1}^n P_i \cdot F_i$$

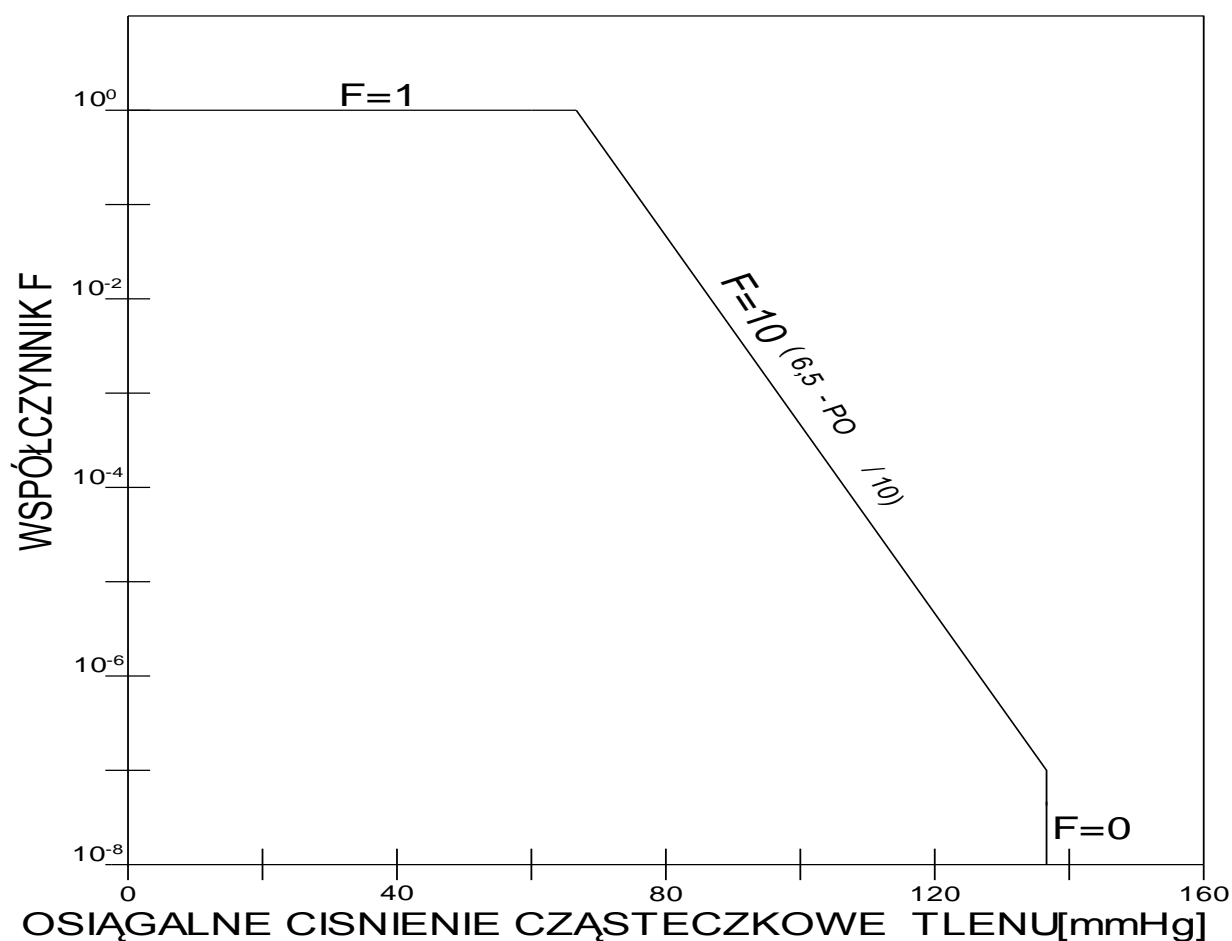
gdzie: Φ - stopień zagrożenia wynikający z wystąpienia ODH [w ciągu 1 godz.]

P_i - prawdopodobieństwo wystąpienia i-tego zdarzenia [w ciągu 1 godz.]

F_i - prawdopodobieństwo wystąpienia śmiertelnego wypadku na skutek

i-tego zdarzenia

Pod uwagę należy wziąć tylko te zdarzenia, które mogą doprowadzić do zubożenia atmosfery w tlen i w rezultacie spowodują wypadek śmiertelny. Wartość P_i należy wyznaczyć na podstawie danych eksperymentalnych. Wartość F_i zależy ona od koncentracji tlenu w atmosferze, od czasu przebywania w niej człowieka oraz trudności związanych z ucieczką z miejsca zagrożenia. W przypadku braku dokładniejszych danych można ją oszacować korzystając z diagramu pokazanego na Rys.1. Jeśli najniższe stężenie tlenu nie przekracza wartości 18% (137 mmHg) wówczas F_i przyjmuje wartość zero, jeśli zaś koncentracja wynosi 18% $F_i = 10^{-7}$. Wraz ze spadającą koncentracją tlenu wartość F_i rośnie aż do osiągnięcia jedności w punkcie 67 mmHg (8,8%). Czas świadomości człowieka przebywającego w takim otoczeniu wynosi 1 min.



Rys.1. Wykres zależności współczynnika śmiertelności F od ciśnienia cząsteczkowego tlenu, które odpowiada koncentracji tlenu w atmosferze.

Koncentracja tlenu w atmosferze, w rozpatrywanym pomieszczeniu zależy od wymiany i cyrkulacji powietrza. W związku z tym należy wyszczególnić trzy przypadki wynikające z wentylacji pomieszczenia:

1. Powietrze jest wdmuchiwane przez wentylator do pomieszczenia.
2. Powietrze jest wyciągane z pomieszczenia, przy czym szybkość wymiany powietrza jest większa niż tempo wypływu szkodliwego czynnika przyczyniającego się do zmiany koncentracji tlenu.

3. Powietrze jest wyciągane z pomieszczenia, przy czym szybkość wymiany powietrza jest niższa niż tempo wypływu czynnika.

Dla każdego przypadku wyznaczono równanie, na podstawie którego można wyznaczyć stężenie tlenu w powietrzu po wyzwoleniu czynnika. Równania te wynikają z bilansu masy tlenu oraz oparte są na założeniach:

- po wyzwoleniu się czynnika zachodzi całkowite i natychmiastowe mieszanie go z powietrzem;
- szybkość wentylacji, objętość pomieszczenia oraz natężenie wypływu czynnika są stałe i niezmiennie w czasie;
- ciśnienie w pomieszczeniu pozostaje stałe i zbliżone do ciśnienia atmosferycznego;
- początkowa koncentracja tlenu w powietrzu wynosi 0,21.

OZNACZENIA:

C – koncentracja tlenu

C_r – koncentracja tlenu w czasie wyzwolenia czynnika

C_e – koncentracja tlenu na końcu, po wyzwoleniu czynnika

Q – szybkość wentylacji [m^3/s]

R – tempo wypływu czynnika [m^3/s]

t – czas wypływu czynnika [s]

t_e – czas, po którym nastąpił koniec wypływu [s]

V – objętość pomieszczenia [m^3]

PRZYPADEK 1

Bilans masy dany jest równaniem różniczkowym (2):

$$V \frac{dC}{dt} = 0,21Q - (R + Q) \cdot C \quad (2)$$

Jego rozwiązanie przy warunkach brzegowych $C = 0,21$ i $t = 0$ przedstawia równanie (3)

$$C_r(t) = \left[\frac{0,21}{R + Q} \right] \cdot \left[Q + R \cdot e^{-(Q+R)t/V} \right] \quad (3)$$

PRZYPADEK 2

Równanie bilansu masy :

$$V \frac{dC}{dt} = 0,21(Q - R) - QC \quad (4)$$

Rozwiązanie (warunki brzegowe takie same jak w przypadku 1):

$$C_r(t) = 0,21 \cdot \left[1 - \frac{R}{Q} \cdot \left[1 - e^{-Qt/V} \right] \right] \quad (5)$$

PRZYPADEK 3

Równanie bilansu masy:

$$V \frac{dC}{dt} = -RC \quad (6)$$

Rozwiązanie (warunki brzegowe tak jak poprzednio):

$$C_r(t) = 0,21 \cdot e^{[-Rt/V]} \quad (7)$$

Koncentracja tlenu w atmosferze po upływie czasu t_e dla wszystkich trzech przypadków można oszacować na podstawie równań (8) i (9).

Równanie bilansu masy:

$$V \frac{dC}{dt} = 0,21Q - QC \quad (8)$$

Rozwiązanie dla warunków brzegowych: $C = C_r(t_e)$ i $t = t_e$:

$$C_e(t) = 0,21 - [0,21 - C_r(t_e)] \cdot e^{[-Q(t-t_e)/V]} \quad (9)$$

Koncentracje tlenu można przeliczyć na jego ciśnienie cząsteczkowe wg zależności (10):

$$P_{O_2} = C \cdot P_a \quad (10)$$

gdzie: C - koncentracja tlenu w danej objętości

P_{O_2} - ciśnienie cząsteczkowe tlenu [mmHg]

P_a - ciśnienie atmosferyczne, w przybliżeniu równe 760 mmHg

Wszystkie powyższe zależności pozwalają w sumie wyznaczyć współczynnik Φ określający stopień zagrożenia (śmiertelność) związany z wystąpieniem ODH.

Na podstawie wartości współł. Φ pięć klas ODH, które zestawione są w Tabeli 2.

Najmniej niebezpieczna i niewymagająca żadnych specjalnych środków ostrożności jest klasa 0, natomiast największe zagrożenie dla życia człowieka występuje przy klasie 4 (w przypadku stwierdzenia tej klasy należy przedsięwziąć wszelkie możliwe środki ostrożności).

TABELA 2

| Klasa ODH | Φ (ilość śmiertelnych przypadków / 1 godz.) |
|-----------|--|
| 0 | $\Phi < 10^{-7}$ |
| 1 | $10^{-5} > \Phi \geq 10^{-7}$ |
| 2 | $10^{-3} > \Phi \geq 10^{-5}$ |
| 3 | $10^{-1} > \Phi \geq 10^{-3}$ |
| 4 | $\Phi \geq 10^{-1}$ |

W Tabeli 3 zestawione są wartości prawdopodobieństwa wystąpienia niektórych zdarzeń mogących doprowadzić do wyzwolenia czynnika przyczyniającego się do zubożenia atmosfery w tlen, określone w laboratorium w Fermilab, natomiast w Tabeli 4 wartości oszacowane w laboratorium U.S.NRC. Tabela 6 zestawia błędy popełnione przez człowieka.

TABELA 3

| Uszkodzony element | Prawdopodobieństwo uszkodzenia |
|---|--|
| Kompresor - wyciek lub pęknięcie | 3×10^{-5} / godz. |
| Dewar - wyciek lub pęknięcie | 1×10^{-6} / godz. |
| Awaria zasilania elektrycznego | 1×10^{-4} / godz. |
| Cieczowe linie kriogeniczne - wyciek lub pęknięcie | 3×10^{-6} / godz. |
| Magnesy - wyciek lub pęknięcie | 1×10^{-6} / godz. |
| Wymiana wyposażenia zawierającego złącze bagnetowe - małe zdarzenie - duże zdarzenie | 3×10^{-2} / dzień 1×10^{-3} / dzień |

TABELA 4

| Uszkodzony Element | Prawdopodobieństwo uszkodzenia |
|---|---|
| Baterie Źródło energii elektrycznej | 3×10^{-6} / godz. |
| Układ wyłączników | niewłaściwe działanie przedwczesne zadziałanie 1×10^{-3} / dzień 1×10^{-6} / godz. |
| Silnik diesel | zaburzenia w rozruchu niewłaściwe działanie 3×10^{-2} / godz. 3×10^{-4} / godz. |
| Silnik elektryczny | zaburzenia w rozruchu niewłaściwe działanie 3×10^{-4} / dzień 1×10^{-5} / godz. |
| Bezpieczniki | przedwczesne zadziałanie niezadziałanie 1×10^{-6} / godz. 1×10^{-5} / dzień |
| Uszczelnienia Kołnierze Zamknięcia Łączniki, kolanka | przeciek przeciek / pęknięcie 3×10^{-6} / godz. 3×10^{-7} / godz. |
| Oprzyrządowanie | niezadziałanie przestawienie (zmiana regulacji) 1×10^{-6} / godz. 3×10^{-5} / godz. |
| Rury > 3 cale | pęknięcie 1×10^{-10} / godz. |
| Rury < 3 cale | pęknięcie 1×10^{-9} / godz. |
| Pompy | niezadziałanie niewłaściwe działanie – w warunkach normalnych niewłaściwe działanie – w warunkach ekstremalnych 1×10^{-3} / dzień 3×10^{-5} / godz. 1×10^{-3} / godz. |
| Przełączniki | brak wzbudzenia niezwarcie zestyku zwarcie otwarcie zestyku normalnie zwartego 1×10^{-4} / dzień 3×10^{-7} / godz. 1×10^{-8} / godz. 1×10^{-7} / godz. |
| Wyłączniki | 1×10^{-4} / dzień |
| Transformatory | 1×10^{-6} / godz. |
| Zawory (MOV) | uszkodzenie w czasie pracy pozostaje otwarty 1×10^{-3} / dzień 1×10^{-4} / dzień |

| | | |
|--|---|--|
| | nieszczelność, pęknięcie | 1×10^{-8} / godz. |
| Zawory (SOV) | uszkodzenie w czasie pracy | 1×10^{-3} / dzień |
| Zawory (AOV) | uszkodzenie w czasie pracy pozostaje otwarty nieszczelność, pęknięcie | 3×10^{-4} / dzień 1×10^{-4} / dzień 1×10^{-8} / godz. |
| Zawory (check) | niezadziałanie nawracający wyciek nieszczelność, pęknięcie | 1×10^{-4} / dzień 3×10^{-7} / godz. 1×10^{-8} / godz. |
| Zawory (chroniące próżnię) | uszkodzenie w czasie pracy pęknięcie | 3×10^{-5} / dzień 1×10^{-8} / godz. |
| Zawory (dyszowe, przepływowe, miernicze) | pęknięcie | 1×10^{-8} / godz. |
| Zawory (manualne) | pozostaje otwarty | 1×10^{-4} / dzień |
| Zawory (bezpieczeństwa) | nie otwiera się przedwczesne otwarcie | 1×10^{-5} / dzień 1×10^{-4} / godz. |
| Spoiny, spawy | nieszczelność | 3×10^{-7} / godz. |
| Druty | otwarte zwarcie do ziemi zwarcie do zasilania | 3×10^{-6} / godz. 3×10^{-7} / godz. 1×10^{-8} / godz. |

TABELA 5. BŁĘDY POPEŁNIONE PRZEZ CZŁOWIEKA

| Prawdopodobieństwo $\times D^{-1}$ | Zdarzenie |
|---------------------------------------|--|
| 10^{-3} | Nieprawidłowy wybór przełącznika, przycisku itp. |
| 3×10^{-3} | Nieprawidłowe oznakowanie przyrządów i wyłączników |
| 10^{-2} | Niewłaściwe ustawienie przyrządów po konserwacji |
| 3×10^{-3} | Pominięcie niektórych czynności co wynika z nieprawidłowej instrukcji |
| $1 / X$ | Włączenie niepoprawnego przełącznika (lub kilku przełączników) ze względu na ich podobieństwo; X – ilość nieprawidłowo włączonych przycisków |
| 10^{-1} | Nieprawidłowe rozpoznanie błędu popełnionego wcześniej |
| 10^{-1} | Niedopatrzanie pracowników kolejnej, niedokładne sprawdzenie przez nich ustawienia przyrządów i obecnych warunków pracy |
| 5×10^{-1} | Źle przeprowadzona kontrola poprawności działania |
| 0,2 – 0,3 | Błędy popełnione w stresie wynikającym z zaistnienia zagrożenia |

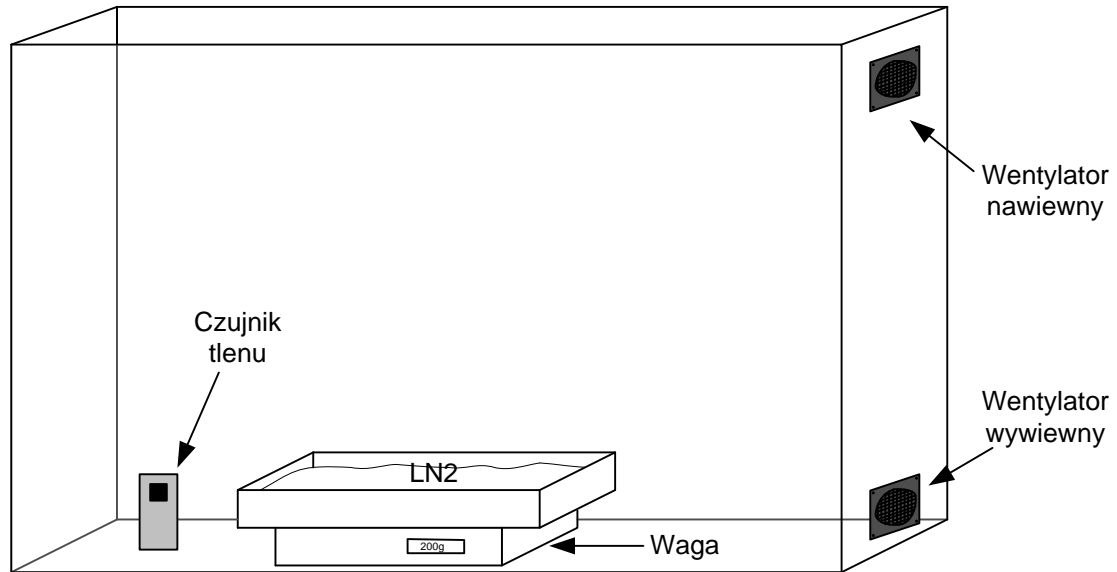
Cel ćwiczenia:

Celem ćwiczenia jest ocena bezpieczeństwa posługiwania się cieczami kriogenicznymi w zamkniętych pomieszczeniach.

Zadania do wykonania:

zad.1. Zbadać wpływ kriogenu w pomieszczeniu badawczym (rys.2) bez wentylacji wymuszonej (oba wentylatory wyłączone).

Napełnić naczynie 200 g ciekłego azotu. Mierzyć ubytek masy azotu oraz odczyt kondensacji tlenu co 5 sek.



Rys.2. Schemat stanowiska badawczego.

Zmiana koncentracji tlenu w atmosferze $n_{O_2}(\tau)$:

$$n_{O_2}(\tau) = n_{O_2}|_{\tau=0} \cdot e^{-\frac{\dot{V}_{GAZ} \cdot \tau}{V}}$$

gdzie:

$n_{O_2}|_{\tau=0}$ - początkowa koncentracja tlenu w atmosferze

\dot{V}_{GAZ} - strumień wypływającego kriogenu, m³/s

V – objętość pomieszczenia, m³

τ - czas, s

zad. 2. Zbadać wpływ kriogenu w pomieszczeniu z wentylacją wywiewną (strumień kriogenu jest mniejszy od strumienia powietrza).

Zmiana koncentracji tlenu w atmosferze $n_{O_2}(\tau)$:

$$n_{O_2}(\tau) = \overline{n_{O_2}} \left(1 - \frac{\dot{V}_{GAZ}}{\dot{V}_{WENT}} \right) + \left[n_{O_2}|_{\tau=0} - \overline{n_{O_2}} \left(1 - \frac{\dot{V}_{GAZ}}{\dot{V}_{WENT}} \right) \right] \cdot e^{-\left(\frac{\dot{V}_{WENT}}{V} \cdot \tau \right)}$$

gdzie:

$\overline{n_{O_2}}$ - maksymalna koncentracja tlenu w powietrzu atmosferycznym

\dot{V}_{WENT} - strumień powietrza, m³/s

zad. 3. Zbadać wpływ kriogenu w pomieszczeniu z wentylacją wywiewną (strumień kriogenu jest większy od strumienia powietrza).

Zmiana koncentracji tlenu w atmosferze $n_{O_2}(\tau)$ (jak w zadaniu 1):

$$n_{O_2}(\tau) = n_{O_2}|_{\tau=0} \cdot e^{-\frac{\dot{V}_{GAZ} \cdot \tau}{V}}$$

zad. 4. Zbadać wpływ kriogenu w pomieszczeniu z wentylacją nawiewną (strumień kriogenu jest większy od strumienia powietrza).

Zmiana koncentracji tlenu w atmosferze $n_{O_2}(\tau)$:

$$n_{O_2}(\tau) = \overline{n_{O_2}} \left(\frac{\dot{V}_{WENT}}{\dot{V}_{WENT} + \dot{V}_{GAZ}} \right) + \left[n_{O_2}|_{\tau=0} - \overline{n_{O_2}} \left(\frac{\dot{V}_{WENT}}{\dot{V}_{WENT} + \dot{V}_{GAZ}} \right) \right] \cdot e^{-\left(\frac{\dot{V}_{WENT} + \dot{V}_{GAZ}}{V} \cdot \tau \right)}$$

Zasady bezpieczeństwa:

Podczas wykonywania ćwiczenia, studenci stykają się z ciekłym azotem. Dlatego też, podczas trwania eksperymentu, wszyscy uczestnicy zajęć zobowiązani są do noszenia długich spodni, obuwia zakrywającego place oraz okularów ochronnych. Dodatkowo, student nalewający ciekły kriogen do naczynia pomiarowego musi mieć ubrane rękawice ochronne.

Zadania:

1. Na podstawie pomiarów narysować wykres zależności strumienia masy ciekłego azotu w pomieszczeniu badawczym oraz koncentracji tlenu od czasu.