

INSTYTUT TECHNIKI CIEPLNEJ I MECHANIKI PŁYNÓW  
ZAKŁAD CHŁODNICTWA I KRIOGENIKI

## Laboratorium z kriotechniki

TEMAT

**Odparowalność naczyń Dewara i ocena bezpieczeństwa  
posługiwania się cieciami kriogenicznymi w zamkniętych  
pomieszczeniach**

Gabriela Konopka, Maciej Chorowski

## CEL ĆWICZENIA

Doświadczalne wyznaczenie odparowalności naczyń Dewara oraz określenie maksymalnej ilości ciekłego azotu, który może być przetrzymywany w pojedynczym naczyniu Dewara w hali Laboratorium Chłodnictwa i Kriogeniki w bud. A-6

## ZAGROŻENIA WYNIKAJĄCE Z NIEDOBORU TLENU

W czasie posługiwania się cieczami 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 <sub>2</sub> [%] 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. nagłe 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.

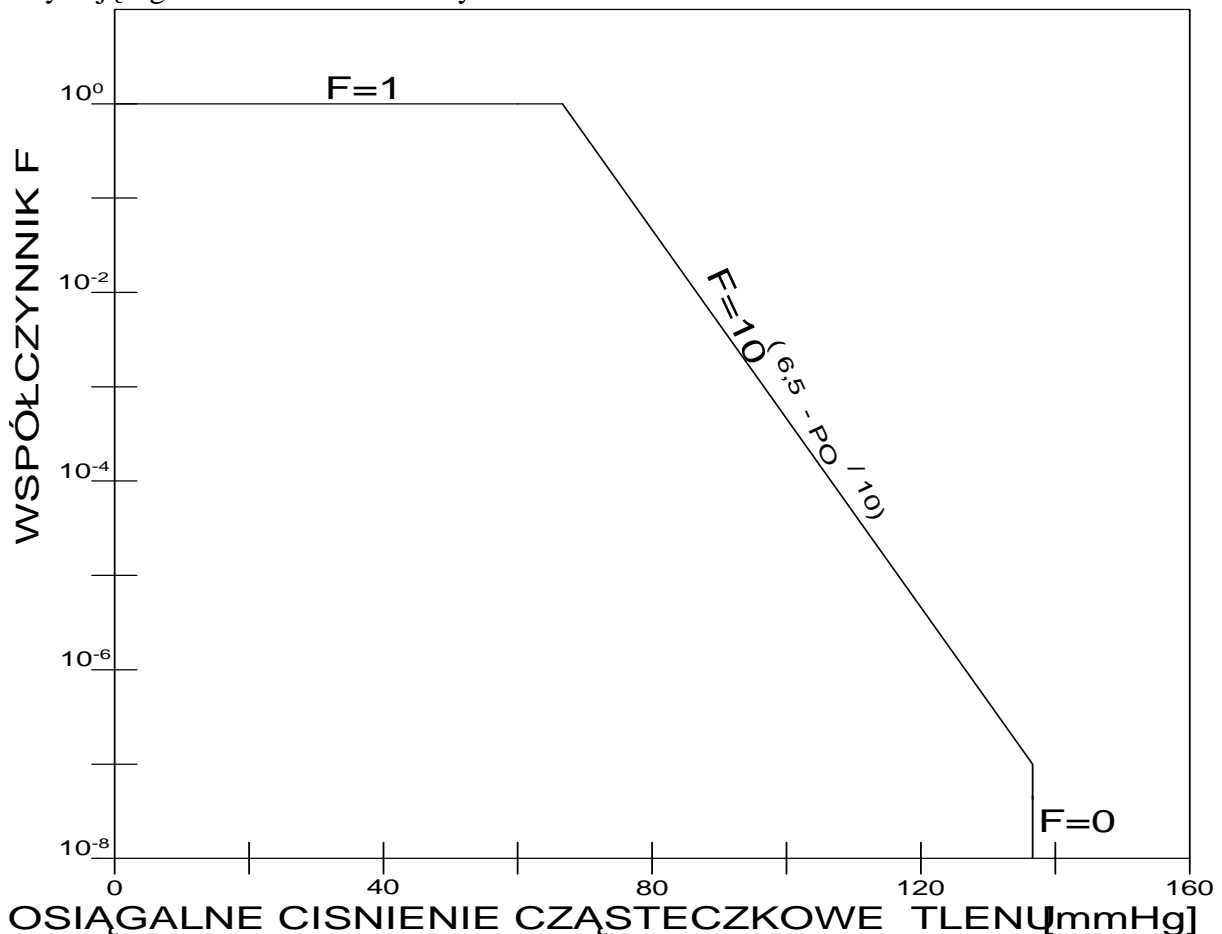
$$\Phi = \sum_{i=1}^n P_i \cdot F_i$$

gdzie:  $\Phi$  - 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 zależna jest 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)

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

### 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  $\Phi$  określający stopień zagrożenia (śmiertelność) związany z wystąpieniem ODH.

Na podstawie wartości współł.  $\Phi$  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	$\Phi$ (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	$3 \times 10^{-5}$ / godz.
Dewar - wyciek lub pęknięcie	$1 \times 10^{-6}$ / godz.
Awaria zasilania elektrycznego	$1 \times 10^{-4}$ / godz.
Cieczowe linie kriogeniczne - wyciek lub pęknięcie	$3 \times 10^{-6}$ / godz.
Magnesy - wyciek lub pęknięcie	$1 \times 10^{-6}$ / godz.

Wymiana wyposażenia zawierającego złącze bagnetowe - małe zdarzenie - duże zdarzenie	$3 \times 10^{-2}$ / dzień $1 \times 10^{-3}$ / dzień
---	--

TABELA 4

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

Zawory (dyszowe, przepływowe, miernicze)	pęknięcie	$1 \times 10^{-8}$ / godz.
Zawory (manualne)	pozostaje otwarty	$1 \times 10^{-4}$ / dzień
Zawory (bezpieczeństwa)	nie otwiera się przedwczesne otwarcie	$1 \times 10^{-5}$ / dzień $1 \times 10^{-4}$ / godz.
Spoiny, spawy	nieszczelność	$3 \times 10^{-7}$ / godz.
Druty	otwarte	$3 \times 10^{-6}$ / godz.
	zwarcie do ziemi	$3 \times 10^{-7}$ / godz.
	zwarcie do zasilania	$1 \times 10^{-8}$ / godz.

TABELA 5. BŁĘDY POPEŁNIONE PRZEZ CZŁOWIEKA

Prawdopodobieństwo $\times D^{-1}$	Zdarzenie
$10^{-3}$	Nieprawidłowy wybór przełącznika, przycisku itp.
$3 \times 10^{-3}$	Nieprawidłowe oznakowanie przyrządów i wyłączników
$10^{-2}$	Niewłaściwe ustawienie przyrządów po konserwacji
$3 \times 10^{-3}$	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
$10^{-1}$	Niedopatrzenie pracowników kolejnej, niedokładne sprawdzenie przez nich ustawienia przyrządów i obecnych warunków pracy
$5 \times 10^{-1}$	Źle przeprowadzona kontrola poprawności działania
0,2 – 0,3	Błędy popełnione w stresie wynikającym z zaistnienia zagrożenia

#### ZADANIA DO WYKONANIA

1. Wyznaczyć doświadczalnie odparowalność wskazanych przez prowadzącego naczyń Dewara.
2. Określić wg metody i danych opisanych w instrukcji maksymalną objętość naczynia Dewara z ciekłym azotem który może być przechowywany w hali laboratoryjnej przy klasie ODH równej zero (czyli min. koncentracji tlenu 18%). Przyjmując, że podczas awarii Dewara ciecz będzie z niego wypływać z natężeniem 2 kg/s, aż do całkowitego opróżnienia naczynia, określić czas po którym zbiornik zostanie opróżniony oraz wyznaczyć charakterystykę (przynajmniej 4 punkty) zmian koncentracji tlenu w czasie tego wypływu – obliczenia wykonać dla drugiego przypadku wentylacji.