

Innowacyjny sposób przechowywania szczepionek przeciw COVID-19 w niskich temperaturach

Grzegorz MIZERA

Był to koniec roku 2020. Pandemia COVID-19 rozprzestrzeniła się na całym świecie. Pojawiła się zapowiedź, że firma Pfizer przygotowuje się do produkcji i dystrybucji szczepionek. Szczepionek nowej generacji, które wymagają podczas dystrybucji i przechowywania utrzymania ich w temperaturze -75°C (temperaturze sublimacji CO_2).

Jako projektant między innymi nietypowych rozwiązań chłodniczych o dużym stopniu innowacyjności w tym okresie otrzymałem zlecenie opracowania urządzenia do ich przechowywania i przewożenia.

Ponieważ szczepieniami miał być objęty praktycznie cały świat – czyli kraje o bardzo zróżnicowanym dostępie do energii elektrycznej i o bardzo różnym klimacie – postawiono przed projektem wymagania, by urządzenie przechowalnicze spełniało następujące warunki:

- utrzymywało zadaną temperaturę przechowywania mimo dużych wielogodzinnych przerw w dostawach energii elektrycznej;
- umożliwiało płynny wybór temperatury przechowywania: od temperatury otoczenia do temperatury -90°C ;
- dawało gwarancję, że w przypadku przerw w zasilaniu energetycznym lub awarii urządzenia, temperatura szczepionki nie wzrośnie o więcej niż 10 K w czasie 48 godzin;
- miało pojemność umożliwiającą przechowanie dwóch pojemników szczepionek firmy Pfizer, każdy po 10 000 sztuk;
- zapewniało autonomiczność przechowania: czas nie krótszy niż dwa tygodnie;
- pracowało na ekologicznym czynniku chłodniczym;
- charakteryzowało się prostą konstrukcją;
- umożliwiało prosty serwis nie wymagający ani specjalistycznego sprzętu, ani specjalistycznej wiedzy.

W skrócie można napisać, że zamówione urządzenie przechowalnicze miało być rozwiązaniem zrównoważonym, dostosowanym do przechowywania szczepionek w niskich temperaturach na terenach o niestabilnej sieci elektrycznej i takich, na których brak jest wysoko specjalistycznego serwisu.

ROZPOZNANIE STANU OBECNEGO I POTRZEB

Przystępując do opracowania rozwiązania, przeprowadzono rozpoznanie rynku urządzeń do przechowywania niedużych produktów w temperaturach poniżej -50°C .

Badania rynku produktów urządzeń chłodniczych do przechowywania niedużych produktów w temperaturach poniżej -50°C wykazały, że na rynku są dostępne urządzenia chłodnicze

przypominające swym kształtem tradycyjne lodówki i zamrażarki opierające się na dwóch typach rozwiązań chłodniczych – kaskadzie i pojedynczej jednostopniowej sprężarce ze skraplaczem powietrznym (patrz ramka poniżej).

ROZWIĄZANIE KASKADOWE

Instalacja składa się z niskotemperaturowego urządzenia chłodniczego z czynnikiem R23 o $\text{GWP} = 14\,800$ lub podobnym, której skraplacz jest chłodzony przy pomocy urządzenia chłodniczego z czynnikiem chłodniczym typu R404A (lub jego zamiennikiem) ze skraplaczem powietrznym lub wodnym.

Z myślą o tych urządzeniach w Rozporządzeniu Parlamentu Europejskiego w nr 517/2014 z dnia 16 kwietnia 2014 r. w sprawie gazów cieplarnianych, zawarto klauzule w rozdziale III artykule 11 dotyczącą ograniczenia w wprowadzaniu na rynek czynników chłodniczych. **Wyjątek dopuszczający stosowanie czynników chłodniczych o $\text{GWP} > 2500$ przeznaczony do zastosowania do chłodzenia produktów do temperatur poniżej -50°C .** Czynniki R23 jest trudno dostępny na rynku czynników chłodniczych i jest bardzo drogi. Konstrukcja jest bardzo złożona i wymaga bardzo specjalistycznego serwisu. Zużycie energii – duże.

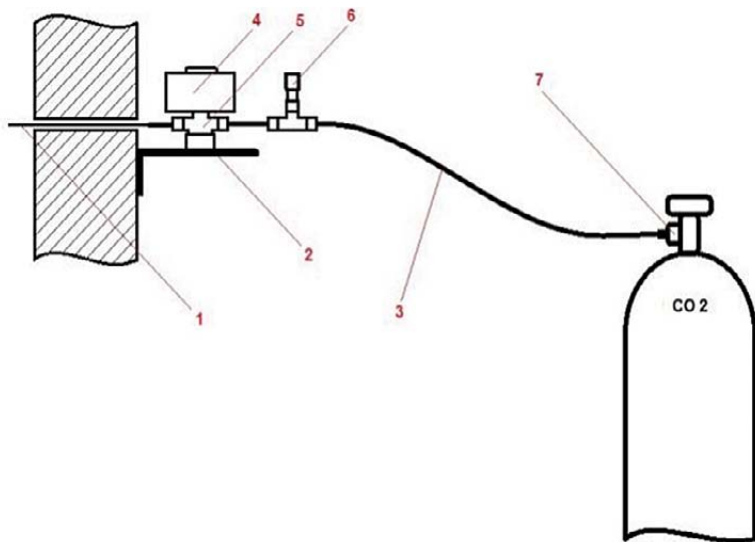
INSTALACJA Z POJEDYNCZĄ JEDNOSTOPNIOWĄ SPRĘŻARKĄ I SKRAPLACZEM POWIETRZNYM



Rys. 1. Widok urządzenia przechowalniczego jedno sprężarkowego z czynnikiem chłodniczym EP88 (Arctiko)

Czynnik chłodniczy zastosowany w tej konstrukcji (rys. 1.) to EP88 o $\text{GWP} = 4425$ stanowiący mieszaninę czynników palnych R600a (Izobutan), R290 (Propan) oraz R116 i R23. Czynniki te są produkowane i dystrybuowane przez producenta tych urządzeń. Koszt zakupu czynnika chłodniczego jest bardzo wysoki. Przy serwisowaniu przy użyciu tego czynnika należy zachować wszelkie normy bezpieczeństwa ze względu na zawartość czynników palnych.

Niektórzy producenci preferują rozwiązania wyposażone w dwie jednakowe instalacje chłodnicze. W przypadku awarii jednej, druga stara się podtrzymać temperaturę przechowywania, sygnalizując stan awaryjny. Konstrukcja jest standardowa, dużo prostsza niż w przypadku rozwiązań kaskadowych. Dlatego w ostatnich latach rozwiązania te dość skutecznie wypierają urządzenia wyposażone w kaskadowe instalacje chłodnicze. Wadą tych urządzeń jest jednak trudność z pozyskaniem nietypowego czynnika chłodniczego (do celów serwisowych). Zużycie energii: średnie.



Rys. 2. System Back-up (Biogenet): 1 – kapilara; 2 – podstawa elektrozaworu 3 – przewód ciśnieniowy; 4 – cewka elektrozaworu; 5 – elektrozawór; 6 – czujka ciśnienia; 7 – redukcja na butlę

Oba przedstawione rozwiązania są bardzo czułe na braki w zasilaniu energią. Nawet niezbyt długie przerwy grożą wzrostem temperatury przechowywanych produktów, co czasami wiąże się z ich zniszczeniem. Aby temu zapobiec doposaża się często urządzenia przechowalnicze w tak zwany system Back-Up (rys. 2.).

System ten ma za zadanie podtrzymanie temperatury przechowywania i przesłanie sygnału o zadziałaniu systemu Back-up do jednostki nadzorującej i serwisu. Dostępne są dwa rodzaje systemu Back-up. Jedne jako źródło „chłodu” wykorzystuje zbiornik ciśnieniowy z CO₂, drugie – zbiornik z azotem. W przypadku wzrostu temperatury powyżej zadanej wartości do pojemnika przechowalniczego zostaje wpuszczony rozprężony gaz CO₂ w postaci „śniegu”, który sublimując obniża temperaturę. Po schłodzeniu do żądanej temperatury dopływ CO₂ zostaje zatrzymany. Proces ten trwa do momentu naprawy urządzenia chłodniczego, lub... wyczerpania się CO₂ w butli.

Układy z wykorzystaniem azotu działają na podobnej zasadzie. Dozują do pojemnika przechowalniczego sprężony azot, który w wyniku rozprężenia schładza się i powoduje zahamowanie wzrostu temperatury w urządzeniu przechowalniczym.

KONCEPCJA ROZWIĄZANIA

W celu spełnienia wymagań zamawiającego, stworzenia koncepcji rozwiązania innowacyjnego urządzenia do przechowywania szczepionek w niskich temperaturach, postanowiono oprócz budowę układu chłodzenia na znanym i sprawdzonym w praktyce rozwiązaniu typu Back-up, dokonując modyfikacji układu przez zastosowanie zbiornika z ciekłym azotem.

ZALETY KORZYSTANIA Z LN₂ JAKO CZYNNIKA CHŁODNICZEGO TO:

- ekologiczność i bezpieczeństwo – czynnik o GWP = 0, w pełni ekologiczny (wprost idealny) niepalny, nietoksyczny;
- powszechna dostępność (79% zawartości w atmosferze);
- łatwość dystrybucji;
- łatwość jego produkcji (skraplania) za pomocą typowych urządzeń (rys. 3.).



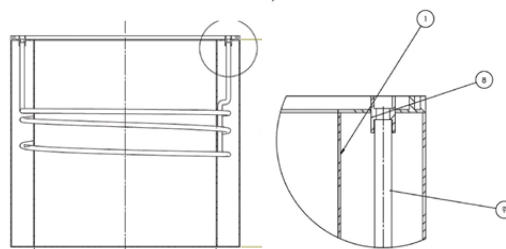
Rys. 3. Instalacja skraplania ciekłego azotu (LN₂) o wydajności 120 kg/dobę ze zbiornikiem 200 litrowym. Zapotrzebowanie energii: 13 kW (Stirling Cryogenics)

Konstrukcję indywidualnego urządzenia do przechowywania szczepionek COVID-19 postanowiono oprzeć na konstrukcji typowego zbiornika do przechowywania skroplonego azotu (LN₂). Zbiornik, w celu utrzymania w nim temperatury -200°C, „zużywa” pewną ilość ciekłego azotu. Zużycie polega na jego odparowaniu. Ciepło niezbędne do odparowania LN₂ to ciepło przenikania przez izolację zbiornika. Produktem ubocznym „zużycia” LN₂ są pary azotu o temperaturze -200°C. Pary w obecnych rozwiązaniach są wypuszczane na zewnątrz przez zawór bezpieczeństwa.

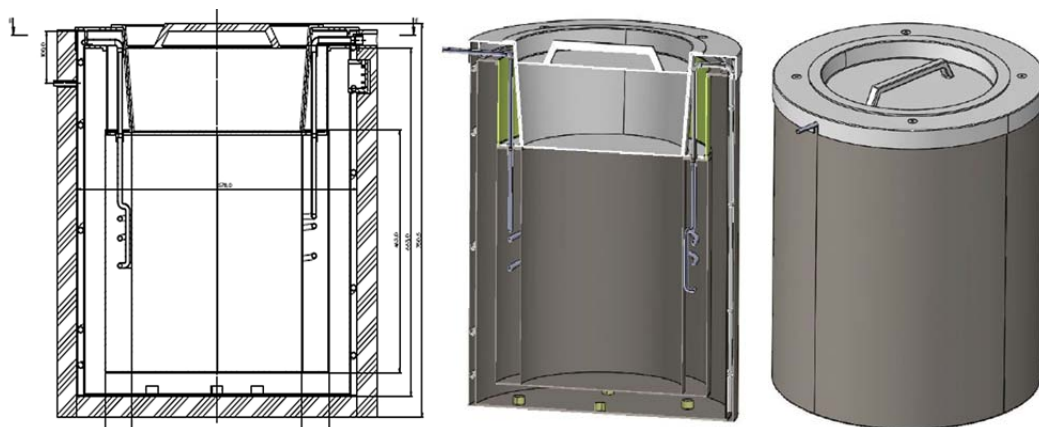
Jak wynika z szacunkowych obliczeń „chłód”, czyli już 1 litr ciekłego azotu, może być wykorzystany do utrzymania temperatury na przykład -80°C w urządzeniu do przechowywania szczepionek COVID-19, o ile pojemnik na szczepionkę będzie wykonany z izolacją taką samą jak zbiorniki do przechowywania ciekłego azotu.

Aby spełnić dodatkowy warunek spadku o 10 K temperatury przechowywania podczas awarii instalacji zasilania w „chłód” przewidziano w zbiorniku przechowalniczym dodatkowy magazyn tego „chłodu” o pojemności wynikającej z bilansu cieplnego. Pojemnik taki wraz z magazynem chłodu przedstawiono na rysunku 4.

Pobór energii przez sterownik oraz zawory elektromagnetyczne może odbywać się bezpośrednio z sieci bądź akumulatora. Akumulator jest tak dobrany, żeby w przypadku bra-



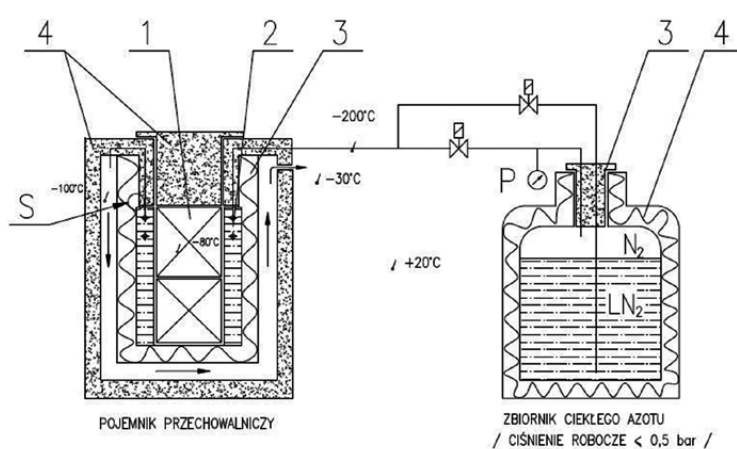
Rys. 4. Akumulator chłodu (zbiornik V = 20 L spirytusu) wraz z wężownicą azotową (Climarem)



Rys. 5. Zbiornik do przechowywania szczepionki COVID-19 (Climarem)

ku zasilania był w stanie podtrzymać pracę urządzenia przez 48 godzin. Po wznowieniu dostaw energii elektrycznej akumulator w ciągu godziny ulega „zregenerowaniu”. W przypadku dalszego braku energii, po wyczerpaniu się akumulatora, urządzenie przechodzi w pracę awaryjną, korzystając z akumulatora „chłodu” i wysyłając sygnał alarmowy do nadzoru i serwisu.

Podstawowym problemem przy tworzeniu takiego pojemnika było wykonanie izolacji o współczynniku k na poziomie $0,005 \text{ W/m}^2\text{K}$ – izolacja typu MLI (ang. *Multi-layer insulation*). Jest to rodzaj izolacji termicznej mającej za zadanie ograniczenie dopływów ciepła z otoczenia na drodze promieniowania. MLI składa się z warstw ekranów radiacyjnych w formie folii aluminiowej lub aluminizowanego materiału. Ekrany te oddzielone są przekładkami z materiału włóknistego. Mają one za zadanie oddzielenie ekranów radiacyjnych i ograniczenie przekazywania ciepła na drodze przewodzenia. Grubość pojedynczej warstwy radiacyjnej to około $10 \mu\text{m}$, natomiast przekładki w zależności od użytego materiału to około $50 \div 70 \mu\text{m}$. Izolację tę umieszcza się w przestrzeni między ścianą zewnętrzną a wewnętrzną zbiornika, w której panuje wysoka próżnia ($3 \cdot 10^{-4}$ Tor). Trudność w opracowaniu właściwej technologii wykonania takiej izolacji stanowiła główny



Rys. 6. Innowacyjne urządzenie do przechowywania szczepionki COVID-19: 1 – pojemnik ze szczepionką (@ 10 000 sztuk); 2 – chłodziwa azotowa wraz z akumulatorem chłodu; 3 – izolacja MLI; 4 – izolacja poliuretanowa

powód nieosiągnięcia zakładanej wartości współczynnika k izolacji w zbudowanym prototypie.

Aby spełnić wymóg utrzymania właściwej temperatury przechowywania przez 48 godzin, mimo braku zasilania elektrycznego bądź awarii urządzenia, postanowiono zastosować akumulator „chłodu” w postaci zbiornika ze spirytusem (alkoholem metylowym o temperaturze zamarzania -110°C)

Na podstawie założonej wartości współczynnika k zbiornika oraz wymiarów pojemnika ze szczepionkami wyznaczono pojemność akumulatora ciepłego – 20 litrów.

W celu regulacji temperatury przechowywania zamontowano węzownicę „azotową” w akumulatorze „chłodu”. Węzownica ta z jednego końca jest zasilana w zależności od potrzeb parami azotu albo ciekłym azotem. Natężenie przepływu azotu jest kontrolowane w ten sposób, by temperatura azotu opuszczającego węzownicę była niższa o zadaną wielkość niż chwilowa temperatura akumulatora „chłodu”. Opuszczające węzownicę częściowo podgrzane pary azotu są kierowane do przestrzeni pomiędzy ścianą zewnętrzną zbiornika przechowalniczego a dodatkową izolacją zewnętrzną. Przestrzeń zewnętrzna zbiornika przechowalniczego jest więc chłodzona, co zmniejsza jego obciążenie cieplne. Schemat instalacji azotowej przedstawia rysunek 6.



Rys. 7. Prototyp innowacyjnej instalacji do przechowywania szczepionek w niskich temperaturach (ANC-BWM)



Rys. 8. Badanie innowacyjnej instalacji przechowywania. Temperatura wsadu – kolor zielony. Wykres z danych ze sterownika i rejestratora firmy SIMEX

W trakcie realizowania projektu zbudowano najpierw demonstrator, na którym zwalidowano idee oraz zebrano nową wiedzę i doświadczenie. Następnie zbudowano prototyp (rys. 7).

PRACA URZĄDZENIA PROTOTYPOWEGO

W trakcie prób zdawczych okazało się, że zastosowane rozwiązanie konstrukcyjne połączenia kołnierza wewnętrznego i zewnętrznego (przy pomocy klejenia) nie sprawdziło się i nie zapewniło utrzymania właściwej próżni. W efekcie nastąpiło pogorszenie wartości współczynnika *k*, co znacznie zwiększyło zużycie azotu. Charakterystykę eksploatacyjną pracy prototypu przedstawia wykres na rysunku 8.

Uzyskane wyniki wskazują, że zastosowany system sterowania oraz algorytm sterowania działał poprawnie. Efektywność wykorzystania „chłodu” azotu obrazuje krzywa fioletowa (do chłodzenia spirytusu i wsadu) i różowa do chłodzenia przestrzeni pomiędzy izolacją zewnętrzną a płaszczem zewnętrznym zbiornika przechowalniczego. Urządzenie utrzymywało zakładaną temperaturę przechowywania (-35÷-60°C), a także osiągnęło temperaturę -90°C. Niska wartość współczynnika *k* izolacji spowodowała jednak szybkie „zużycie” ciekłego azotu (LN₂) oraz szybki wzrost temperatury przechowywania podczas cyklu wzrostu temperatury. Wzrost temperatury o 10 K nastąpił w czasie 5 godzin, projektowany wzrost to 48 godzin.

WNIOSKI

Ponieważ nastąpiło stopniowe wygaszenie pandemii covidowej, dalsze prace nad doskonaleniem specyficznej instalacji przechowywania szczepionek przeciw COVIDOWI przerwano –jednak już w chwili obecnej (przełom czerwca i lipca) mamy sygnały o kolejnej fali zachorowań zarówno w Azji jak i w Europie.

Dotychczas przeprowadzone prace wykazały, że idea wykorzystania ciekłego azotu jako czynnika chłodzącego do zasilania urządzenia do przechowywania szczepionek (i podobnych substancji) w niskich temperaturach jest zweryfikowana praktycznie. W trakcie realizacji projektu rozpoznano wiele nowych problemów, z których większość udało się rozwiązać. Zastosowany system pomiarowy został dopra-

cowany i sprawdzony praktycznie. Nie udało się ostatecznie rozwiązać problemu klejenia stali nierdzewnej z kołnierzem izolacyjnym (na rys. 7. zaznaczono ten szczegół literą „S”). Z problemem tym poradzili już sobie jednak producenci zbiorników do przechowywania LN₂, więc remedium jest nawiązanie współpracy z firmą posiadającą odpowiednie technologie (jest oferta współpracy). Należałoby też kontynuować prace nad zmniejszeniem strat „chłodu” w układzie zasilania azotem (wąż próżniowy, zaizolowanie całego układu, a nie poszczególnych jego elementów). Wykonanie tych prac nie wymaga dużych nakładów finansowych nie jest też pracochłonne. Dopracowanie rozwiązania pozwoli zakończyć projekt przygotowaniem w pełni dopracowanej dokumentacji i technologii wykonania innowacyjnego urządzenia i systemu zasilania tych urządzeń w ciekły azot (LN₂) do przechowywania szczepionek w niskich temperaturach.

W przypadku pojawienia się kiedykolwiek jeszcze potrzeby przechowywania szczepionek w niskich temperaturach, będzie przygotowany system i produkt do natychmiastowego uruchomienia seryjnej produkcji.

Z analizy rynku wynika, że przedmiotowe rozwiązanie może też znaleźć zastosowanie w branży farmaceutycznej (cenne produkty farmaceutyczne) lub medycznej (próbki do badań klinicznych, próbki czynników chorobotwórczych, próbki wymagające zachowania żywotności takie jak komórki macierzyste, tkanki na potrzeby inżynierii tkankowej, narządy, hybrydoma, komórki nowotworowe lub fibroblasty), w zastosowaniach biologicznych lub segmencie tworzyw sztucznych, w branży spożywczej lub części elektronicznych.

Na uwagę zasługuje fakt, że jedno urządzenie skraplające azot z powietrza o mocy 13 kW jest w stanie „zasilać” do 25÷30 indywidualnych instalacji przechowywania szczepionek w niskich temperaturach. Takiej efektywności energetycznej nie uzyska się, stosując znane na rynku rozwiązania. Urządzenie to jest ekologicznie idealne i nie wymaga specjalistycznego serwisu.

Przedmiotowe rozwiązanie innowacyjnego sposobu przechowywania produktów (w szczególności szczepionki przeciw COVID-19) w niskich temperaturach jest zgłoszone do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej.

PODZIĘKOWANIE

Autor dziękuje spółce PHO za finansowanie dotychczasowych prac, spółkom ANC-BWM, CLIMAREM i SIMEX za zbudowanie demonstratora i prototypu oraz Pracownikom Instytutu Maszyn Przepływowych PAN za udział w przeprowadzeniu badań demonstratora i prototypu innowacyjnego urządzenia do przechowywania szczepionek w niskich temperaturach.



dr inż. Grzegorz MIZERA

– Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego PAN