

Czynniki chłodnicze – ograniczenia napełnienia i bezpieczeństwo użytkowników według dyrektywy Urządzenia ciśnieniowe, ISO 817 i PN-EN 378

Refrigerants – charge limits and user safety according to the Pressure Equipment Directive, ISO 817 and PN-EN 378

BARTOSZ ZAJĄCZKOWSKI, TOMASZ HAŁON, STEFAN RESZEWSKI

DOI 10.36119/15.2020.7.2

W artykule przedstawiono metodologię obliczania maksymalnych napełnień instalacji chłodniczych czynnikami chłodniczymi w zależności od ich palności i toksyczności. Metodologia została zaczerpnięta z ISO 817:2014 i EN 378-1:2016. Pokazano również przykłady obliczeń oraz przykłady rozwiązań technicznych, dzięki którym można rozwiązać problemy związane z projektowaniem wieloparowaczowych instalacji chłodniczych, postępując zgodnie z normami i praktyką inżynierską.

Słowa kluczowe: chłodnictwo, klimatyzacja, bezpieczeństwo, palność, toksyczność, normy

The article presents the methodology for calculating the maximum refrigerant charge in refrigeration installations depending on refrigerants flammability and toxicity. The methodology is taken from ISO 817: 2014 and EN 378-1: 2016. Examples of calculations and examples of technical solutions are also shown, thanks to which it is possible to solve problems related to the design of multi-evaporator refrigeration installations by following the standards and engineering practice.

Key words: refrigeration, air conditioning, safety, flammability, toxicity, standards

Wprowadzenie

Bezpieczeństwo jest jednym z najważniejszych, jeśli nie najważniejszym aspektem stosowania mediów roboczych, w tym czynników chłodniczych. Niezależnie od konsekwencji dla środowiska naturalnego, w każdym jednym przypadku producenci, instalatorzy i użytkownicy urządzeń chłodniczych oraz grzewczych muszą zdawać sobie sprawę z zagrożeń wynikających z zastosowania tych substancji.

Kwestia ta zyskała jeszcze większe znaczenie po wejściu w życie rozporządzenia F-gazowego, tj. nowego prawa dotyczącego fluorowanych gazów cieplarnianych (Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 517/2014), które stało się obowiązujące z dniem 1 stycznia 2015 roku. Rozporządzenie F-gazowe jest aktem prawnym, którego zadaniem jest działanie na rzecz ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Obok ogólnych założeń mających umożliwić

wprowadzenie w życie rezolucji Parlamentu Europejskiego z dn. 15 marca 2012 roku (dot. sposobu zapewnienia niezbędnej redukcji tącznych emisji gazów cieplarnianych w Unii Europejskiej do 2050 roku), rozporządzenie zawiera też punkty dotyczące bezpieczeństwa stosowania czynników chłodniczych. Paragraf 6 niniejszego rozporządzenia jest następującej treści:

„Aby zachęcić do korzystania z technologii mających zerowy lub niewielki wpływ na klimat, szkolenie osób fizycznych, które wykonują czynności związane z fluorowanymi gazami cieplarnianymi, powinno obejmować **informacje dotyczące technologii służących zastąpieniu i zmniejszeniu stosowania fluorowanych gazów cieplarnianych**. W związku z tym, że **niektóre rozwiązania alternatywne wobec fluorowanych gazów cieplarnianych**, stosowane w produktach i urządzeniach jako substytuty fluorowanych gazów cieplarnianych i w celu zmniejszania ich

zużycia, **mogą być toksyczne, łatwopalne lub znajdować się pod wysokim ciśnieniem**, Komisja powinna przeanalizować obowiązujące prawodawstwo Unii dotyczące szkolenia osób fizycznych **w zakresie bezpiecznego obchodzenia się z alternatywnymi czynnikami chłodniczymi** i powinna przekazać, w stosownym przypadku, Parlamentowi Europejskiemu i Radzie wnioski ustawodawczy mający na celu zmianę odpowiedniego prawodawstwa Unii.” (wyfuzuszenie własne).

Wpisując się w potrzebę szerokiego uświadamiania producentom, instalatorom i użytkownikom urządzeń ciśnieniowych wypełnionych czynnikami chłodniczymi, w niniejszym artykule zawarte zostały trzy najważniejsze dokumenty, w których praktyk chłodniczy lub praktyk ciepłownik może odnaleźć wskazówki na temat obchodzenia się z czynnikami roboczymi oraz obliczyć na ich podstawie limity ich zastosowania w projektowanych instalacjach. Będą to: Dyrektywa Urządzenia

Dr hab. inż. Bartosz Zajączkowski, prof. PWR, <https://orcid.org/0000-0002-7750-0658>, dr inż. Tomasz Hałon, dr inż. Stefan Reszewski, <https://orcid.org/0000-0002-4887-647X> – Katedra Techniki Ciepłej, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wrocławska. Polski Komitet Normalizacyjny, Komitet Techniczny Nr 5 ds. Chłodnictwa i Pomp Ciepła - Autor do korespondencji/Corresponding author: bartosz.zajaczkowski@pwr.edu.pl

ciśnieniowe PED oraz Norma Międzynarodowa ISO 817 i Norma Europejska wieloczęściowa EN 378 części od 1 do 3 z 2016 oraz EN 378-4:2016+A1:2019.

Normy i dyrektywy

Norma wg definicji jest to dokument przyjęty na zasadzie konsensu i zatwierdzony przez upoważnioną jednostkę organizacyjną ustalający – do powszechnego i wielokrotnego stosowania – zasady, wytyczne lub charakterystyki odnoszące się do różnych rodzajów działalności lub ich wyników i zmierzający do uzyskania optymalnego stopnia uporządkowania w określonym zakresie.

[ŹRÓDŁO: ISO/IEC Guide 2:2004, definicja 3.2]

Jednym z typów Norm Europejskich opracowywanych na potrzeby Unii Europejskiej są normy zharmonizowane. Norma zharmonizowana opracowana jest przez uznaną europejską organizację normalizacyjną (CEN, CENELEC lub ETSI).

- European Committee for Standardization (CEN);
- European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC);
- European Telecommunications Standards Institute (ETSI).

Norma zharmonizowana jest tworzona na wniosek Komisji Europejskiej skierowany do jednej z ww. organizacji.

Producenci, inne podmioty gospodarcze lub jednostki certyfikujące mogą stosować normy zharmonizowane jako jeden ze sposobów stwarzania domniemania, że produkty, usługi lub procesy są zgodne z odpowiednim prawodawstwem UE (dyrektywami lub rozporządzeniami).

Dyrektywy są jednym z podstawowych elementów systemu prawnego umożliwiającego swobodny obrót towarów w UE, pod warunkiem, że towary te spełniają zasadnicze wymagania w zakresie bezpieczeństwa w odniesieniu zarówno do ludzi, jak i środowiska naturalnego.

Jednym z przykładów najważniejszych dyrektyw mających zastosowanie w technologiach grzewczych i chłodniczych jest dyrektywa w sprawie urządzeń ciśnieniowych (ang. Pressure Equipment Directive). Najnowsza wersja tej dyrektywy weszła w życie 20 lipca 2016 r. Nazywana w skrócie PED oraz oznaczona numerem 2014/68/UE dyrektywa ciśnieniowa dotyczy projektowania, produkcji i oceny zgodności stacjonarnych urządzeń ciśnieniowych o maksymalnym dopuszczalnym ciśnieniu większym niż 0,5 bara. PED ustala również wymagania proceduralne dotyczące oceny zgodności urzą-

dzeń ciśnieniowych, do swobodnego wprowadzania na rynek europejski bez lokalnych barier prawnych.

Według zawartej w dyrektywie definicji „urządzenia ciśnieniowe” są to zbiorniki, rurociągi, osprzęt zabezpieczający oraz osprzęt ciśnieniowy, w stosownych przypadkach wraz z elementami zamocowanymi do części poddanych działaniu ciśnienia, takimi jak: kołnierze, dysze, króćce, podpory, uchwyty do podnoszenia. Bardziej szczegółowo „zbiornik” oznacza powłokę zaprojektowaną i zbudowaną w celu zawierania płynów pod ciśnieniem, wraz z elementami bezpośrednio przynależnymi, aż do miejsca połączenia z innym urządzeniem; zbiornik może się składać z więcej niż jednej przestrzeni ciśnieniowej.

Są to definicje bardzo szerokie, przez co dyrektywa ciśnieniowej podlega bardzo duża liczba urządzeń, w tym praktycznie wszystkie urządzenia chłodnicze i ciepłownicze. W instalacjach realizujących obiegi chłodnicze i grzewcze, można znaleźć wiele aparatów i urządzeń, które wchodzi w zakres stosowalności dyrektywy PED oraz odpowiednich norm zharmonizowanych. Na przykład są to sprężarki, odolejące, wymienniki ciepła (zwykle podchodzą pod zawartą w dyrektywie PED definicję rurociągów). Dotyczy to również szeregu urządzeń należących do kategorii osprzętu zabezpieczającego, tj. zaprojektowane w celu ochrony urządzeń ciśnieniowych przed przekraczaniem dopuszczalnych limitów, w tym urządzenia do bezpośredniego ograniczania ciśnienia, takie jak: zawory bezpieczeństwa, urządzenia zabezpieczające w postaci przepon bezpieczeństwa, pręty wybożeniowe, sterowane układy bezpieczeństwa do zrzutów ciśnienia (CSPRS) oraz urządzenia ograniczające.

W Dyrektywie PED zdefiniowano też w jaki sposób należy prawidłowo wykonywać pomiar ciśnienia – odnosząc je do ciśnienia atmosferycznego, tj. jako ciśnienie manometryczne. Zdefiniowano najwyższe dopuszczalne ciśnienie (oznaczone jako PS), tj. najwyższe ciśnienie, dla którego zaprojektowane jest urządzenie. Ciśnienie PS zawsze określane jest przez producenta urządzenia i zdefiniowane w miejscu przez niego określonym. Jest to miejsce przyłączenia urządzeń zabezpieczających lub ograniczających albo górna część urządzenia lub, jeśli nie jest to właściwe, dowolny określony punkt.

W kontekście niniejszego artykułu, tj. od strony bezpieczeństwa stosowania czynników chłodniczych, dyrektywa PED klasyfikuje substancje robocze na dwie grupy, które w uproszczeniu można

nazwać: płyny niebezpieczne i płyny bezpieczne.

- Grupa 1 obejmuje niebezpieczne płyny ogólnie definiowane jako: wybuchowe, łatwopalne, toksyczne, utleniające.
- Grupa 2 obejmuje wszystkie inne płyny.

Ogólne założenie jest takie, że instalacje zawierające substancje niebezpieczne, muszą spełniać wyższe wymagania ciśnieniowe, tak aby prawdopodobieństwo wystąpienia awarii i wycieku medium było możliwie najmniejsze.

EN 378

Podstawowym dokumentem normalizacyjnym regulującym kwestie bezpieczeństwa i ochrony środowiska w instalacjach chłodniczych i pompach ciepła jest norma wieloczęściowa EN 378 – Refrigerating systems and heat pumps – Safety and environmental requirements (pol. Instalacje chłodnicze i pompy ciepła – Wymagania dotyczące bezpieczeństwa i ochrony środowiska).

EN 378 dotyczy wymagań bezpieczeństwa i ochrony środowiska w zakresie projektowania, produkcji, konstrukcji, montażu, eksploatacji, konserwacji, naprawy i likwidacji instalacji chłodniczych oraz ich wyposażenia odnośnie do lokalnych i globalnych przepisów. W niniejszej normie nie zawarto wymagań dotyczących ostatecznego niszczenia czynników chłodniczych. Celem jej stosowania jest zminimalizowanie zagrożeń dla osób, mienia i środowiska ze strony instalacji chłodniczych i czynników chłodniczych. Zagrożenia te są związane z właściwościami fizycznymi i chemicznymi czynników chłodniczych oraz z ciśnieniami i temperaturami występującymi w obiegach chłodniczych. EN 378 jest normą zharmonizowaną tylko częściowo, harmonizacja z opisaną powyżej dyrektywą ciśnieniową PED dotyczy jej drugiej części (obejmującej swym zakresem projektowanie, konstrukcję, badanie, znakowanie i dokumentowanie).

Części EN 378 znane są polskim użytkownikom głównie z dwóch jej nowelizacji z 2008 r. (dostępna w polskiej wersji językowej jako PN-EN 378-1,2,3,4 z 2010 r, **wycofana**) oraz z 2016 r. (dostępna w polskiej wersji językowej jako PN-EN 378-1,2,3,4 z marca 2017 r., część 4 wycofana).

PN-EN 378 z składa się z następujących części:

- Część 1 (PN-EN 378-1:2017-03): Wymagania podstawowe, definicje, klasyfikacja i kryteria wyboru. Jednym

z najważniejszych elementów niniejszej części jest Załącznik E, w którym zawarto klasyfikację bezpieczeństwa i informacje o czynnikach chłodniczych (oznaczenie, masa cząsteczkowa, normalna temperatura wrzenia, grupa bezpieczeństwa, granice palności, GWP, ODP, grupa płynów PED itp.).

- Część 2 (PN-EN 378-2:2017-03): *Projektowanie, konstrukcja, badanie, znakowanie i dokumentowanie*. Dotyczy projektowania i produkcji systemów chłodniczych. Określa różne poziomy ciśnienia, które powinny być zastosowane, układ rurociągów instalacji chłodniczej typ zaworów i urządzeń regulujących ciśnienie, które mają być stosowane. Określa także procedury badania i procedury akceptacji.
- Część 3 (PN-EN 378-3:2017-03): *Usytuowanie instalacji i ochrona osobista*. Dotyczy bezpieczeństwa personelu i zakładu. Definiuje zasady rządzące projektowaniem i budową maszynowni wraz z określonymi wymaganiami dotyczącymi czynników chłodniczych w różnych grupach.
- Część 4 (PN-EN 378-4+A1:2019-12): *Obsługa, konserwacja, naprawa i odzysk*. Określa wymogi bezpieczeństwa i ochrony środowiska podczas eksploatacji, konserwacji i napraw instalacji.

W EN 378-1:2016 zawarto terminy i definicje stosowane we wszystkich częściach niniejszej normy. Podano również system klasyfikacji:

- rodzaju istniejących systemów chłodniczych;
- wykorzystania przestrzeni roboczych;
- czynników chłodniczych.

Ograniczenie napełnienia według EN-378

Jednym z podstawowych zastosowań EN-378 jest obliczanie dopuszczalnego napełnienia instalacji czynnikiem chłodniczym. W czasach zwiększonej świadomości ekologicznej, większość zastępników dla stosowanych dotychczas mediów roboczych (HFC i starszych HCFC/CFC) to albo substancje naturalne (np. węglowodory lub amoniak), albo olefiny (czynniki typu HFO). Niestety, substancje te są zazwyczaj palne i wybuchowe, a więc niezwykle istotne stają się wszelkie kwestie związane z bezpieczeństwem ich stosowania. To jest właśnie podstawowe zadanie EN-378, której pierwsza część odnosi się do kluczowego zagadnienia – ilości czynnika w instalacji. Dopuszczalną ilość medium oblicza się na podstawie odpo-

wiedniego algorytmu, który opiera się na czterech parametrach:

- kategorii dostępu do pomieszczenia, w którym znajduje się instalacja (podział na a, b, i c);
- rodzaju instalacji chłodniczej (bezpośrednia lub pośrednia);
- klasyfikacji bezpieczeństwa czynnika chłodniczego (np. A1 lub B3);
- klasyfikacji lokalizacji instalacji (np. Klasa I lub Klasa IV).

Rozpatruje się trzy kategorie dostępu do pomieszczenia, w którym znajduje się instalacja chłodnicza: od najniższej (a), opisującej pomieszczenie ogólnego dostępu, gdzie ludzie mają nieograniczone możliwości przemieszczania się, poprzez pomieszczenia o dostępie nadzorowanym (b) dla określonej liczby osób (także odpowiednio przeszkolonych), aż do pomieszczeń o dostępie kontrolowanym (c) tylko dla osób przeszkolonych i uprawnionych.

Do kategorii (a) zalicza się np. sklepy wielkopowierzchniowe, szkoły, hotele, sale wykładowe, restauracje, itp. Do kategorii (b) należą biura, laboratoria, warsztaty, ogólnie rozumiane miejsca produkcyjne. Do najbardziej restrykcyjnej kategorii (c) należą przede wszystkim przestrzenie wrażliwej produkcji żywności, chemikaliów, leków, w tym np. rzeźnie, mleczarnie, chłodnie, itp.

Jeśli chodzi o rodzaj instalacji chłodniczej wyróżnia się dwie konfiguracje mające wpływ na napełnienie: bezpośrednią i pośrednią (przykłady z EN-378 na rys. 1). W instalacjach bezpośrednich parowacz, skraplacz lub chłodnice gazu instalacji chłodniczej znajdują się w bezpo-

Jedną z najważniejszych klasyfikacji opisanych w części 1 EN-378 jest klasyfikacja bezpieczeństwa czynnika chłodniczego. Jest ona zaadaptowana z ISO 817 i składa się z dwuznakowych oznaczeń kodowych. Pierwszy znak jest zawsze literą (A lub B) i oznacza toksyczność czynnika chłodniczego drugi znak jest zawsze cyfrą (1, 2 lub 3) i oznacza stopień palności. W roku 2014 w ISO-817:2014 wprowadzono dodatkową klasę palności tzw. czynniki o obniżonej palności oznaczane kodem 2L, w odróżnieniu do łatwopalnych oznaczanych kodem 2). Ta nowa klasyfikacja została odzwierciedlona w EN-378-1:2016, załącznik E.

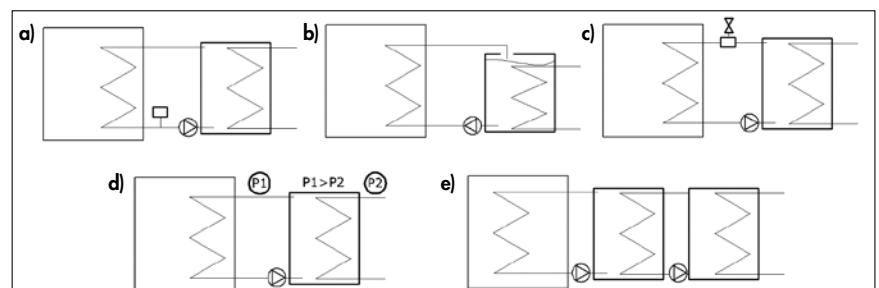
Klasa 1 (brak rozprzestrzeniania się płomienia)

Jednoskładnikowe czynniki chłodnicze lub mieszaniny czynników chłodniczych, które nie wykazują rozprzestrzeniania się płomienia przy badaniu w powietrzu w temperaturze 60°C i ciśnieniu 101,3 kPa.

Klasa 2L (obniżona palność)

Jednoskładnikowe czynniki chłodnicze lub mieszaniny czynników chłodniczych, które spełniają wszystkie następujące warunki:

- wykazują rozprzestrzenianie się płomienia podczas badania w temperaturze 60°C i 101,3 kPa;
- mają dolną granicę palności (LFL) > 3,5% objętości;
- mają ciepło spalania <19 000 kJ/kg, oraz



Rysunek 1 Różne rodzaje systemów pośrednich: a) zamknięty, b) wentylowany, c) wentylowany zamknięty, d) wysokociśnieniowy, e) podwójny

średnim kontakcie z powietrzem lub substancją, która ma być chłodzona lub grzana. Natomiast w instalacji pośredniej wymienniki ciepła (parowacz, skraplacz, chłodnica gazu) odpowiednio chłodzą lub ogrzewają płyn pośredniczący przenoszący ciepło. Medium pośredniczące przepływa w obiegu zamkniętym obejmującym wymienniki ciepła pozostające w bezpośrednim kontakcie z substancją, która ma być chłodzona lub ogrzana.

- mają maksymalną prędkość spalania ≤ 10 cm/s przy badaniu w 23°C i 101,3 kPa.

Klasa 2 (łatwopalna)

Jednoskładnikowe czynniki chłodnicze lub mieszaniny czynników chłodniczych, które spełniają wszystkie następujące warunki:

- wykazują rozprzestrzenianie się płomienia podczas badania w temperaturze 60°C i 101,3 kPa,

- b) mają dolną granicę palności (LFL) > 3,5% objętości, oraz
c) mają ciepło spalania < 19000 kJ/kg.

Klasa 3 (wyższa palność)

Jednoskładnikowe czynniki chłodnicze lub mieszaniny czynników chłodniczych, które spełniają następujące warunki:

- a) wykazują rozprzestrzenianie się płomienia podczas badania w temperaturze 60°C i 101,3 kPa oraz
b) mają dolną granicę palności (LFL) ≤ 3,5% objętości lub mają ciepło spalania wynoszące ≥ 19000 kJ/kg.

Czynniki chłodnicze są przypisane do jednej z dwóch klas toksyczności, A lub B, na podstawie dopuszczalnej ekspozycji:

- klasa A (niska toksyczność) oznacza czynniki chłodnicze, dla których limit ekspozycji wynosi 400 ppm lub więcej;
- klasa B (wysoka toksyczność) oznacza czynniki chłodnicze, dla których limit ekspozycji wynosi mniej niż 400 ppm.

Kombinacja klasyfikacji toksyczności i palności daje osiem oddzielnych klasyfikacji bezpieczeństwa dla pojedynczych związków chłodniczych lub mieszanin czynników chłodniczych, co przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1 Kombinacja klasyfikacji toksyczności i palności

	Niska toksyczność	Wysoka toksyczność
Wysoka palność	A3	B3
Palność	A2	B2
Niska Palność	A2L	B2L
Brak propagacji płomienia	A1	B1

Ostatnim kryterium jest lokalizacja instalacji chłodniczej. Istnieją cztery klasy lokalizacji instalacji chłodniczych zgodnie z EN-378-1:2016.

- Klasa IV – Obudowa wentylowana: Wszystkie części zawierające czynnik chłodniczy znajdują się w obudowie wentylowanej.
- Klasa III – Maszynownia lub otwarta przestrzeń: Wszystkie części zawierające czynnik chłodniczy znajdują się w maszynowni lub na otwartej przestrzeni.
- Klasa II – Sprężarki w maszynowni lub na otwartej przestrzeni: Wszystkie sprężarki i zbiorniki ciśnieniowe znajdują się w maszynowni lub na otwartej przestrzeni. Wężownice i rurociągi, w tym zawory, mogą znajdować się w zajmowanej przestrzeni użytkowej.
- Klasa I – Wyposażenie mechaniczne zlokalizowane w przestrzeni użytkowej: Instalacja chłodnicza lub części

zawierające czynnik chłodniczy znajdują się w przestrzeni użytkowej.

Do wyznaczania ograniczenia napełnienia czynnikiem chłodniczym instalacji chłodniczej należy stosować metodę podaną w EN-378-1:2016, załącznik C:

- wyznaczyć odpowiednią dla systemu kategorię dostępu (a, b lub c) i lokalizację (I, II, III lub IV);
- wyznaczyć klasę toksyczności czynnika chłodniczego;
- wyznaczyć ograniczenie napełnienia czynnikiem instalacji chłodniczej na podstawie toksyczności;
- wyznaczyć klasę palności czynnika chłodniczego stosowanego w instalacji chłodniczej (jako 1, 2L, 2 lub 3);
- wyznaczyć ograniczenie napełnienia czynnikiem instalacji chłodniczej na podstawie palności;
- zastosować **najniższe** napełnienie czynnikiem chłodniczym otrzymanym zgodnie z c) i e).

Przykład obliczania napełnienia według EN 378

Sprawdzić limit napełnienia instalacji chłodniczej do klimatyzacji przestrzeni biurowej zajmowanej przez ludzi. System bezpośredni oparty jest na propanie R290 i jest instalowany w sposób kanałowy na oknie w pomieszczeniu użytkowym o powierzchni 30 m². Ładunek czynnika chłodniczego m wynosi 300 g.

Analiza:

- kategoria dostępu – dostęp nadzorowany, **b**;
- klasyfikacja lokalizacji – **Klasa I**;
- kategoria instalacji – **bezpośrednia**;
- czynnik R290 (propan) – klasyfikacja bezpieczeństwa **A3**; LFL = 0,038 kg/m³;
- **komfort człowieka**.

Na podstawie tabeli C.2 z załącznika C do EN 378-1:2016 wynika, że napełnienie instalacji powinno zostać wyznaczone zgodnie z rozdziałem C.2 załącznika C oraz dodatkowo nie może być większe niż 1,5 kg lub $m_2 = 26 \text{ m}^3 \times \text{LFL}$ (należy wybrać większą wartość).

Najpierw oblicza się limit:

$$m_2 = 26 \text{ m}^3 \cdot \text{LFL} = 26 \text{ m}^3 \cdot 0,038 \text{ kg/m}^3 = 0,988 \text{ kg}$$

Jako że 1,5 kg jest większe niż m_2 , to należy wybrać 1,5 kg. Następnie należy sprawdzić maksymalne napełnienie m_{max} zgodnie z rozdziałem C.2, wzór C.1:

$$m_{\text{max}} = 2,5 \cdot \text{LFL}^{5/4} \cdot h_0 \cdot A^{0,5}$$

Gdzie:

LFL – to dolna granica palności w kg/m³;

h_0 – to montażowa wysokość urządzenia w m, wg normy, dla urządzenia montowanego w oknie przyjmuje się 1 m;

A – to powierzchnia podłogi w pomieszczeniu.

$$m_{\text{max}} = 2,5 \cdot 0,038^{5/4} \cdot 1 \cdot 30^{0,5} = 0,23 \text{ kg}$$

Wartość m_{max} jest mniejsza niż 1,5 kg, więc należy zastosować m_{max} . Oznacza to, że w danym przypadku należy zamontować inne urządzenie o mniejszym napełnieniu.

W części 1 EN 378 podano również wzór C.2 do wyznaczenia minimalnej powierzchni podłogi dla urządzeń o danym napełnieniu. W przypadku stosowanego w tym przykładzie urządzenia minimalna powierzchnia pomieszczenia powinna wynosić:

$$A_{\text{min}} = \left(\frac{m}{2,5 \cdot \text{LFL}^{5/4} \cdot h_0} \right)^2 = \left(\frac{0,3}{2,5 \cdot 0,038^{5/4} \cdot 1} \right)^2 = (7,15)^2 = 51,1568 \text{ m}^2 \approx 51,2 \text{ m}^2$$

Stąd dla różnych wysokości montażu, minimalna powierzchnia pomieszczenia będzie inna dla danego urządzenia. Wyniki dla powyższego przykładu przedstawiono w tabeli 2 (wartości zaczerpnięte z tablicy H.1 EN-378).

Tabela 2 Minimalna powierzchnia pomieszczenia dla takiej samej instalacji przy różnym miejscu montażu

Miejsce montażu	Wysokość, m	Minimalna powierzchnia pomieszczenia, m ²
Podłoga	0,6	142,1
Ściana	1,8	15,8
Okno	1,0	51,2
Sufit	2,2	10,6

Przykład obliczania napełnienia według EN 378-1

Sprawdź limit napełnienia instalacji chłodniczej do chłodzenia mikroprocesorów w serwerowni. System bezpośredni oparty jest na czynniku chłodniczym R245fa i jest instalowany tak, że parowacz znajduje się na procesorze, a cała reszta urządzeń usytuowana jest w maszynowni. Ładunek czynnika chłodniczego m wynosi 1 kg.

Analiza:

- kategoria dostępu – dostęp nadzorowany, **b**;
- klasyfikacja lokalizacji – **Klasa II**;
- kategoria instalacji – **bezpośrednia**;

- czynnik chłodniczy R245fa – klasyfikacja bezpieczeństwa B1; LFL = 0,0 kg/m³;
- inne.

Na podstawie tabeli C.2 z załącznika C do EN 378-1:2016 wynika, że napełnienie instalacji nie jest ograniczane ze względu na palność.

Toksyczność według ISO 817 i EN 378-1

W kontekście bezpieczeństwa zastosowania czynników chłodniczych, w ISO 817:2014 zawarto algorytm obliczeniowy oraz wszelkie niezbędne dane umożliwiające obliczenie granicznego stężenia czynnika chłodniczego w powietrzu (ang. Refrigerant Concentration Limit, RCL). Zgodnie z definicją zawartą w normie, RCL określa maksymalne stężenie czynnika chłodniczego w powietrzu, określone i ustalone w celu zmniejszenia ryzyka wystąpienia toksyczności ostrej, uduszenia lub zapłonu. Przez toksyczność ostrą (ang. acute toxicity) należy rozumieć niekorzystny wpływ na zdrowie w następstwie jednorazowego krótkotrwałego narażenia na kontakt z czynnikiem chłodniczym. W większości przypadków nie ma badań nad wpływem na zdrowie w związku z długotrwałym kontaktem z czynnikami chłodniczymi o niskiej toksyczności ostrej.

Wartość RCL ustala się jako najniższą z trzech wartości:

- **limit narażenia na działanie toksyczności ostrej (ang. acute-toxicity exposure limit, ATEL)** – zdefiniowany jako maksymalne zalecane stężenie czynnika chłodniczego ustalone zgodnie z ustalonymi systemami i mające na celu zmniejszenie ryzyka niebezpieczeństwa toksyczności ostrej dla ludzi w przypadku uwolnienia czynnika chłodniczego.
- **limit pozbawienia tlenu (ang. oxygen deprivation limit, ODL)** – zdefiniowany jako maksymalne stężenie czynnika chłodniczego lub innego gazu, które może obniżyć ilość tlenu poniżej poziomu niezbędnego do normalnego oddychania.
- **limit stężenia palności (ang. flammable concentration limit, FCL)** – obliczany jako 20% wartości dolnej granicy palności (LFL). Dolna granica palności wyznacza minimalne stężenie czynnika chłodniczego, przy którym istnieje możliwość rozprzestrzeniania się płomienia w jednorodnej mieszaninie czynnika chłodniczego i powietrza. Wyznaczana jest eksperymentalnie

dla różnych czynników chłodniczych, a sposób jej wyznaczania opisano w ISO 817, załącznik B.

Podstawowym wskaźnikiem toksyczności czynnika chłodniczego jest tzw. Acute-Toxicity Exposure Limit (ATEL), czyli limit narażenia na działanie toksyczności ostrej. Wartość ATEL wyrażona jest w ilości cząsteczek na milion (ppm) jako najniższą wartość z czterech wymienionych poniżej wskaźników narażenia toksycznego (ang. Toxic Concentration Factors, TCF):

- wskaźnik śmiertelności,
- wskaźnik zaburzeń pracy serca,
- wskaźnik efektu znieczulającego odzwierciedlający oddziaływanie czynnika chłodniczego na układ nerwowy, gdzie przez efekt znieczulający (ang. anaesthetic effect) rozumie się upośledzenie zdolności organizmu do odczuwania bólu i innej stymulacji sensorycznej,
- wskaźnik innych oddziaływań utrudniających ucieczkę oraz powodujących obrażenia trwałe.

Wartości poszczególnych wymienionych powyżej wskaźników TCF określa się na podstawie obliczeń opisanych w odpowiednich sekcjach ISO 817. Należy obliczyć każdy z 4 ww. czynników i wybrać najniższy. Następnie sprawdzić czy mieszanina zalicza się do klasy toksyczności A, czy B. Wzór ogólny może zostać zapisany w postaci:

$$a_{mieszaniny} = \frac{1}{\frac{x_1}{a_1} + \frac{x_2}{a_2} + \dots + \frac{x_n}{a_n}}$$

Gdzie $a_{mieszaniny}$ to wybrany wskaźnik danej mieszaniny, a_n wybrany wskaźnik n-tego składnika, x_n to zawartość molowa n-tego składnika.

Dodatkowo każdy ze wskaźników należy przemnożyć przez odpowiednią wartość w zależności od metodologii badań. Dokładne informacje zawarte są w ISO 817, Rozdział 8.1.

Przykład obliczania napełnienia według ISO 817

Do instalacji chłodniczej zdecydowano się użyć mieszanki propanu R290 z R245fa o stosunku molowym 0,4/0,6 (0,4 Propan, 0,6 R245fa). Sprawdź limit napełnienia instalacji chłodniczej do chłodzenia mikroprocesorów w serwerowni. System bezpośredni oparty jest na danej mieszaninie i jest instalowany tak, że parowacz znajduje się na procesorach, a cała reszta urządzeń usytuowana jest w maszynowni. Ładunek czynnika chłodniczego m wynosi 1 kg.

Analiza:

- kategoria dostępu – dostęp nadzorowany, b;
- klasyfikacja lokalizacji – Klasa II;
- kategoria instalacji – bezppośrednia;
- czynnik chłodniczy R245fa/R290;
- inne zastosowania.

Wyznaczenie wskaźnika śmiertelności dla danej mieszaniny:

$$a_{R290} = 200\ 000$$

$$a_{R245fa} = 203\ 000$$

Wskaźniki zostały przebadane na szczurach, więc należy wykorzystać 28,3% podanej wartości LC_{50}

$$a_{mieszaniny} = \frac{1}{\frac{0,4}{200000 \cdot 0,283} + \frac{0,6}{203000 \cdot 0,283}} = 57106$$

Wyznaczenie wskaźnika zaburzeń pracy serca dla danej mieszaniny:

Jeśli wskaźnik śmiertelności jest mniejszy niż 10000, to nie trzeba wyznaczać wskaźnika zaburzeń pracy serca. W tym wypadku jednak wynosił on więcej, więc obliczenia muszą zostać wykonane.

$$b_{R290} = 50\ 000$$

$$b_{R245fa} = 34\ 100$$

Dla obu przypadków dostępny jest wskaźnik NOAEL dla zaburzeń pracy serca, stąd wg normy należy przyjąć 100% jego wartości.

$$b_{mieszaniny} = \frac{1}{\frac{0,4}{50000} + \frac{0,6}{34100}} = 39069$$

Wyznaczenie wskaźnika efektu znieczulającego dla danej mieszaniny:

$$c_{R290} = 280\ 000$$

$$c_{R245fa} = 50\ 600$$

Dla R290 dostępny jest wskaźnik EC_{50} , to oznacza, że należy przyjąć 50% jego wartości do obliczeń (wymagania normy), natomiast dla R245fa wskaźnik ten jest nie dostępny (nie przebadany), stąd trzeba przyjąć 100% wartości NOAEL.

$$c_{mieszaniny} = \frac{1}{\frac{0,4}{280000 \cdot 0,5} + \frac{0,6}{50600 \cdot 1}} = 67958$$

Inne oddziaływania utrudniające ucieczkę nie zostały zaobserwowane dla wybranych dwóch czynników chłodniczych, stąd nie uwzględnia się tego wskaźnika w dalszej analizie.

Po wykonaniu obliczeń wszystkich wskaźników, należy wybrać najniższy i zaokrąglić do 2 liczby znaczącej. W tym przypadku ATEL mieszaniny wynosić

będzie 39 000 ppm. Oznacza to, że mieszanina ta powinna zostać zakwalifikowana do kategorii toksyczności A, gdyż jej ATEL > 400 ppm.

Na potrzeby instalatorskie nie są to jednak obliczenia konieczne w przypadku stosowania standardowych mieszanin lub czynników chłodniczych. W tabeli E.1 załącznika E przedstawiono wartości ATEL/ODL oraz klasę toksyczności A lub B dla większości stosowanych aktualnie czynników chłodniczych. Na podstawie tej klasy i tabeli C.1 z załącznika C można wyznaczyć maksymalne napełnienie instalacji chłodniczej.

Przykład obliczania napełnienia według EN 378-1:2016

Sprawdź limit napełnienia instalacji chłodniczej do klimatyzacji przestrzeni biurowej zajmowanej przez ludzi. System bezpośredni oparty jest na propanie R290 i jest instalowany w sposób kanałowy na oknie w pomieszczeniu użytkowym o powierzchni 30 m². Ładunek czynnika chłodniczego *m* wynosi 300 g. Biuro znajduje się na piętrze posiadającym wyjścia ewakuacyjne.

Analiza:

- kategoria dostępu – dostęp nadzorowany, **b**;
- klasyfikacja lokalizacji – **Klasa I**;
- kategoria instalacji – **bezpośrednia**;
- czynnik chłodniczy R290 (propan) – klasyfikacja bezpieczeństwa **A3**; ATEL/ODL = 0,09 kg/m³.

Według EN 378-1:2016 załącznik C, w tym wypadku czynnik chłodniczy może być stosowany bez ograniczeń. Należy jednak pamiętać, że ze względu na zagrożenie pożarowe, mimo wszystko, nie można wprowadzić do instalacji więcej niż 230 g czynnika chłodniczego.

Przykład obliczania napełnienia według EN 378-1:2016

Sprawdź limit napełnienia instalacji chłodniczej do chłodzenia mikroprocesorów w serwerowni. System bezpośredni oparty jest na czynniku chłodniczym R245fa i jest instalowany tak, że parowacz znajduje się na procesorach, a cała reszta urządzeń usytuowana jest w maszynowni. Ładunek czynnika chłodniczego *m* wynosi 1 kg.

Analiza:

- kategoria dostępu – dostęp nadzorowany, **b**;
- klasyfikacja lokalizacji – **Klasa II**;
- kategoria instalacji – **bezpośrednia**;
- czynnik chłodniczy R245fa – klasyfikacja bezpieczeństwa **B1**; ATEL/ODL = 0,19 kg/m³;
- inne zastosowania.

Na podstawie tabeli C.1 z załącznika C do EN 378-1:2016 wynika, że napełnienie instalacji nie może być większe niż 25 kg.

Warto jednak zauważyć, że w tym przypadku EN 378-1:2016 zaleca stosowanie wymagań dla maszynowni podanych w EN 378-3:2016. Są to m.in.: drzwi szczelnie dopasowane, samozamykające i otwierane od wewnątrz; nie powinno dochodzić do żadnego przepływu powietrza poprzez maszynownię do przestrzeni użytkowej lub z niej, chyba że powietrze jest prowadzone w szczelnym kanale. Na zewnątrz maszynowni, w pobliżu drzwi prowadzących do niej, należy umieścić zdalny wyłącznik awaryjny, służący do wyłączenia instalacji chłodniczej; podobnie działający wyłącznik powinien być umieszczony w odpowiednim miejscu wewnątrz maszynowni. Wymieniono tu tylko kilka przykładów wymagań EN 378-3:2016.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono metodologię obliczania maksymalnych napełnień instalacji chłodniczych czynnikami chłodniczymi w zależności od ich palności i toksyczności. Metodologia została zaczerpnięta z ISO 817:2014 i EN 378-1:2016. Pokazano również przykłady obliczeń. Przykłady obliczeń przedstawione w artykule wskazują w jaki sposób można rozwiązać problemy związane z projektowaniem wieloparowcowych instalacji chłodniczych, postępując zgodnie z normami i praktyką inżynierską.

Najbliższym przykładem, który wymaga takich rozważań jest instalacja chłodnicza sklepów wielkopowierzchniowych. Odbiorniki mocy chłodniczej pracują na trzech wartościach temperatury odparowania co komplikuje zadanie. Wcześniej instalacje chłodnicze były realizowane w systemie bezpośrednim po stronie parownika przy wykorzystaniu jednego lub dwóch zestawów sprężarkowych, z których każdy utrzymywał odpowiednie ciśnienie odparowania w parownikach. Zestawy sprężarkowe w systemie bezpośrednim przekazywały odebrane ciepło od produktów w skraplaczach chłodzonych powietrzem.

Kierując się normami określającymi maksymalne napełnienie, nawet bez wykonywania skomplikowanych obliczeń, widać, że nie można zgodnie z EN 378-1:2016 zaprojektować taką instalację w sposób znany z technologii stosowanej w przeszłości z czynnikami chłodniczymi CFC, HCFC lub HFC.

Zakładając, że czynnikiem chłodniczym w instalacji chłodniczej ze względu

na maksymalizację COP oraz minimalizację efektu cieplarnianego obiegu jest R290 instalację chłodniczą można rozwiązać na dwa sposoby.

W pierwszym przypadku proponowany jest system chłodniczy z pośrednim przekazywaniem ciepła po stronie skraplacza, co powoduje, że każdy odbiornik mocy chłodniczej w sklepach wielkopowierzchniowych może mieć maksymalne napełnienie 230 g ze względów pożarowych. Wobec powyższego instalacja chłodnicza zostaje uproszczona do agregatów sprężarkowych ze skraplaczami chłodzonymi cieczą. Zdecydowanie zmniejsza to długość rurociągów z czynnikiem chłodniczym, zmniejszając wymagane napełnienie instalacji chłodniczej. Ciecz chłodząca skraplacze jest wychładzana powietrzem w wentylatorowych chłodnicach cieczy potocznie określanych dry – coolerami. System chłodniczy jest bezpieczny, spełnia wymagania normy, jest efektywny pod względem energetycznym i bezpieczny od strony eksploatacyjnej.

Drugi sposób na realizację instalacji chłodniczej to odbiór ciepła od produktów w sposób pośredni za pomocą cieczy niskokrzepnących (wodne roztwory glikolu monopropylenowego lub mrówczanu potasu) i usunięcie odebranego ciepła w sposób bezpośredni po stronie skraplacza do powietrza atmosferycznego. Za realizację efektu usunięcia ciepła odpowiedzialne jest urządzenie do schładzania cieczy, którego napełnienie czynnikiem chłodniczym R290 w jednym obiegu niezależnym może wynosić nawet 10 kg. Ponieważ urządzenie chłodnicze może mieć kilka niezależnych obiegów lub może posiadać kilka niezależnych źródeł mocy chłodniczej, z których każde może mieć napełnienie 10 kg ograniczenie mocą lub napełnieniem w praktyce nie ma miejsca. Czynniki chłodnicze zawarty w urządzeniu nie ma kontaktu z pomieszczeniem klasy (a), którym jest sklep wielkopowierzchniowy, wobec czego nie stanowi żadnego zagrożenia dla ludzi, którzy zgodnie z normą nie powinni mieć do niego dostępu.

Oba rozwiązania są obecnie powszechnie stosowane na rynku. W odczuciu autorów większy potencjał ma drugie z opisanych rozwiązań ze względu na możliwość wykorzystania w stopniu optymalnym odpadowego ciepła pary przegrzanej po stronie tłocznej oraz ciepła skraplania R290. Oba rozwiązania jednak powinny być rozpatrywane równorzędnie i indywidualnie dla każdego z obiektów.