



Uwarunkowania projektowania instalacji HVAC w pracowniach diagnostyki obrazowej i medycyny nuklearnej

Design conditions for hvac systems in diagnostic imaging and nuclear medicine facilities



Dr inż. Sylwia Szczesniak

ORCID ID: [0000-0003-4358-0263](https://orcid.org/0000-0003-4358-0263)

Wydział Inżynierii Środowiska

Politechnika Wrocławska

PZITS O. Dolnośląski

sylwia.szczesniak@pwr.edu.pl

Słowa kluczowe: wentylacja i klimatyzacja, diagnostyka obrazowa, medycyna nuklearna, wyrzut helu, pomieszczenia MRI

Streszczenie

Celem artykułu jest analiza złożonych uwarunkowań projektowania instalacji HVAC w pracowniach diagnostyki obrazowej i medycyny nuklearnej. Artykuł przedstawia analizę aktualnego stanu prawnego i technicznego w Polsce, w tym przepisów Prawa atomowego oraz rozporządzeń Ministra Zdrowia. Ze względu na brak szczegółowych krajowych wytycznych technicznych dla systemów ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji (HVAC) w tych obszarach, przeprowadzono analizę porównawczą międzynarodowych standardów: niemieckiego (DIN 1946-4), amerykańskiego (ASHRAE 170), szwajcarskiego (SWKI VA105-01) oraz francuskiego (NF S90-351), a także polskich wytycznych branżowych. Analiza wykazała, że polskie regulacje definiują bezpieczeństwo radiologiczne, ale nie określają konkretnych parametrów technicznych dla HVAC, takich jak krotność wymian powietrza czy klasy filtracji. Wskazano, że pomieszczenie diagnostyczne jest integralnym elementem technologicznym aparatury, a systemy HVAC są kluczowe dla jej niezawodności. Projektowanie tych przestrzeni wymaga zintegrowanego podejścia łączącego wiedzę inżynierską z fizyką procesów medycznych oraz wymaganiami ustawowymi. Ze względu na luki w krajowych przepisach, niezbędne jest opieranie się na standardach międzynarodowych i wytycznych producentów sprzętu.

Keywords: HVAC, diagnostic imaging facilities, nuclear medicine, quench, MRI examination rooms

Abstract

The aim of this paper is to analyse the complex determinants involved in the design of HVAC systems for diagnostic imaging and nuclear medicine facilities. The paper presents an assessment of the current legal and technical framework in Poland, including the provisions of the Atomic Law and the relevant regulations of the Minister of Health. Due to the absence of detailed national technical guidelines for heating, ventilation and air-conditioning (HVAC) systems in these areas, a comparative analysis of international standards was undertaken, including the German standard (DIN 1946-4), the American standard (ASHRAE 170), the Swiss guideline (SWKI VA105-01), and the French standard (NF S90-351), as well as relevant Polish industry guidelines. The analysis demonstrated that Polish regulations define radiological safety requirements but do not specify explicit technical HVAC parameters, such as air change rates or filtration classes. It is emphasised that the diagnostic room constitutes an integral technological component of the medical equipment, and that HVAC systems are critical to its operational reliability. The design of such spaces requires an integrated approach combining engineering expertise with an understanding of medical process physics and statutory requirements. Considering the gaps in national regulations, reliance on international standards and equipment manufacturers' guidelines is essential.

Wstęp

Dążąc do poznania tego, co niewidoczne, człowiek nauczył się „zaglądać pod skórę” nie używając skalpela. Wszystko zaczęło się 8 listopada 1895 r., kiedy Wilhelm Conrad Röntgen odkrył promieniowanie X, wykonując pierwsze zdjęcie dłoni swojej żony. W 1901 r. otrzymał za to pierwszą Nagrodę Nobla z fizyki. Rok później Henri Becquerel odkrył promieniotwórczość uranu, a Maria Skłodowska-Curie wraz z Piotrem Curie rozwinęła badania nad tym zjawiskiem (Nobel 1903), a następnie odkryła polon i rad (Nobel 1911). Jej prace stworzyły podstawy

terapii izotopowych i obrazowania z użyciem radioizotopów. Podczas I Wojny Światowej mobilne jednostki do badań radiologicznych (*Röntgen* RTG) tzw.: małe Curie umożliwiały szybkie wykorzystanie diagnostyki w praktyce klinicznej. Przez dekady RTG dawało obraz płaski. Przełom nastąpił w 1972 r. wraz z tomografią komputerową Hounsfielda i Cormacka (Nobel 1979), która umożliwiła rekonstrukcję przekrojów warstwowych. W latach 80. zeszłego wieku do praktyki klinicznej wszedł rezonans magnetyczny (Lauterbur, Mansfield – Nobel 2003), pozwalający na obrazowanie bez promieniowania jonizującego, ale z wysokim kontrastem tkanek miękkich. Było to możli-

we dzięki analizie sygnału protonów wodoru w silnym polu magnetycznym. Obecnie standardem staje się obrazowanie hybrydowe, np. Pozytonowa Tomografia Emisyjna (*Positron Emission Tomography* PET) / Tomografia Komputerowa (*Computed Tomography* CT), łączące dane anatomiczne CT z informacją funkcjonalną PET. Radioznaczniki (najczęściej ^{18}F -FDG) umożliwiają ocenę metabolizmu tkanek i wczesne wykrycie zmian nowotworowych. Rozwój diagnostyki obrazowej to równocześnie ewolucja wymagań architektonicznych i instalacyjnych. RTG i CT podporządkowały projektowanie zasadom ochrony przed promieniowaniem jonizującym, ale niemałe znaczenie ma tutaj także kwestia asymilacji ogromnych zysków ciepła wytwarzanych w czasie pracy urządzeń czy konieczność wykorzystaniem ciekłego helu do chłodzenia nadprzewodzącego magnesu wykorzystywanego w rezonansie magnetycznym (*Magnetic Resonance Imaging* MRI). Medycyna nuklearna wymusiła kontrolę emisji radiofarmaceu-

tyków i ewentualnych skażeń powstających w wyniku ich działania. Wprowadzenie MRI wymusiło rygor elektromagnetyczny w tym strefowanie pola magnetycznego. Systemy hybrydowe, takie jak PET/CT, kumulują te wymagania, czyniąc przestrzeń diagnostyczną jedną z najbardziej złożonych środowisk technicznych w szpitalu. Syntezę podstawowych wymagań architektoniczno-instalacyjnych dla poszczególnych technologii przedstawia Tabela 1.

Analiza rozwoju diagnostyki obrazowej prowadzi do jednoznacznego wniosku: pomieszczenie medyczne nie jest tłem dla aparatury, lecz jej integralnym elementem technologicznym. Każda metoda obrazowania generuje własne wymagania środowiskowe, które bezpośrednio determinują rozwiązania instalacyjne. W tym kontekście systemy ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji (z ang. Heating, Ventilation, Air Conditioning, w skr. HVAC) stają się kluczowym narzędziem zapewniania bezpiecz-
stwo, stabilność pracy urządzeń oraz wysoką jakość dia-

Tabela 1. Synteza podstawowych wymagań architektonicznych i instalacyjnych. Źródło: opracowanie własne
Table 1. Synthesis of Fundamental Architectural and Building Services Requirements. Source: authors' own study

Technologia	Dominujące zjawisko fizyczne	Główne ryzyko	Kluczowe rozwiązania architektoniczno-instalacyjne
RTG / CT	Promieniowanie jonizujące (X)	Ekspozycja personelu i osób postronnych	Osłony ołowiane, beton barytowy, drzwi i szkło ołowiowe
Medycyna nuklearna (PET, terapia izotopowa)	Emisja z radiofarmaceutyków	Skażenie i promieniowanie wtórne	Śluzy, wentylacja kontrolowana, powierzchnie dekontaminowalne, zbiorniki retencyjne
MRI	Silne pole magnetyczne i fale RF	Zakłócenia elektromagnetyczne, efekt pocisku	Klatka Faradaya, kontrola stref bezpieczeństwa, organizacja dostępu
PET/CT	Połączenie emisji izotopowej i promieniowania X	Skumulowane ryzyka radiologiczne	Integracja osłon stałych z rygiem medycyny nuklearnej

Tabela 2. Wykaz rodzaju oraz liczby zarejestrowanych urządzeń (stan na rok 2024). Źródło: opracowanie własne na podstawie (Ministerstwo Zdrowia, 2026)

Table 2. List of the Type and Number of Registered Devices (as of 2024). Source: authors' own study based on (Ministerstwo Zdrowia, 2026)

Nazwa	Liczba sztuk	Opis
Technologie wykorzystujące promieniowanie rentgenowskie (X)		
RTG	7594	Podstawowa technika obrazowania wykorzystująca przenikliwość promieni X do wizualizacji struktury kostnej i klatki piersiowej
Tomograf Komputerowy	996	Urządzenie wykonujące serię zdjęć RTG pod różnymi kątami, co pozwala na cyfrową rekonstrukcję przekrojów 3D narządów wewnętrznych.
Mammograf	572	Specjalistyczny aparat rentgenowski o niskiej dawce promieniowania, zoptymalizowany pod kątem badania tkanek miękkich piersi
Agiograf	470	System do wizualizacji naczyń krwionośnych przy użyciu kontrastu, kluczowy w kardiologii inwazyjnej i radiologii zabiegowej
Medycyna nuklearna i radioterapia (Izotopy i akceleratorzy)		
Akcelerator linowy	164	Urządzenie generujące wiązki wysokoenergetycznego promieniowania do precyzyjnego niszczenia komórek nowotworowych (teleradioterapia)
Brachyterapia	59	Metoda leczenia polegająca na umieszczaniu źródła promieniotwórczego bezpośrednio wewnątrz guza lub w jego bliskim sąsiedztwie
PET/CT	40	Pozytonowa Tomografia Emisyjna; wykorzystuje radioaktywny znacznik do obrazowania procesów metabolicznych, głównie w celu wykrywania zmian nowotworowych
Gammakamera	152	Urządzenie rejestrujące promieniowanie gamma emitowane przez izotopy podane pacjentowi, służące do oceny funkcji narządów (scyntygrafia/SPECT)
Technologie niejonizujące (Pole magnetyczne i ultradźwięki)		
USG	16792	Diagnostyka wykorzystująca fale ultradźwiękowe odbijające się od tkanek; najpowszechniejsza metoda obrazowania w czasie rzeczywistym
Rezonans magnetyczny	640	Obrazowanie oparte na oddziaływaniu silnego pola magnetycznego na jądra wodoru; idealne do badania tkanek miękkich bez użycia promieniowania X

gnostyczną. Projektowanie pomieszczeń medycyny i diagnostyki obrazowej powinno koncentrować się na trzech filarach: bezpieczeństwie ludzi, kontroli emisji i zgodności środowiskowej systemów oraz niezawodności aparatury. Oznacza to precyzyjne kształtowanie kierunku przepływu powietrza i gradientów ciśnień w strefach ryzyka skażeń, skuteczną filtrację i kontrolowany wyrzut powietrza poza obrys budynku, a także utrzymanie stabilnych parametrów temperaturowo-wilgotnościowych warunkujących prawidłową pracę urządzeń i jakość diagnostyczną obrazu.

Współczesna diagnostyka wymaga zatem nie tylko poprawnych obliczeń instalacyjnych, lecz także głębokiego zrozumienia fizyki procesu medycznego. Wiedza ta powinna być wspólna dla projektantów, wykonawców oraz personelu eksploatującego obiekt. Tylko świadome, zintegrowane podejście gwarantuje bezpieczeństwo pacjenta, ochronę personelu i środowiska oraz pełne wykorzystanie potencjału zaawansowanych technologii obrazowania.

Projektowanie tych przestrzeni odbywa się w oparciu o wytyczne normowe – o ile istnieją, standardy branżowe oraz dokumenty projektowe opracowywane przez organizacje techniczne i instytucje ochrony zdrowia. Standardy te powinny obejmować zarówno układ funkcjonalny pra-

cowni, jak i wymagania dotyczące ochrony radiologicznej a także konkretne i klarowne wytyczne dla systemów HVAC (szczególnie w odniesieniu do bezpieczeństwa personelu i pacjenta, ale także do powietrza otaczającego) oraz dla zarządzania zyskami ciepła.

Stan techniczny i prawny w Polsce

Współczesne zaplecze aparaturowe polskiej medycyny nuklearnej i diagnostyki obrazowej to rozbudowany zbiór urządzeń diagnostycznych i terapeutycznych, działających w oparciu o różne zjawiska fizyczne – od promieniowania jonizującego, przez zjawiska elektromagnetyczne, po procesy związane z radioizotopami. Z danych rejestru Map Potrzeb Zdrowotnych (BASiW) (Ministerstwo Zdrowia, 2026) wynika, że obecnie w Polsce funkcjonuje ponad 28 tysięcy specjalistycznych urządzeń tego typu. Aktualny wykaz rodzajów oraz liczby zarejestrowanych urządzeń diagnostyki obrazowej i medycyny nuklearnej (stan na 2024 r.) przedstawiono w Tabeli 2.

Prognozy i analizy rozwoju bazy sprzętowej w Polsce do 2030 roku wskazują na wyraźną zmianę paradygmatu: od ilościowej rozbudowy w stronę jakościowej konsolidacji i hybrydyzacji (Ministerstwo Zdrowia, 2020). Najbardziej

Tabela 3. Wykaz aktów prawnych dotyczących diagnostyki obrazowej i medycyny nuklearnej. Źródło: opracowanie własne
Table 3. List of Legal Acts Concerning Diagnostic Imaging and Nuclear Medicine. Source: authors' own study

Nazwa aktu	Nr Dz.U.	Zakres
USTAWA z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe	Dz.U. 2001 nr 3 poz. 18 (tekst jednolity: Dz.U. 2024 poz. 1277)	Podstawowy akt ochrony radiologicznej i bezpieczeństwa jądowego; określa zasady legalnego stosowania promieniowania jonizującego w medycynie i obowiązki kierownika jednostki ochrony zdrowia (Sejm RP, 2024)
Rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie nadzoru i kontroli przestrzegania warunków ochrony radiologicznej	Dz.U. 2007 nr 1 poz. 11	Reguluje kontrolę spełniania przepisów ochrony radiologicznej przez placówki (Rada Ministrów, 2007)
Rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie minimalnych wymagań dla jednostek ochrony zdrowia prowadzących działalność związaną z diagnostyką obrazową, radiologią i medycyną nuklearną	Dz.U. 2021 poz. 1725	Określa minimalne wymagania lokalowe, organizacyjne i techniczne dla pracowni radiologicznych, CT, PET itp. (Ministerstwo Zdrowia, 2021)
Rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie nadawania uprawnień inspektora ochrony radiologicznej	Dz.U. 2021 poz. 1908	Regulacja nadzoru ochrony radiologicznej w jednostkach ochrony zdrowia (Rada Ministrów, 2021)
Rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie informacji zawartych w Krajowej Bazie Urządzeń Radiologicznych	Dz.U. 2021 poz. 1959	Obowiązek rejestracji urządzeń radiologicznych i informacji o ich eksploatacji (Rada Ministrów, 2021)
Rozporządzenie Rady Ministrów w sprawie terenów kontrolowanych i nadzorowanych	Dz.U. 2022 poz. 722	Wymagania dotyczące terenów, na których prowadzona jest działalność z promieniowaniem jonizującym (Ministerstwo Klimatu i Środowiska, 2022)
Rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie szkoleń w dziedzinie ochrony radiologicznej pacjenta	Dz.U. 2022 poz. 851	Określa formy i zakres szkoleń personelu w ochronie radiologicznej (Ministerstwo Klimatu i Środowiska, 2022)
Rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie diagnostycznych poziomów referencyjnych	Dz.U. 2022 poz. 2626	Normy referencyjne dla dawek i parametrów badań obrazowych (Ministerstwo Zdrowia, 2022)
Rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie testów eksploatacyjnych urządzeń radiologicznych i urządzeń pomocniczych	Dz.U. 2022 poz. 2759	Wymogi testów odbiorczych i walidacyjnych sprzętu radiologicznego (Ministerstwo Zdrowia, 2022)
Rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie warunków bezpiecznego stosowania promieniowania jonizującego dla wszystkich rodzajów ekspozycji medycznej	Dz.U. 2023 poz. 195	Szczegółowe warunki stosowania promieniowania w diagnostyce i terapii medycznej, ochrona pacjenta i personelu (Ministerstwo Zdrowia, 2023)
Rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie szczególnej ochrony niektórych kategorii osób w związku z ekspozycją medyczną	Dz.U. 2023 poz. 576	Dodatkowe zasady ochrony osób szczególnie wrażliwych (np. kobiety w ciąży) przy ekspozycji medycznej (Ministerstwo Zdrowia, 2023)
Rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie formy i szczegółowego zakresu wzorcowych medycznych procedur radiologicznych	Dz.U. 2024 poz. 267	Szczegółowe procedury radiologiczne dla standardowych ekspozycji medycznych (Ministerstwo Zdrowia, 2024)

dynamiczny trend rozwojowy obserwowany jest w obszarze PET/CT, co wynika z priorytetów Krajowej Sieci Onkologicznej (Ministerstwo Zdrowia, 2020), rosnącego zapotrzebowania na diagnostykę metaboliczną oraz konieczności niwelowania „białych plam” w dostępności tej technologii. Podobna dynamika dotyczy medycyny nuklearnej, gdzie systemy hybrydowe łączące pojedynczą fotonową tomografię emisyjną (Single Photon Emission Computed Tomography SPECT) z tomografią komputerową (SPECT/CT) stopniowo zastępują klasyczne gammakamery, poprawiając jakość obrazu i możliwości diagnostyczne. Równolegle rozwój sieci kardiologicznej zwiększa zapotrzebowanie na angiografię, co przekłada się na rosnące inwestycje w zaawansowane sale hybrydowe łączące rygor sali operacyjnej z wymaganiami ochrony radiologicznej (Ministerstwo Zdrowia, 2026).

Projektowanie pomieszczeń medycyny i diagnostyki obrazowej powinno zatem opierać się na trzech filarach: bezpieczeństwie ludzi, kontroli emisji i zgodności środowiskowej systemów oraz niezawodności aparatury. W praktyce oznacza to: (1) precyzyjne kształtowanie kierunku przepływu powietrza; (2) utrzymanie odpowiedniego gradientu ciśnień w strefach ryzyka skażeń; (3) konieczność zapewnienia skutecznej filtracji; (4) kontrolowany wyrzut powietrza poza obrys budynku; (5) utrzymanie stabilnych parametrów temperaturowo-wilgotnościowych warunkujących prawidłową pracę urządzeń i jakość diagnostyczną obrazu oraz bezpieczeństwo i komfort pacjenta i personelu.

W Polsce istnieją formalne wytyczne i przepisy dotyczące projektowania oraz eksploatacji pomieszczeń medycyny i diagnostyki obrazowej, szczególnie w kontekście ochrony radiologicznej i bezpieczeństwa ich użytkowników. Jak jednak zostanie wykazane, nie dają one konstruktywnych i jasnych wytycznych szczególnie w odniesieniu do systemów HVAC. W Tabeli 3 przedstawiono skondensowaną listę najważniejszych aktów prawnych i norm obo-

wiązujących w Polsce w kontekście projektowania i eksploatacji pomieszczeń medycyny nuklearnej i diagnostyki obrazowej (w szczególności z uwzględnieniem ochrony radiologicznej oraz wymagań organizacyjno-technicznych). Natomiast w Tabeli 4 zestawiono zakres regulacji, wymagania projektowe oraz eksploatacyjne w odniesieniu do systemów HVAC wynikające z obowiązujących w Polsce aktów prawnych.

Zestawienie w Tabeli 4 pokazuje, że regulacje prawne nie odnoszą się wyłącznie do samego promieniowania, lecz pośrednio definiują ogólne wymagania środowiskowe pomieszczeń. Dla projektanta HVAC oznacza to konieczność: kształtowania kontrolowanych kierunków przepływu powietrza, projektowania stref o zróżnicowanych ciśnieniach, stosowania wysokoskutecznej filtracji (w tym HEPA w określonych zastosowaniach), zapewnienia stabilnych parametrów mikroklimatu i ciągłości chłodzenia aparatury, integracji systemów wentylacyjnych z funkcjonalnym podziałem stref kontrolowanych. Dla użytkownika i personelu technicznego oznacza to z kolei obowiązek ciągłego monitorowania parametrów pracy instalacji, ponieważ zgodność prawna i bezpieczeństwo radiologiczne są wprost powiązane z prawidłowym działaniem systemów HVAC.

Nie ma jednak w Polsce norm czy aktów prawnych, które wprost i kompleksowo regulowałyby konkretne wytyczne i wymagania dla systemów HVAC obsługujących pracownie diagnostyki obrazowej i medycyny nuklearnej. W obowiązujących w Polsce aktach prawnych dotyczących diagnostyki obrazowej – takich jak Ustawa – Prawo atomowe (Sejm RP, 2024) oraz rozporządzenia Ministra Zdrowia w sprawie warunków bezpiecznego stosowania promieniowania jonizującego i minimalnych wymagań dla jednostek ochrony zdrowia (Ministerstwo Zdrowia, 2023) – nie znajdziemy bezpośrednio konkretnych wytycznych i parametrów wymaganych dla systemów HVAC. Regulacje te definiują obowiązek zapewnienia bezpieczeństwa ra-

Tabela 4. Zakres regulacji, wymagania projektowe oraz eksploatacyjne w odniesieniu do systemów HVAC wynikające z obowiązujących aktów prawnych. Źródło: opracowanie własne

Table 4. Scope of Regulations, Design Requirements, and Operational Requirements for HVAC Systems Arising from Applicable Legal Acts. Source: authors' own study

Akt prawny / regulacja	Zakres regulacji	Konsekwencje dla projektowania HVAC	Konsekwencje dla eksploatacji
Dz.U. 2021 poz. 1725 (Ministerstwo Zdrowia, 2021)	Wymogi lokalowe i techniczne dla pracowni RTG, CT, PET, medycyny nuklearnej	Dobór systemów nawiewno-wywiewnych adekwatnych do funkcji pomieszczenia (podciśnienie, separacja stref)	Utrzymanie parametrów zgodnych z przeznaczeniem pomieszczenia
Dz.U. 2022 poz. 722 (Ministerstwo Klimatu i Środowiska, 2022)	Definicja i organizacja stref zagrożenia radiologicznego	Projektowanie stref wentylacyjnych z kontrolą przepływów między obszarami	Monitoring różnic ciśnień i szczelności stref
Dz.U. 2022 poz. 2759 (Ministerstwo Zdrowia, 2022)	Zapewnienie jakości diagnostycznej aparatury	Zaprojektowanie stabilnych warunków temperaturowo-wilgotnościowych i systemów chłodzenia	Utrzymanie stałości parametrów środowiskowych wpływających na jakość obrazu
Dz.U. 2023 poz. 195 (Ministerstwo Zdrowia, 2023)	Ochrona pacjenta i personelu	Projektowanie kontrolowanych kierunków przepływu powietrza, utrzymanie wymaganych gradientów ciśnień	Okresowa weryfikacja skuteczności wentylacji i filtracji
Dz.U. 2024 poz. 267 (Ministerstwo Zdrowia, 2024)	Standardy wykonywania badań	Uwzględnienie w projekcie wymagań aseptycznych w procedurach zabiegowych (np. przepływ laminarny)	Kontrola czystości powietrza i skuteczności filtrów
Dz.U. 2024 poz. 1277 (Sejm RP, 2024)	System ochrony radiologicznej, odpowiedzialność kierownika jednostki	Konieczność projektowania systemów ograniczających rozprzestrzenianie skażeń i emisji promieniotwórczych	Stały nadzór nad parametrami wentylacji w strefach kontrolowanych

diologicznego, kontroli skażeń, organizacji stref kontrolowanych i nadzorowanych oraz odpowiedzialności kierownika jednostki, jednak nie określają konkretnych parametrów technicznych, takich jak krotność wymian powietrza, klasy skuteczności filtracji czy wymaganych poziomów nad lub podciśnienia. W praktyce oznacza to konieczność przełożenia wymagań funkcjonalnych i organizacyjnych na rozwiązania projektowe w oparciu o normy techniczne i standardy środowiskowe. W procesie projektowania stosuje się m.in. PN-EN 16798 (Polski Komitet Normalizacyjny, 2019), określającą parametry środowiska wewnętrznego (temperaturę, wilgotność, jakość powietrza), oraz PN-EN ISO 14644 (Polski Komitet Normalizacyjny, 2016)

w odniesieniu do pomieszczeń o określonym rygorze czystości, gdzie wymagane jest kontrolowanie klasy czystości powietrza. Kluczowe znaczenie mają również wytyczne producentów urządzeń (MRI, CT, PET), które często jako jedyne precyzyjnie definiują dopuszczalne zakresy temperatury, wilgotności względnej powietrza otaczającego oraz wymagania chłodnicze i rezerwy mocy. Uzupełnieniem mogą być wytyczne branżowe i dobre praktyki – w tym zalecenia Głównego Inspektoratu Sanitarnego (GIS) i Państwowej Agencji Atomistyki (PAA) dotyczące medycyny nuklearnej, rekomendacje towarzystw naukowych o ile istnieją oraz dokumentacja technologiczna aparatury, często najbardziej restrykcyjna. Najbliżej bezpo-

Tabela 5. Wymagania techniczne dla systemów HVAC dla pomieszczeń diagnostyki obrazowej przyjmowanych jako pomieszczenia standardu medycznego. Źródło: opracowanie własne na podstawie (Charkowska, Różycki, Sobierajska i Lenarski, 2018; DIN, 2018; ASHRAE, 2021; SWKI VA105-01, 2015; AFNOR, 2013)

Table 5. Technical requirements for HVAC systems in imaging diagnostic rooms classified as medical-standard facilities. Source: authors' own study based on (Charkowska, Różycki, Sobierajska i Lenarski, 2018; DIN, 2018; ASHRAE, 2021; SWKI VA105-01, 2015; AFNOR, 2013)

Nazwa pomieszczenia	Wytyczne PL (2018)	DIN 1946-4 (2018)	ASHRAE 170 (2021)	SWKI VA105-01 (2015)	NF S90-351 (2013)
Radiologia (RTG, Mam-mografia)	T: 19–23°C, RH: 30–65%, ACH: min. 4 (zewn.) P: neutralne	T: 22–26°C, RH: 30–65%, ACH: min. 40 m3/h/os, P: neutralne.	T: 22–26°C, RH: max. 60%, ACH: min. 6 (całk.), P: neutralne	T: 22–28°C, RH: 30–50%, ACH: wg zysków ciepła, P: neutralne	T: 19–26°C, RH: nd ACH: min. 10 (całk.), P: 15 ± 5 Pa.
Tomografia komputerowa (CT)	T: 19–23°C, RH: nd ACH: min. 4 (zewn.) Wymagane odprowadzenie wysokich zysków ciepła.	T: 22–26°C, RH: nd ACH: min. 40 m3/h/os Klasa II	T: 22–26°C, RH: max. 60%, ACH: min. 6 Kluczowe chłodzenie aparatury.	T: 22–28°C, RH: nd ACH: indyw. wg technologii (wysokie obciążenie ciepłe).	T: 19–26°C, RH: nd ACH: min. 10. Risk 2
Rezonans magnetyczny (MRI)	T: 19–23°C. RH: nd Wymagana rura wyrzutowa helu i awaryjne chłodzenie	T: 22–26°C. RH: nd Wymagane spełnienie zaleceń producenta magnesu	T: 22–26°C, RH: max. 60%, ACH: min. 6. Chłodzenie magnesu jest priorytetem	T: 20–28°C. RH: nd Konieczna ścisła kontrola temperatury dla pracy magnesu	T: 19–26°C. RH: nd Wymagania komfortu i ochrony Risk 2
Sonografia (USG)	T: 19–23°C, RH: nd ACH: min. 4 (zewn.). Standard gabinetu	T: 22–26°C. RH: nd ACH: nd Standardowa wentylacja komfortu Klasa II	T: 22–26°C, RH: nd ACH: min. 6 (całk.). Class 1	T: 20–26°C, RH: nd ACH: 1–2 (zewn.). LK 2d.	T: 19–26°C, RH: nd ACH: min. 10. Risk 2
Diagnostyka fizjologiczna (EKG, EEG)	T: 19–23°C, RH: nd ACH: min. 4 (zewn.). Priorytet: brak przeciągów	T: 22–26°C, RH: nd ACH: min. 40 m3/h/os Klasa II	T: 22–26°C, RH: nd ACH: min. 6. Class 1	T: 22–26°C, RH: nd ACH: 2–3. LK 2d	T: 19–26°C, RH: nd ACH: min. 10. Risk 2
Medycyna nuklearna (nieinwazyjna)	T: 19–23°C RH: nd ACH: nd Zalecane lekkie podciśnienie ze względów bezpieczeństwa.	T: 22–26°C RH: nd ACH: nd Wymagania ochrony radiologicznej (filtry).	T: 21–24°C RH: nd ACH: min. 6 Wymagane podciśnienie i wyrzut 100%.	T: 20–28°C. RH: nd ACH: nd Wymagane podciśnienie (--) i filtracja wylotowa	T: 19–26°C RH: nd ACH: nd Radiofarmacja wymaga Risk 2 i kaskady ciśnień.
Gabinety lekarskie / Konsultacyjne	T: min. 20°C RH: nd ACH: min. 2 (zewn.). Wentylacja komfortu.	T: 22–26°C RH: nd ACH: nd Dopuszczalna wentylacja okienna.	T: 21–24°C RH: nd ACH: min. 4 (całk.). Najniższy rygor Class 1.	T: 20–26°C RH: nd ACH: nd Często wystarcza wentylacja grawitacyjna/okienna	T: 19–26°C RH: nd ACH: nd Risk 1 (nie objęty normą) lub Risk 2.
Endoskopia (nieinwazyjna)	T: 19–23°C RH: nd ACH: min. 5 (zewn.). Wymagana filtracja E11	T: 22–26°C RH: nd ACH: nd Wymagany wywiew dla usuwania zapachów i oparów.	T: 20–23°C RH: 20–60%, ACH: min. 6 Wymagane podciśnienie	T: 20–26°C RH: nd ACH: min. 6. Często LK 2b przy ryzyku aerozoli.	T: 19–26°C RH: nd ACH: nd Risk 1 lub 2 zależnie od inwazyjności

średnich oczekiwań wobec HVAC znajduje się medycyna nuklearna. To tutaj pojawiają się konkretne wymagania funkcjonalne, takie jak konieczność utrzymania podciśnienia w gorących laboratoriach „hot lab”, separacja stref czystych i skażonych, kontrola kierunku przepływu powietrza czy filtracja powietrza wywiewanego. Nadal jednak są to wymagania opisowe i funkcjonalne – rozporządzenia nie wskazują wprost konkretnych wartości technicznych. System regulacyjny w Polsce działa więc w sposób pośredni: prawo definiuje bezpieczeństwo i odpowiedzialność, normy określają parametry techniczne, producent aparatury wskazuje warunki środowiskowe, a projektant HVAC integruje te wymagania w spójne rozwiązanie instalacyjne. Projektowanie systemów wentylacyjnych w diagnostyce obrazowej wymaga zatem jednoczesnej znajomości przepisów radiologicznych, norm środowiskowych, specyfiki technologii medycznej oraz ścisłej współpracy z fizykiem medycznym i z zespołami technologicznym i bezpieczeństwa. Z uwagi na brak krajowych norm i aktów praw-

nych precyzujących wymagania w praktyce projektowej uzupełnieniem przepisów są Wytyczne PL (Charkowska, Różycki, Sobierajska i Lenarski, 2018), które uzyskały rekomendację Ministerstwa Zdrowia do stosowania jako materiał pomocniczy przy projektowaniu i modernizacji infrastruktury podmiotów leczniczych.

Wymagania dla branży HVAC

Z uwagi na brak jasnych i precyzyjnych wytycznych dotyczących wymagań dla pomieszczeń diagnostyki obrazowej i medycyny nuklearnej w kontekście obsługujących ich instalacji HVAC, w dalszej części artykułu przeanalizowane zostaną wytyczne zawarte w normach: niemieckiej DIN 1946-4 (Deutsches Institut für Normung, 2018), amerykańskiej ASHRAE 170 (ASHRAE, 2021), szwajcarskiej SWKI VA105-01 (SWKI VA105-01, 2015) oraz francuskiej NF S90-351 (Association Française de Normalisation, 2013) oraz w Wytycznych PL (Charkowska, Różycki, Sobierajska

Tabela 6. Porównanie wymagań dla instalacji HVAC dla pomieszczeń medycyny nuklearnej. Źródło: opracowanie własne na podstawie (Charkowska, Różycki, Sobierajska i Lenarski, 2018; DIN, 2018; ASHRAE, 2021; SWKI VA105-01, 2015; AFNOR, 2013)
Table 6. Comparison of HVAC Requirements for Nuclear Medicine Rooms. Source: authors' own study based on (Charkowska, Różycki, Sobierajska i Lenarski, 2018; DIN, 2018; ASHRAE, 2021; SWKI VA105-01, 2015; AFNOR, 2013)

Nazwa pomieszczenia	Wytyczne PL (2018)	ASHRAE 170 (2021)	DIN 1946-4 (2018)	SWKI VA105-01 (2015)	NF S90-351 (2013)
Diagnostyka (PET, SPECT, Gamma Kamera)	T: 19–23°C RH: nd ACH: min. 4 (zewn.), P: neutralne (zalecane lekkie podciśnienie) Klasa S4	T: 22–26°C, RH: nd ACH: min. 6 (całk.), P: neutralne (NR). Dopuszczalna recyrkulacja Class 1 Imaging	T: 22–26°C RH: nd ACH: min. 40 m ³ /h/os, P: neutralne. Możliwe filtry pyłowe Klasa II	T: 22–26°C RH: 30–50% ACH: nd P: +/- (neutralne). Filtracja nawiewu min. F9. LK 2d	T: 19–26°C RH: nd ACH: min. 10 (całk.), P: 15 ± 5 Pa ISO 8. Risk 2
Laboratorium gorące (Hot Lab) / Radiofarmacja	T: 19–23°C, RH: nd ACH: nd P: ujemne. Wywiew przez węgiel aktywny i wyrzut 100%. Klasa S4/S2	T: 21–24°C RH: nd ACH: min. 6, P: ujemne, Recyrkulacja: NIE (wyrzut 100%) Nuclear Medicine Hot Lab	T: nd RH: nd ACH: nd P: ujemne. Oddzielny system wyciągowy, filtracja wyciągu przy przekroczeniu limitów. Klasa II	T: 20–28°C RH: nd ACH: min. 5 (wyciąg), P: ujemne (– –). Recyrkulacja: NIE. LK 2c	T: 19–26°C RH: nd ACH: min. 10, P: ujemne (ochrona otoczenia). Risk 2 (Radio pharmacie)
Sale terapii izotopowej (pobyt pacjentów)	T: 19–23°C RH: nd ACH: min. 10, P: ujemne (min. –10 Pa) względem służby Klasa S2	T: nd RH: nd ACH: min. 6, P: ujemne, Recyrkulacja: NIE (wyrzut 100%) Nuclear Medicine Treatment	T: nd RH: nd ACH: nd P: ujemne. Filtracja wyciągu HEPA (H13) zależnie od aktywności Klasa II	T: 22–26°C RH: nd ACH: min. 10, P: ujemne (– –). Ścisła kontrola kaskady ciśnień LK 2c	T: 19–26°C RH: nd ACH: min. 10, P: ujemne (kaskada ciśnień względem służby) Risk 2
Skarbiec (Strong Room) / Magazyn odpadów	T: nd RH: nd ACH: nd P: ujemne. Osobny wyciąg pochodniowy, filtracja węglowa. Klasa S4	T: nd RH: nd ACH: min. 10, P: ujemne, Recyrkulacja: NIE (wyrzut 100%). Regulated waste holding	T: nd RH: nd ACH: nd Wyciąg przez oddzielny system kanałów; monitoring aktywności Isotope departments	T: 18°C, RH: nd ACH: nd P: ujemne (– –). Oddzielna wentylacja i filtry węglowe LK 2c	T: nd RH: nd ACH: nd Wymagania jak dla radiofarmacji w zakresie szczelności. Risk 2
Pomieszczenia dekontaminacji	T: nd RH: nd ACH: nd P: ujemne Wymagane tace ociekowe i monitoring ścieków. Klasa S4/S2	T: 21–24°C, RH: nd ACH: min. 6, P: ujemne Recyrkulacja: NIE. Decontamination room	T: 21–24°C, RH: nd ACH: min. 6, P: ujemne Systemy „Safe Change” dla filtrów wyciągowych. Klasa II	T: 24°C, RH: nd ACH: nd P: ujemne Filtracja wyciągu w standardzie medycznym LK 2c	T: nd RH: nd ACH: nd Szczelność i łatwość zmywania powierzchni (stal nierdzewna). Risk 2

i Lenarski, 2018).

W Tabeli 5 przedstawiono wymagania techniczne dla systemów HVAC dla pomieszczeń diagnostyki obrazowej przyjmowanych jako pomieszczenia standardu medycznego, opracowane na podstawie wskazań ww. instytucji.

Szczegółowa analiza norm wykazuje ponadto, że recyrkulacja powietrza jest dopuszczalna we wszystkich tych pomieszczeniach (z wykluczeniem wybranych pomieszczeń medycyny nuklearnej), pod warunkiem stosowania filtracji klasy F9 (lub MERV 14) dla powietrza recyrkulowanego i zapewnienia minimalnego strumienia powietrza zewnętrznego. Standardem filtracji dla powietrza zewnętrznego, dla tej grupy pomieszczeń, jest filtracja dwustopniowa F7 + F9 (lub MERV 8 + 14). Klasyfikację filtrów podawanych w omawianych normach i wytycznych względem obowiązującej normy PN-EN ISO 16890 (Polski Komitet Normalizacyjny, 2017) można znaleźć w bazie wiedzy dotyczącej obiektów służby zdrowia projektu Tech-Medis (Szczęśniak, 2026). W pomieszczeniach CT i MRI strumień powietrza wentylującego oraz krotność wymian powietrza w pomieszczeniu (ACH) musi być każdorazowo przeliczony, na podstawie bilansu cieplnego jawnego emitowanego z działającej aparatury oraz pozostałych wewnętrznych i zewnętrznych źródeł ciepła, co często skutkuje wartościami znacznie wyższymi niż minima higieniczne. Duże wartości strumienia powietrza wymaganych do usunięcia nadmiaru ciepła pociągają za sobą rozważanie możliwości zastosowania recyrkulacji poprzez montaż indywidualnych jednostek pomieszczeniach (wentylokonwektory, moduły recyrkulacyjne). Kluczową cechą grupy pomieszczeń z Tabeli 5 jest reżim podciśnieniowy oraz specyficzne wymagania dotyczące wyrzutu powietrza i filtracji węglowej, mające na celu ochronę przed skażeniem promieniotwórczym.

W Tabeli 6 przedstawiono wymagania techniczne dla systemów HVAC dla pomieszczeń medycyny nuklearnej, opracowane na podstawie analizowanych norm i wytycznych.

Kluczową cechą tej grupy jest reżim podciśnieniowy oraz specyficzne wymagania dotyczące wyrzutu powietrza i filtracji węglowej, mające na celu ochronę przed skażeniem promieniotwórczym.

Porównanie wytycznych dla pomieszczeń medycyny nuklearnej potwierdza ich spójność w kluczowych obszarach. Dla laboratoriów gorących (Hot-Lab), skarbów i magazynów odpadów wymagane jest całkowite usuwanie powietrza bezpośrednio na zewnątrz budynku i bezwzględny zakaz stosowania recyrkulacji. W strefach o wysokiej aktywności (Hot Lab, terapia) wymagane są filtry HEPA H13 oraz filtry węglowe, montowane w obudowach typu Safe Change. Kaskada ciśnień musi zapewniać spadek ciśnienia w kierunku stref najbardziej „aktywnych” (np. +10 Pa → 0 Pa → -10 Pa), a systemy wentylacji i monitoringu podlegają zasilaniu awaryjnemu (UPS/agregat) z krótkim czasem przełączenia.

W kontekście pomieszczeń zawartych w Tabeli 6. ze względu na wysokie zyski ciepła, podobnie jak dla wybranych pomieszczeń diagnostyki obrazowej, kluczowe jest rozstrzygnięcie kwestii recyrkulacji. Warto zwrócić uwagę, że analizowane normy i wytyczne jednoznacznie różnicują wymagania w tym zakresie w zależności od funkcji pomieszczenia. W Hot Labach i strefach przygotowania radiofarmaceutyków recyrkulacja jest niedopuszczalna (ASHRAE 170 – wywiew całego powietrza na zewnątrz budynku; Wytyczne PL – oddzielny przewód do wyrzutu dachowej; SWKI VA105-01 – brak recyrkulacji, podciśnienie i filtracja wywiewu). W salach terapii izotopowej obowiązuje konieczność całkowitego usuwania powietrza na zewnątrz obiektu; NF S90-351 dopuszcza recyrkulację jedynie w niższych klasach ryzyka, przy czym w zagrożeniach radiologicznych zaleca filtrację HEPA i bezpośredni wywiew powietrza na zewnątrz obiektu. W diagnostyce nieinwazyjnej (PET, SPECT, gammakamera) zgodnie z wytycznymi ASHRAE 170 w pomieszczeniach klasy Class 1 Imaging dopuszcza się recyrkulację, szczególnie przy stosowaniu gotowych, niskoaktywnych dawek, co umożliwia

Tabela 7. Dopuszczalny poziom hałasu (ciśnienia akustycznego) [dB(A)] dla wybranych pomieszczeń. Źródło: opracowanie własne na podstawie (Charkowska, Różycki, Sobierajska i Lenarski, 2018; DIN, 2018; ASHRAE, 2021; SWKI VA105-01, 2015; AFNOR, 2013; PKN, 2018)

Table 7. Permissible Noise Level (Sound Pressure Level) [dB(A)] for Selected Rooms. Source: authors' own study based on (Charkowska, Różycki, Sobierajska i Lenarski, 2018; DIN, 2018; ASHRAE, 2021; SWKI VA105-01, 2015; AFNOR, 2013; PKN, 2018)

Nazwa pomieszczenia	Wytyczne PL	SWKI VA105-01	NF S90-351	DIN 1946-4/ASHRAE 170
Radiologia (RTG, Mammografia)	35	40/35	≤ 45	40–45
Tomografia komputerowa (CT)	35	50	≤ 45	wg specyficznych wymagań użytkownika
Rezonans magnetyczny (MRI)	35	50	≤ 45	wg specyficznych wymagań użytkownika
Sonografia (USG)	35	40/35	≤ 45	40–45
Diagnostyka fizjologiczna (EKG, EEG)	35	40/35	≤ 45	40–45
Medycyna nuklearna (skanery)	35	40/35	≤ 45	40–45
Laboratorium gorące (Hot Lab)	35	45	≤ 45	40–45
Gabinety lekarskie/Konsultacyjne	35	40	≤ 45	40
Endoskopia (diagnostyczna)	35	40/35	≤ 45	40–45
Salę terapii izotopowej (pobyt)	30	35/30	≤ 40	35–40

pokrycie zysków ciepła od aparatury oraz ograniczenie energii niezbędnej do utrzymania systemu w ruchu.

Wspólne stanowisko norm (ASHRAE, DIN, Wytyczne PL) wyklucza powietrze wtórne w Hot Labach, magazynach odpadów i skarbach izotopowych – system HVAC może pracować tam tylko na powietrzu zewnętrznym z wywiewem powietrza, często poprzedzonym filtracją węglową, realizowanym poprzez wyrzutnię dachową.

Kluczowym aspektem projektowania, a potem odbioru i eksploatacji są także wymagania akustyczne określone dla instalacji. W Tabeli 7 zestawiono wymagania akustyczne dla wybranych pomieszczeń diagnostyki obrazowej i medycyny nuklearnej dla analizowanych norm i wytycznych, przy czym dla określenia wartości dopuszczalnych dla hałasu ustalonego przeanalizowano normę (Polski Komitet Normalizacyjny, 2018), która choć nie jest przywoływana w Rozporządzeniu o Warunkach Technicznych (Minister Rozwoju i Technologii, 2022), zgodnie z zapisem w Polskim Komitecie Normalizacyjnym zaktualizowała normę (Polski Komitet Normalizacyjny, 2015).

Analiza powyższych danych wskazuje na wyjątkowy reżim wymagań akustycznych obowiązujących w Polsce a określonych dla pomieszczeń służby zdrowia, który jest nieporównywalnie wyższy od wymagań obowiązujących w Niemczech, Stanach Zjednoczonych, Szwajcarii czy Francji. Ograniczenie ciśnienia akustycznego w przypadku instalacji i systemów HVAC o 5dB(A) a tym bardziej o 10 dB(A) wymaga ogromnych nakładów finansowych, ograniczania do minimum prędkości transportu powietrza w kanałach, co grozi uzyskiwaniem dużych gabarytów i przepływem laminarnym. Warto podkreślić, że wielokrotnie nie jest to możliwe do uzyskania w warunkach normalnej pracy, a przecież poziom ciśnienia akustycznego, wynikający z działania sprzętu medycznego, nawet w czasie podtrzymania bardzo często jest od 30 dB(A).

Bezpieczeństwo w medycynie nuklearnej i diagnostyce obrazowej

Bezpieczeństwo instalacyjne w pomieszczeniach diagnostyki obrazowej (w szczególności MRI) oraz medycyny nuklearnej koncentruje się na kontroli zjawisk awaryjnych, niezawodności wentylacji i zasilaniu rezerwowym.

W pracowni MRI może wystąpić zjawisko nazywane: quench, czyli nagła utrata nadprzewodnictwa magnesu głównego, skutkująca gwałtownym wyrzutem helu. Magnez wykorzystuje cewki nadprzewodzące chłodzone ciekłym helem do ok. 4 K (–269°C), co umożliwia przepływ bardzo dużych prądów bez strat rezystancyjnych. W przypadku quenchu dochodzi do intensywnego odparowania helu co wiąże się z koniecznością jego bezpiecznego odprowadzenia na zewnątrz. Analizowane normy i wytyczne wymagają instalacji dedykowanej rury wyrzutowej (quenching pipe) wyprowadzonej bezpośrednio na zewnątrz budynku (wg wytycznych PL i DIN 1946-4) oraz jej odwodnienia. Wymagany jest także system awaryjnego chłodzenia. Nieszczelność instalacji może prowadzić do spadku stężenia tlenu, powstania mgły kriogenicznej i wzrostu ciśnienia w pomieszczeniu, dlatego system wyrzutu helu podlega rygorystycznym wymaganiom projektowym i odbiorowym.

W pozostałych pomieszczeniach diagnostyki obrazowej (CT, PET/CT, SPECT, angiografia) zasadniczym zagadnieniem jest zapewnienie stabilnych warunków temperaturowo-wilgotnościowych, skuteczne odprowadzenie wysokich zysków ciepła od aparatury oraz niezawodność zasilania i chłodzenia. Wymaga się utrzymania ciągłości pracy systemów HVAC oraz ich powiązania z zasilaniem rezerwowym, adekwatnie do klasy pomieszczenia.

W diagnostyce inwazyjnej i medycynie nuklearnej kluczowa jest wysoka niezawodność wentylacji. Stosuje się

Tabela 8. Zestawienie wymagań dot. systemów awaryjnych i wyrzutu helu. Źródło: opracowanie własne na podstawie on (Charkowska, Różycki, Sobierajska i Lenarski, 2018; DIN, 2018; ASHRAE, 2021; SWKI VA105-01, 2015; AFNOR, 2013)

Table 8. Summary of Requirements for Emergency Systems and Helium Venting. Source: authors' own study based on (Charkowska, Różycki, Sobierajska i Lenarski, 2018; DIN, 2018; ASHRAE, 2021; SWKI VA105-01, 2015; AFNOR, 2013)

Norma / Wytyczne	Wyrzut helu (MRI Quenching)	Wentylacja awaryjna i redundancja	Bezpieczeństwo w medycynie nuklearnej
Wytyczne PL (2018)	Wymagana rura wyrzutowa helu wyprowadzona na zewnątrz. Konieczny awaryjny system chłodzenia (np. wodą wodociągową).	Dla sal inwazyjnych (S1) zalecane urządzenia redundantne (podwójne wentylatory) z automatycznym przełączaniem.	Zakaz recyrkulacji (wyrzut 100%) dla obszarów skażonych. Zalecana filtracja węglowa i systemy Safe Change.
ASHRAE 170 (2021)	Standard określa wymogi dla chłodzenia magnesu (Class 1), lecz szczegóły rury wyrzutowej zależą od technologii.	Automatyka musi sygnalizować stany alarmowe bezpośrednio personelowi medycznemu.	Bezwzględny wyrzut 100% powietrza bezpośrednio na zewnątrz (All Air Exhausted Directly to Outdoors) dla Hot Lab.
DIN 1946-4 / DIN 13080 (2018)	Wymagana rura wyrzutowa helu (quenching pipe) z koniecznym odwodnieniem, aby zapobiec skroplinom.	Obowiązkowa symulacja stanów awaryjnych podczas odbiorów technicznych (szczególnie dla Klasy I).	Monitoring aktywności promieniotwórczej w kanałach wywiewnych. Systemy filtracji wyciągowej dla izotopów.
SWKI VA105-01 (2015)	Kontrola temperatury i zysków ciepła kluczowa dla stabilności magnesu MRI.	Wymagane zasilanie awaryjne (Notstromversorgung) zgodne z normą SN 411 000 (określone czasy przełączenia).	Koncepcja 2c (podciśnienie). Wymagane filtry z węglem aktywnym na wyrzucie dla Hot Lab i składowisk odpadów.
NF S90-351 (2013)	Klasyfikacja Risk 2 nakłada wymogi stabilności parametrów dla MRI.	Kluczowy parametr bezpieczeństwa to kinetyka usuwania cząstek (CP) – zdolność do regeneracji po awarii/zanieczyszczeniu.	Zapewnienie kaskady ciśnień (gradient ujemny) w celu ochrony otoczenia przed radionuklidami gazowymi.

tutaj rozwiązania redundantne (np. podwójne wentylatory) z automatyką uruchamiającą rezerwę w przypadku awarii. Systemy HVAC oraz automatyka muszą być połączone do zasilania awaryjnego (UPS/agregat), a czas przełączenia zgodny z wymaganiami dla danej klasy. Niedopuszczalne jest odwrócenie kierunku przepływu powietrza, a w medycynie nuklearnej konieczne jest trwałe utrzymanie podciśnienia.

W obszarach nuklearnych obowiązuje 100% wyrzut powietrza z Hot Labów i skarbów izotopowych, bez recyrkulacji, często z filtracją węglową. Systemy wentylacyjne integruje się z monitoringiem aktywności promieniotwórczej, generującym alarm w przypadku skażenia.

Zestawienie wymagań dotyczących wyrzutu helu, wentylacji awaryjnej i systemów bezpieczeństwa w pomieszczeniach diagnostyki obrazowej i medycyny nuklearnej przedstawiono w Tabeli 8.

W zakresie quenchingu MRI wszystkie dokumenty jednoznacznie wymagają fizycznego wyprowadzenia helu na zewnątrz budynku, przy czym DIN 13080 dodatkowo akcentuje aspekt techniczny odwodnienia rury wyrzutowej. W odniesieniu do redundancji systemów oraz pracy w stacjach awaryjnych polskie wytyczne i DIN 1946-4 kładą szczególny nacisk na to, aby awaria wentylatora nawiewnego lub wywiewnego nie powodowała niekontrolowanej zmiany kierunku przepływu powietrza, co ma kluczowe znaczenie na salach operacyjnych i w laboratoriach izotopowych.

Warto tutaj także podkreślić, że podczas odbiorów technicznych, szczególnie dla klasy S1/Ia, wymagane jest przeprowadzenie symulacji stanów awaryjnych (np. zanik zasilania, awaria wentylatora) w celu weryfikacji bezpiecznego działania systemu. Wszystkie stany awaryjne muszą być sygnalizowane alarmem optycznym i akustycznym bezpośrednio w sali diagnostycznej lub zabiegowej, tak aby personel mógł niezwłocznie podjąć działania.

Podsumowanie

Pracownie diagnostyki obrazowej i medycyny nuklearnej to współczesne, bogato wyposażone pomieszczenia medyczne wykorzystywane do realizacji precyzyjnych procedur diagnostycznych i terapeutycznych, których bezpieczeństwo oraz skuteczność są nierozdzielnie związane z utrzymaniem rygorystycznych parametrów środowiskowych przez zaawansowane systemy wentylacji i klimatyzacji. W Polsce występuje luka regulacyjna: przepisy, w tym Prawo atomowe, określają ogólne zasady bezpieczeństwa radiologicznego, lecz nie definiują szczegółowych parametrów HVAC, takich jak krotność wymian powietrza czy klasy filtracji. Projektanci muszą więc opierać się na normach międzynarodowych oraz wytycznych w tym producentów urządzeń. Skuteczne projektowanie tych przestrzeni wymaga zatem zintegrowanego podejścia, łączącego wiedzę inżynierską z głębokim zrozumieniem fizyki procesów medycznych.

Instalacje HVAC pełnią funkcję systemu bezpieczeństwa, kontrolując kierunki przepływu powietrza i gradienty ciśnień w strefach ryzyka. Wymagania technologiczne różnią się w zależności od funkcji pomieszczenia: MRI wymaga rury quench i stabilnych warunków termicznych; CT i MRI generują wysokie zyski ciepła, co wymusza duże strumienie powietrza; w medycynie nuklearnej obowiązuje natomiast konieczność usuwania w całości

powietrza wywiewanego z pomieszczeń oraz dodatkowa filtracja węglowa i HEPA oraz stałe podciśnienie. Kolejnym wyzwaniem są restrykcyjne wymagania akustyczne oraz konieczność zapewnienia redundancji i zasilania awaryjnego. Rygorystyczne wymagania dotyczące zapewnienia bezpieczeństwa w połączeniu z brakiem prawnie uwarunkowanych konkretnych wskazań i wytycznych może prowadzić do niezamierzonych błędów projektowych, wykonawczych i eksploatacyjnych, których skutki mogą wpłynąć na zdrowie pacjenta, lekarza, terapeuty lub diagnosty oraz na prawidłową pracę urządzeń.

Bibliografia

- ASHRAE. (2021). ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2021: Ventilation of Health Care Facilities. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*.
- AFNOR. (2013). NF S90-351:2013-04: Health care establishments – Controlled environment areas – Requirements for airborne contamination control. *Association Française de Normalisation*.
- Charkowska, A., Różycki, A., Sobierajska, A. i Lenarski, R. (2018). Wytyczne projektowania, wykonania, odbioru i eksploatacji systemów wentylacji i klimatyzacji dla podmiotów wykonujących działalność leczniczą. *Pracodawcy Rzeczypospolitej Polskiej*.
- DIN. (2018). DIN 1946-4:2018-09: Ventilation and air conditioning - Part 4: Ventilation in buildings and rooms of health care. *Deutsches Institut für Normung*.
- Minister Rozwoju i Technologii. (2022). Obwieszczenie z dnia 15 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. 2022 poz. 1225).
- Ministerstwo Klimatu i Środowiska. (2022). Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 17 marca 2022 r. w sprawie stanowisk istotnych dla zapewnienia bezpieczeństwa jądowego i ochrony radiologicznej. (Dz.U. 2022 poz. 722).
- Ministerstwo Klimatu i Środowiska. (2022). Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 30 marca 2022 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących przechowywania źródeł promieniotwórczych oraz ich ewidencji (Dz.U. 2022 poz. 851).
- Ministerstwo Zdrowia. (2020). Narodowa Strategia Onkologiczna na lata 2020–2030 (Załącznik do uchwały nr 10 Rady Ministrów z dnia 4 lutego 2020 r., M.P. 2020 poz. 188).
- Ministerstwo Zdrowia. (2021). Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 13 września 2021 r. w sprawie minimalnych wymagań dla jednostek ochrony zdrowia. (Dz.U. 2021 poz. 1725).
- Ministerstwo Zdrowia. (2022). Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 12 grudnia 2022 r. w sprawie standardów jakościowych dla medycznych laboratoriów diagnostycznych (Dz.U. 2022 poz. 2759).
- Ministerstwo Zdrowia. (2022). Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 2 grudnia 2022 r. w sprawie kadr medycznych oraz wymagań technicznych dla pracowni medycyny nuklearnej (Dz.U. 2022 poz. 2626). Warszawa: Monitor Polski.

- Ministerstwo Zdrowia. (2023). Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 22 grudnia 2022 r. w sprawie standardów organizacyjnych opieki zdrowotnej w dziedzinie radiologii i diagnostyki obrazowej (Dz.U. 2023 poz. 195).
- Ministerstwo Zdrowia. (2023). Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 11 stycznia 2023 r. w sprawie warunków bezpiecznego stosowania promieniowania jonizującego dla wszystkich rodzajów ekspozycji medycznej (Dz.U. 2023 poz. 21).
- Ministerstwo Zdrowia. (2023). Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 9 marca 2023 r. w sprawie szczególnych wymagań, jakim powinny odpowiadać pomieszczenia i urządzenia podmiotu wykonującego działalność leczniczą (Dz.U. 2023 poz. 576).
- Ministerstwo Zdrowia. (2024). Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 22 lutego 2024 r. w sprawie wymagań dla wyrobów medycznych do diagnostyki in vitro (Dz.U. 2024 poz. 267).
- Ministerstwo Zdrowia. (2026). Mapa potrzeb zdrowotnych na lata 2022–2026. <https://basiw.mz.gov.pl/mapy-informacje/mapa-2022-2026/analizy/sprzet-medyczny> (Dostęp z 1.03.2026)
- PKN. (2015). PN-B-02151-2:2015-10, Akustyka budowlana – Ochrona przed hałasem w budynkach – Część 2: Wymagania dotyczące dopuszczalnego poziomu dźwięku w pomieszczeniach. *Polski Komitet Normalizacyjny*
- PKN. (2016). PN-EN ISO 14644-1:2016-03: Czyste pomieszczenia i skojarzone z nimi środowiska kontrolowane - Część 1: Klasyfikacja czystości powietrza na podstawie stężenia cząstek. *Polski Komitet Normalizacyjny*
- PKN. (2017). PN-EN ISO 16890 (części 1–4):2017, Filtry powietrza do wentylacji ogólnej. *Polski Komitet Normalizacyjny*
- PKN (2018). N-B-02151-2:2018-01, Akustyka budowlana – Ochrona przed hałasem w budynkach – Część 2: Wymagania dotyczące dopuszczalnego poziomu dźwięku w pomieszczeniach. *Polski Komitet Normalizacyjny*
- PKN. (2019). PN-EN 16798-1:2019-06: Energetyczne właściwości budynków - Wentylacja budynków - Część 1: Dane wejściowe do projektowania i oceny charakterystyki energetycznej budynków. *Polski Komitet Normalizacyjny*
- Rada Ministrów. (2007). Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 27 grudnia 2006 r. w sprawie dokumentów wymaganych przy składaniu wniosku o wydanie zezwolenia w sprawie dokumentów wymaganych przy składaniu wniosku o wydanie zezwolenia na wykonywanie działalności związanej z narażeniem na działanie promieniowania jonizującego albo przy zgłoszeniu wykonywania tej działalności (Dz.U. 2007 nr 1 poz. 11).
- Rada Ministrów. (2021). Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 15 października 2021 r. w sprawie ochrony przed promieniowaniem jonizującym przy planowaniu i wykonywaniu ekspozycji medycznych (Dz.U. 2021 poz. 1908).
- Rada Ministrów. (2021). Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 21 października 2021 r. w sprawie dokumentów wymaganych przy składaniu wniosku o wydanie zezwolenia w sprawie dokumentów wymaganych przy składaniu wniosku o wydanie zezwolenia na wykonywanie działalności związanej z narażeniem na działanie promieniowania jonizującego albo przy zgłoszeniu wykonywania tej działalności (Dz.U. 2021 poz. 1959).
- Sejm RP. (2024). Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe (t.j. Dz.U. 2024 poz. 1277).
- SWKI VA105-01. (2015). Lüftungstechnische Anlagen in Gebäuden des im Gesundheitswesens (Ventilation and air conditioning systems in healthcare buildings). *Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieuren*.
- Szczęśniak, S. (2026). Stopniowanie filtracji w systemach wentylacji i klimatyzacji pomieszczeń służby zdrowia. *TechMedis - Kształtowanie zdrowego i bezpiecznego środowiska w obiektach ochrony zdrowia*. <https://techmedis.pl/stopniowanie-filtracji-w-systemach-wentylacji-i-klimatyzacji-pomieszczen-sluzby-zdrowia> (Dostęp z 1.03.2026)

Publikacja dofinansowana ze środków budżetu państwa w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki/Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą „Nauka dla Społeczeństwa II” nr projektu NdS-II/SN/0008/2024/01, kwota dofinansowania 775 500,00 zł, całkowita wartość projektu 775 500,00 zł.

Zastrzeżenie: Oświadczenia, opinie i dane przedstawione w publikacjach są wyłączną odpowiedzialnością ich autorów i nie odzwierciedlają stanowiska redakcji *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za jakiegokolwiek szkody dotyczące osób lub mienia wynikające z idei, metod, zaleceń lub produktów omawianych w treści publikacji. *Artykuł udostępniony na licencji Creative Commons CC BY 4.0*.

Disclaimer: The statements, opinions, and data presented in the publications are the sole responsibility of their authors and do not necessarily reflect the views of the editorial board of *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. The editorial board assumes no responsibility or liability for any injury to persons or damage to property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content of the publications. *The article is distributed under the Creative Commons CC BY 4.0 license*.