

Poprawa efektywności procesu nukleacji w armatkach śnieżnych dzięki zastosowaniu innowacyjnych konstrukcji dysz atomizujących

Data wpłynięcia do Redakcji: 10/2025
Data akceptacji przez Redakcję do publikacji: 10/2025

2025, volume 14, issue 1, pp. 99-114

Robert Moczarny, Dariusz Kaczor
SUPERSNOW S.A., Poland

Tomasz Rokita
AGH w Krakowie, Poland



Streszczenie: Zewnętrzne urządzenia do naśnieżania stoków narciarskich wymagają ciągłego udoskonalania technologii i rozwój bardziej wydajnych rozwiązań konstrukcyjnych. W związku z tym w artykule przedstawiono nową konstrukcję dyszy atomizującej firmy SUPERSNOW. Szczególną uwagę zwrócono na podstawowe kryteria, które stanowią o wyborze nowego rozwiązania konstrukcyjnego. W badaniach laboratoryjnych wyniki pomiarów nukleacji zewnętrznej oraz wewnętrznej dla dysz standardowo używanych oraz nowej konstrukcji dyszy SUPERSNOW 2020. Określono pomiar gęstości śniegu i obliczono współczynnik produkcji śniegu. W celu określenia możliwości redukcji poboru energii elektrycznej na potrzeby procesu nukleacji, wykonano badania zmiany sposobu generowania drobinek kropel wody. Ważnym etapem badań laboratoryjnych było określenie parametrów rozpylania nowego wzoru dysz nukleacyjnych, które zostały przeanalizowane dla kilku konfiguracji. Na podstawie wyników badań laboratoryjnych porównano wyniki pomiaru kropli dotychczasowej dyszy atomizującej SUPERSNOW z nową konstrukcją atomizera i dokonano wyboru najlepszej dyszy. Nowa konstrukcja dyszy atomizującej została zbadana w warunkach pracy armatki śnieżnej. Wyniki pomiarów jakości śniegu z zastosowaniem nowej konstrukcji dysz nukleacyjnych w zestawieniu z kompresorami tłokowymi różnej mocy wskazują na poprawę parametrów produkcji śniegu.

Słowa kluczowe: armatki śnieżne, dysze atomizujące, nukleacja, produkcja śniegu

WPROWADZENIE

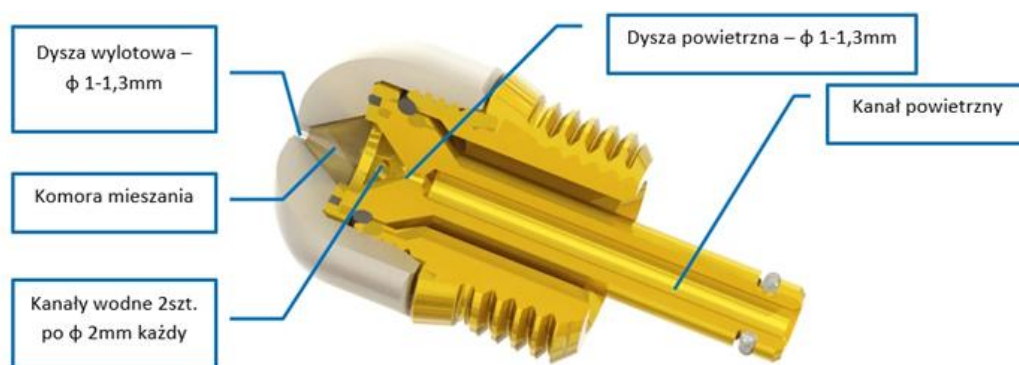
W regionach o niekorzystnych warunkach klimatycznych i niewystarczających naturalnych opadach śniegu, rozwój narciarstwa w dużym stopniu uzależniony jest od specyficznych warunków śniegowych i klimatycznych (Yang i in., 20024). Dlatego też sztuczne naśnieżanie stało się niezbędnym wymogiem dla branży narciarskiej w ciągu ostatnich dekad. Zewnętrzne urządzenia do naśnieżania są uważane za reprezentatywny produkt sztucznego naśnieżania. W związku z tym udoskonalenie technologii sztucznego naśnieżania i rozwój bardziej wydajnych urządzeń naśnieżających stały się pilną potrzebą obecnego przemysłu. Proces wytwarzania sztucznego śniegu składa się z dwóch procesów: atomizacji i krystalizacji. Najpierw woda pod wysokim ciśnieniem przepływa przez dyszę wirową urządzenia do naśnieżania i rozpyla się na małe krople. Następnie drobne kropelki zderzają się z jądrem lodu wytwarzanym przez generator jąder lodu i

zamarzają po uwolnieniu ciepła (Zhang i in., 2022; Wang i in., 2023). Krystalizacja kropeł rozpylanych przez dyszę wirową jest nukleacją heterogeniczną, a krople uwalniają ciepło i zamarzają podczas opadania w powietrzu (Zhao i in., 2023). Średnica kropli jest w dużej mierze związana z czasem zamarzania kropli (Liu i in., 2012). Dlatego też, atomizacja przed krystalizacją odgrywa ważną rolę w naśnieżaniu. Wielkość kropli rozpylanej bezpośrednio wpływa na jakość śniegu, mniejsze krople zamarzają szybciej i tworzą bardziej puszysty śnieg. Natomiast natężenie przepływu strumienia bezpośrednio determinuje produkcję śniegu. Jakość śniegu i produkcja śniegu są najważniejszymi wskaźnikami oceny naśnieżania, a także reprezentują jego konkurencyjność na rynku. Dlatego też, charakterystyka rozpylania bezpośrednio wpływa na wydajność naśnieżania, a mniejszy rozmiar kropli i większe natężenie przepływu utworzone przez system rozpylania mogą zapewnić lepszą wydajność naśnieżania (Dong i in., 2023).

W armatach śnieżnych szczególną rolę odgrywają dysze atomizujące, które umożliwiają uzyskanie małych rozmiarów kropeł rozpylanych stanowiących jądra krystalizacji śniegu i które pozwalają na uzyskanie dużego natężenia przepływu wody generowanego przez pusto stożkowe dysze wodne. Jednak równowaga między rozmiarem kropeł a natężeniem przepływu dyszy jest rzadko uwzględniana we wcześniejszych publikacjach. Dlatego analiza konstrukcji dyszy jest niezbędna do poprawy charakterystyk rozpylania, co przekłada się na lepszą wydajność naśnieżania. Dysza atomizująca, jest uważana za główny element rozpylający w procesie naśnieżania. Woda pod wysokim ciśnieniem trafia do komory mieszania, gdzie pod odpowiednim kątem doprowadzane jest również sprężone powietrze z kompresora. W tym miejscu obydwa media mieszają się a sprężone powietrze rozbija wstępnie cząsteczki wody na mniejszą frakcję. Podczas wylotu mieszaniny wody i sprężonego powietrza z korpusu dyszy atomizującej następuje rozprężenie mieszanki i uwolniona energia zgromadzona w sprężonym gazie dokonuje ostatecznego rozbicia cząsteczek wody co w połączeniu z jednoczesnym gwałtownym spadkiem temperatury powoduje dynamiczną reakcję zamarzania cząsteczek wody zawartych w rozpylanym strumieniu.

DYSZE ATOMIZUJĄCE

Jedną z głównych wad obecnie stosowanych dysz nukleacyjnych (rysunek 1) jest napływ wody do sekcji powietrza w przypadku awarii układu zasilania na stoku. Sytuacja taka może być bardzo prawdopodobna w przypadku dużego obciążenia instalacji elektrycznej – np. podczas dużych mrozów. Wówczas maszyna gwałtownie się wyłącza. Z racji konstrukcji komory z wewnętrznym mieszaniem zawartej w dyszy, woda dostaje się do układu powietrznego. Dodatkowo ponieważ napływająca woda do komory zamyka drogę ujścia dla powietrza przez dyszę, elementy zabezpieczające sekcję powietrza tj. automatyczne zawory odwadniające (działające w oparciu o sprężynę) nie są w stanie się otworzyć z powodu braku odpowiedniego spadku ciśnienia na sekcji powietrza.



Rys. 1 Dotychczasowa budowa dyszy atomizującej SUPERSNOW

Źródło: SUPERSNOW, 2025

Powoduje to zalewanie sprężarki wodą. W przypadku pozostawienia sprężarki w takim stanie przez dłuższy okres, powoduje to awarię sprężarki i blokadę pracy całej maszyny do czasu naprawy sprężarki. Kolejny aspekt to próba poprawy procesu nukleacji polegająca na redukcji wykorzystania ilości sprężonego powietrza i wody na potrzeby tego procesu i tym samym optymalizację nukleacji poprzez zredukowanie zapotrzebowania na energię.

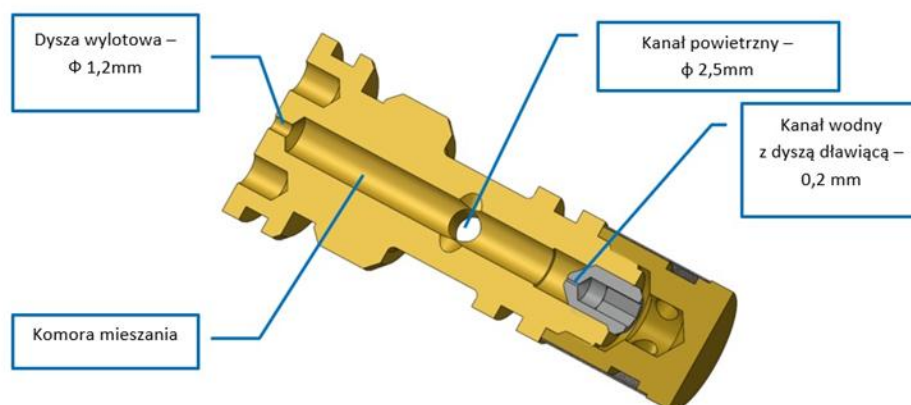
W związku z powyższym przystąpiono do poszukiwań alternatywnych dysz atomizujących, które są dostępne na rynku, i które mogą służyć jako podstawa do wypracowania optymalnego układu nukleacji w nowej armatce śnieżnej. Główne kryteria jakie stanowiły o wyborze nowego rozwiązania do badań to:

- Ograniczenie lub wyeliminowanie problemu przedostającej się wody do kanału powietrznego – Dysza z konstrukcją niwelującą lub minimalizującą skutki gwałtownego, awaryjnego wyłączenia maszyny;
- Dysza zasilana dwoma medium – woda i sprężone powietrze;
- Wytrzymałość dyszy na ciśnienie zasilanej wody – co najmniej 40 bar;
- To samo lub mniejsze zużycie powietrza do atomizacji wody w stosunku do dysz SUPERSNOW;
- To samo lub mniejsze zużycie wody do atomizacji w stosunku do dysz SUPERSNOW;
- Porównywalne gabaryty dyszy (dysza SUPERSNOW mieści się w gabarytach walca o wymiarze ϕ 22mm i wysokości 50 mm)
- Komora dyszy z wewnętrznym mieszaniem dwóch mediów zasilających.

Na podstawie powyższych kryteriów stworzona została konstrukcja autorska SUPERSNOW dyszy atomizującej (rysunek 2).

Całość konstrukcji spełnia zakładane wymagania. Możliwe jest dopasowanie geometryczne produktu do potrzeb SUPERSNOW.

Dysza pomimo komory z wewnętrznym mieszaniem pozwala na spadek ciśnienia na sekcji powietrza i tym samym otwarcie zaworów odwadniających – pozwala to na bezpieczne odprowadzenie przedostającej się wody z układu powietrza na zewnątrz maszyny.



Rys. 2 Koncepcja dyszy nukleacyjnej SUPERSNOW

Standardowo dysze nukleacyjne w urządzeniach spotykanych na rynku są umieszczone w pobliżu dysz wodnych na obwodzie pierścienia (rysunek 3) zwykle w odległości nie większej niż 15-20 cm.



Rys. 3 Umieszczenie dysz nukleacyjnych w konwencjonalnej armatce SUPERSNOW

W celu poprawy procesu nukleacji opracowano nowy układ z dyszami atomizującymi umieszczony w innym miejscu w stosunku do konwencjonalnych maszyn (rysunek 4).

Nowo zaprojektowany układ został zamontowany tuż za silnikiem napędzającym standardowy wentylator osiowy. Uzyskano dystans około 500 mm między dyszami nukleacyjnymi, a dyszami wodnymi.



Rys. 4 Umieszczenie nowej głowicy nukleacyjnej w armatce śnieżnej



Figure 10. (a) Motor assembly with stator windings. (b) Motor assembly with stator windings covered by a blue protective cap.

BADANIA LABORATORYJNE PARAMETRÓW PRODUKCJI ŚNIEGU

Tabela 1 Pomiar parametrów produkcji śniegu

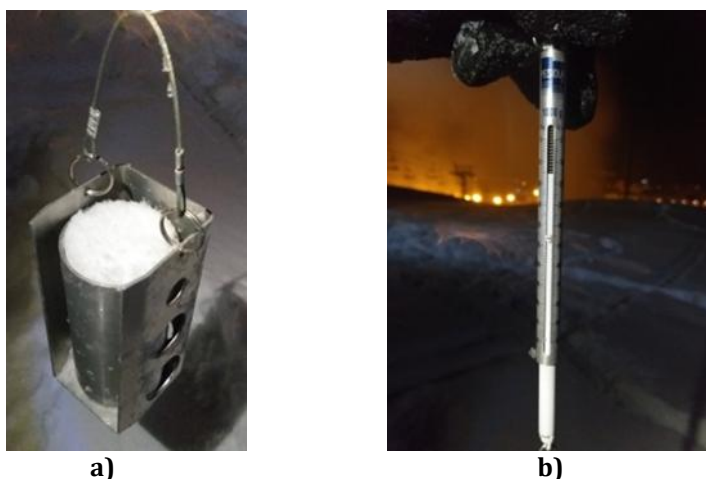
[illegible]

Natomiast w tabeli 2 zestawiono wyniki przepływu w zależności od konfiguracji połączenia zaworów i ilości dysz.

Tabela 2 Zestawienie wyników przepływu w zależności od konfiguracji połączenia zaworów i ilości dysz

	Ilość dysz 700	Wydajność pojedynczej dyszy [l/min] dla ciśnienia 40 bar	Wydajność sekcji teoretyczna [l/min] przy 40 bar
1	6	5,3	31,8
2	12	5,3	63,6
1+2	18	5,3	95,4
3	24	5,3	127,2
1+3	30	5,3	159
2+3	36	5,3	190,8
1+2+3	42	5,3	222,6
4	48	5,3	254,4
1+4	54	5,3	286,2
2+4	60	5,3	318
1+2+4	66	5,3	349,8
3+4	72	5,3	381,6
1+3+4	78	5,3	413,4
2+3+4	84	5,3	445,2
1+2+3+4	90	5,3	477

Sam pomiar jakości produkowanego śniegu odbywał się w oparciu o metodę pomiaru gęstości śniegu opracowaną na ośrodku Lech w Austrii. Polega on na wsypaniu produkowanego śniegu na tackę pomiarową o wymiarach około 50x50 cm. Następnie usypany śnieg zbierany jest do pojemnika o kształcie walca i o zdefiniowanej objętości 0,5 dm³ (rysunek 6a). Po zapełnieniu pojemnika śniegiem jest on ważony przy pomocy wagi (rysunek 6b).



a)

b)

Rys. 6 Pomiar jakości produkowanego śniegu:

a) Pojemnik do pomiaru śniegu wypełniony próbką, b) Odczyt wagi pojemnika ze śniegiem

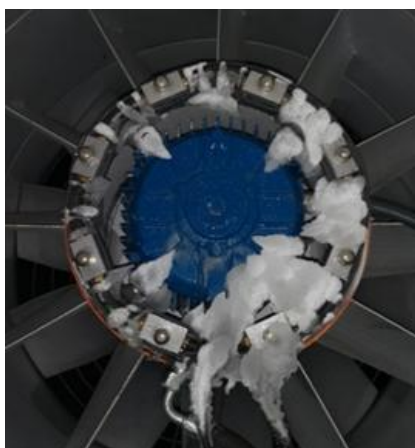
Po określeniu wagi pojemnika ze śniegiem odejmowana jest waga pustego pojemnika i tym samym definiowana waga 0,5 dm³ śniegu. Po przemnożeniu masy samego śniegu razy dwa otrzymujemy gramaturę śniegu wyrażoną w kg/m³. Wyniki współczynnika produkcji śniegu, przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3 Jakość śniegu

Wartość skali jakości śniegu	Gramatura śniegu [kg/m ³]	Współczynnik produkcji śniegu
1	333	3
2	339	2,95
3	351	2,85
4	400	2,5
5	500	2
6	571	1,75
7	667	1,5

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów i zanotowanych wyników produkcji stwierdzono, że:

- Przeniesienie głowicy z dyszami nukleacji dalej od dysz wodnych w prezentowany sposób nie ma znaczącego wpływu na poprawę parametrów produkcji śniegu, przy zachowaniu tych samych paramentów zasilania dysz atomizujących;
- Nowa konstrukcja dysz, nie ma wpływu na pogorszenie właściwości użytkowych armatki – maszyna przy zachowaniu tych samych parametrów zasilania dysz nukleacyjnych zachowuje te same parametry. Korzyścią jest sama poprawa konstrukcji dyszy, niwelująca problemy w przypadku awaryjnego zatrzymania maszyny;
- Podczas prób umiejscowienie głowicy nukleacyjnej wewnątrz tuby armatki śnieżnej powodowało dodatkowe osadzanie się drobin śniegu na elementach metalowych. W konsekwencji doprowadzało to do zablokowania pracy niektórych dysz nukleacyjnych (rysunek 7).

**Rys. 7 Głowica nukleacyjna oblodzona**

Zastosowanie dysz ultradźwiękowych do produkcji mgły

W konwencjonalnych maszynach proces atomizacji wody odbywa się przy udziale sprężonego powietrza, które rozbija rozpylaną wodę z dysz na drobne krople – do 50 μm . Na rynku są dostępne urządzenia jak dysze ultradźwiękowe. Tego typu dysze powszechnie używane są np. w nawilżaczach powietrza. Generują one krople o wielkościach do około 20 μm . W badaniach zastosowano domowy

nawilżacz powietrza z jedną tego typu dyszą (rysunek 8). Celem badania było określenie możliwości redukcji poboru energii elektrycznej na potrzeby procesu nukleacji (zmiana sposobu generowania drobinek kropel wody).



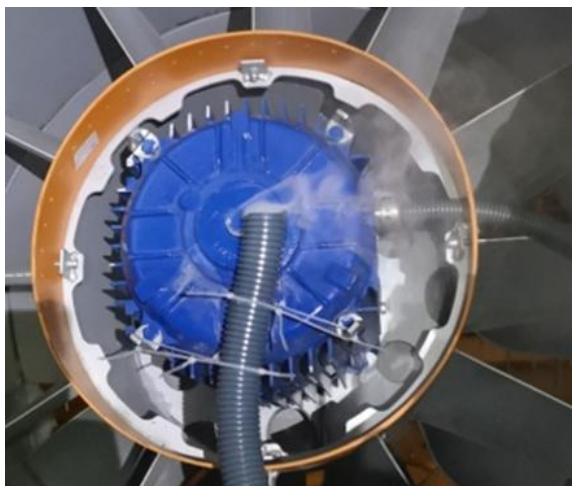
Rys. 8 Produkcja mgły za pomocą nawilżacza wykorzystującego dyszę ultradźwiękową

Na potrzeby badań nawilżacz został dostosowany i usunięto z niego zbędne komponenty m.in. wentylator, kratkę, część obudowy (rysunek 9).



Rys. 9 Widok nawilżacza powietrza po demontażu zbędnych komponentów

Wyjście dyszy ultradźwiękowej zostało umieszczone w dwóch miejscach podczas testu w armatce – tuż za silnikiem oraz tuż przy jednej pracującej dyszy wodnej (rysunek 10).



Rys. 10 Wyjście dyszy ultradźwiękowej tuż za silnikiem

Badania parametrów rozpylania

Dla potrzeb badania samych parametrów rozpylania nowego wzoru dysz nukleacyjnych zostało stworzone kilka konfiguracji. W tym przypadku elementem modyfikowanym był element końcowy dyszy – rozpylacz. Został on wykonany w 3 wariantach:

- Z otworem wylotowym 1,1 mm;
- Z otworem wylotowym 1,2 mm;
- Z otworem wylotowym 1,3 mm.

Dysza dławiąca nie była modyfikowana. Dysze zostały przebadane przy pomocy dostępnych w SUPERSNOW narzędzi. Dysze zostały podłączone pod układ zasilany z kompresora tłokowego oraz z hydrantu dostępnego na stacji prób firmy.



Rys. 11 Badania pracy strumienia nowo zaprojektowanej dyszy atomizującej w warsztacie SUPERSNOW

Na cele badawcze zostały podłączone tylko 3 nukleatory w układ zasilania. Parametry mierzone podczas badania to:

- Ciśnienie powietrza podczas pracy;

- Wydajność wody;
- Ciśnienie wody zasilającej dysze.

Istotną kwestią w dyszach tego typu konstrukcji jest skuteczność działania elementu dławiącego w dyszy atomizującej. Ponieważ armatka śnieżna pracuje w zakresie ciśnień od 8 do 40 bar dysze nukleacyjne muszą utrzymywać poprawną pracę w tych warunkach. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4 Konfiguracja dysz nukleacyjnych

Badany układ	Ciśnienie wody [bar]	Przepływ wody przez badany układ [l/min]	Ciśnienie powietrza na kompresorze Alup AGK O 271 [bar]
3 x Dysza nukleacyjna z otworem 1,1 mm otwór wodny 0,2 mm	20	0,2	6,2
	30	0,25	6,5
	40	0,3	6,7
	50	0,4	7
3 x Dysza nukleacyjna z otworem 1,2 mm otwór wodny 0,2 mm	20	0,3	5,9
	30	0,4	6,2
	40	0,5	6,7
	50	0,6	7,2
3 x Dysza nukleacyjna z otworem 1,3 mm otwór wodny 0,2 mm	20	0,2	4,5
	30	0,3	4,8
	40	0,3	5,1
	50	0,4	5,2

Dodatkowo w ramach prac badawczych zrealizowane zostały badania mające na celu precyzyjne określenie wielkości kropeł generowanych przez nową konstrukcję dysz w różnych konfiguracjach. Wyniki pomiarów doprowadziły do stworzenia tabeli 5 i 6 dla określenia najlepszego wariantu dyszy atomizującej. Jako najkorzystniejszy wariant wytypowany został ten który przy tych samych parametrach zasilania dyszy jest w stanie wytworzyć najmniejsze krople.

Tabela 5 Ocena punktowa dysz

Dysza	Pw	d	Qw	Pp	Qp	WDV10	WDV50	WDV90	WD43	WD32	suma	Punkty
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,1 mm	20	300	0,08	6,2	2109	0,25	0,14	0,00	0,00	0,00	0,39	0,21
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,2 mm	20	300	0,07	5,9	2176	0,00	0,20	0,86	0,72	0,04	1,82	1,00
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,3 mm	20	300	0,05	4,5	2009	0,35	0,00	0,56	0,01	0,01	0,92	0,51
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,1 mm	20	500	0,08	6,2	2109	0,25	0,09	0,00	0,56	0,00	0,90	0,61
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,2 mm	20	500	0,07	5,9	2176	0,00	0,18	0,66	0,61	0,02	1,48	1,00
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,3 mm	20	500	0,05	4,5	2009	0,38	0,00	0,10	0,00	0,02	0,49	0,33
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,1 mm	30	300	0,08	6,5	2191	0,11	0,22	0,54	0,65	0,06	1,57	1,00
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,2 mm	30	300	0,09	6,2	2109	0,00	0,22	0,61	0,65	0,04	1,53	0,97
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,3 mm	30	300	0,09	4,8	2029	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,36	0,23
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,1 mm	30	500	0,08	6,5	2191	0,18	0,13	0,19	0,00	0,03	0,54	0,85
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,2 mm	30	500	0,09	6,2	2109	0,00	0,13	0,43	0,07	0,00	0,63	1,00
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,3 mm	30	500	0,09	4,8	2029	0,32	0,00	0,00	0,04	0,05	0,40	0,64
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,1 mm	50	300	0,12	7	2382	0,00	0,20	0,75	0,74	0,09	1,78	1,00
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,2 mm	50	300	0,06	7	2104	0,19	0,39	0,00	0,00	0,25	0,84	0,47
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,3 mm	50	300	0,12	5,2	2028	0,06	0,00	0,66	0,48	0,00	1,20	0,67
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,1 mm	50	500	0,12	7	2382	0,08	0,21	0,15	0,04	0,09	0,58	0,35
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,2 mm	50	500	0,06	7	2104	0,00	0,44	0,66	0,25	0,28	1,63	1,00
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,3 mm	50	500	0,12	5,2	2028	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,05

Tabela 6 Wybór najlepszej dyszy

Dysza	Suma punktów	OCENA	
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,1 mm	4,03	0,741	
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,2 mm	5,44	1,000	
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,3 mm	2,43	0,447	
Klasyfikacja końcowa			
Dysza	Suma punktów	OCENA	Miejsce w rankingu
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,2 mm	5,443	1,000	1
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,1 mm	4,034	0,741	2
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,3 mm	2,435	0,447	3

Dla porównania zestawiono wyniki pomiaru kropli dotychczasowej dyszy atomizującej SUPERSNOW z nową konstrukcją atomizera (tabela 7).

Na podstawie badań stwierdzono, że przy normalnych parametrach zasilania dysz jakie występują w armatce śnieżnej dysze nowej konstrukcji uzyskują lepsze wyniki w rozdrobnieniu kropel wody.

Tabela 7 Porównanie wyników pomiaru kropli dyszy atomizującej

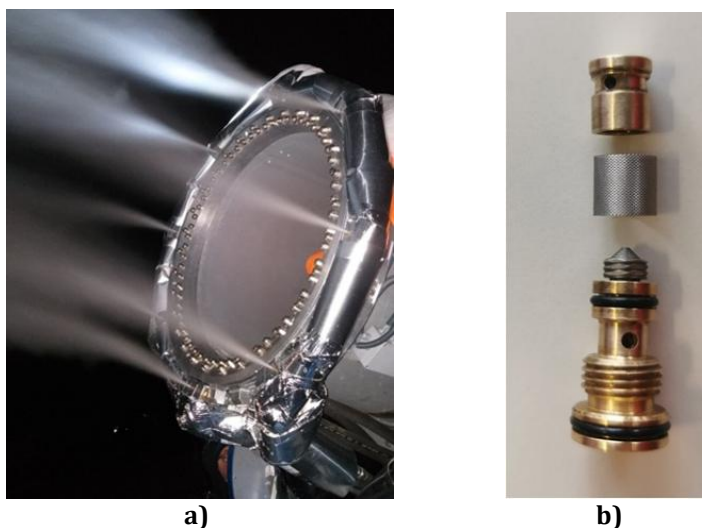
Dysza	Ciśnienie wody zasilania dyszy	Odległość pomiaru od wylotu dyszy [mm]	Wydajność wody Qw [l/min]	Ciśnienie powietrza zasilającego dyszę Pp [bar]	Wydajność powietrza zasilającego dyszę Qp [l/h]	Dv(10) [um]	Dv(50) [um]	Dv(90) [um]	D[4][3] [um]	D[3][2] [um]
Dotychczas stosowana dysza dwumediowa – atomizująca – Supersnow 1.0mm	6,5	300	Nie mierzono	7,5	Nie mierzono	10,02	14,44	21,38	16,76	14,08
	7,5	300		8,5		10,19	14,57	21,1	16,06	14,13
	5,4	300		6,5		11,69	12,54	13,53	16,6	13,2
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,3 mm	20	300	0,05	4,5	2009	6,149	13,02	35,85	56,65	11,51
	30	300	0,09	4,8	2029	6,666	14,48	32,64	45,27	12,45
	50	300	0,12	5,2	2028	7,884	16,27	31,42	35,06	14,03
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,2 mm	20	300	0,07	5,9	2176	9,454	10,46	11,57	15,96	11,07
	30	300	0,09	6,2	2109	10,4	11,24	12,69	15,9	11,9
Dysza dwumediowa – atomizująca – Atomizer ϕ 1,1 mm	20	300	0,08	6,2	2109	7,065	11,26	80,85	57,19	11,57
	30	300	0,08	6,5	2191	9,306	11,35	15,07	15,67	11,76
	50	300	0,12	7	2382	8,401	13,05	22,8	17,45	12,73

W związku z osiąganymi lepszymi parametrami rozpylania wody w nowej konstrukcji dyszy istnieje szansa na to że możliwe będzie zredukowanie niektórych parametrów medium zasilających tego typu dyszę i osiągnięcie kamienia milowego o redukcji zużycia energii na proces nukleacji w armatce śnieżnej.

BADANIA WYDAJNOŚCI DYSZ ATOMIZUJĄCYCH W WARUNKACH PRACY ARMATKI ŚNIEŻNEJ

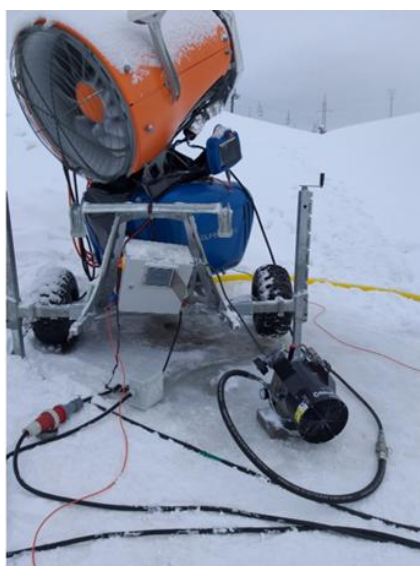
Nowa konstrukcja dyszy została zastosowana w naturalnych warunkach pracy armatki śnieżnej w oparciu o jedną z armatek z oferty SUPERSNOW model 700A SE, dla której znana jest charakterystyka wydajności produkcji i możliwe jest zweryfikowanie różnic jakie wnosi nowe rozwiązanie dyszy nukleacyjnej. Na standardowym urządzeniu przebudowany został układ pierścienia wodnego z

dyszami poprzez domontowanie na obwodzie przystawki z dyszami nukleacyjnymi wg nowego projektu w ilości 8 sztuk. Badania odbywały się w oparciu o standardowy zestaw dysz wodnych. Modernizacji uległ jedynie zespół nukleacji. Nową zabudowę dysz nukleacyjnych na armatce i pracę układu podczas prac badawczych przedstawiono na rysunku 12.



**Rys. 12 Armatka śnieżna: a) Rozmieszczenie dysz nukleacyjnych na armatce;
b) Nowa konstrukcja dyszy atomizującej**

Standardowo dla potrzeb nukleacji w armatkach SUPERSNOW wykorzystywany jest kompresor tłokowy bezolejowy o mocy 4 kW. Dla potrzeb badawczych nad uzyskaniem ograniczenia zużycia energii dla potrzeb atomizacji zastosowano do prób także kompresor tłokowy o mocy 1,5 kW (rysunek 13). Jest to kompresor o mniejszej wydajności ale tych samych parametrach ciśnienia pracy.



Rys. 13 Armatka śnieżna z podłączonym kompresorem o mocy 1,5 kW

Alternatywny kompresor o mniejszej mocy został zamiennie badany z nowym układem dysz atomizujących na tym samym urządzeniu naśnieżającym poprzez podłączanie instalacji ze zmniejszonym kompresorem bezpośrednio do węża dostarczającego powietrze do sekcji nukleacyjnej.

W trakcie realizacji badań przemysłowych, weryfikowano kilka konfiguracji układu nukleacji:

- Dysze nukleacyjne w ilości 8 sztuk z otworem wylotowym 1,4 mm zasilane przez kompresor 4 kW;
- Dysze nukleacyjne w ilości 8 sztuk z otworem wylotowym 1,4 mm zasilane przez kompresor 1,5 kW;
- Dysze nukleacyjne w ilości 8 sztuk z otworem wylotowym 1,0 mm zasilane przez kompresor 1,5 kW;
- Dysze nukleacyjne w ilości 6 sztuk z otworem wylotowym 1,0 mm zasilane przez kompresor 1,5 kW.

We wszystkich konfiguracjach dążono do uzyskania poziomu ciśnienia powietrza w zakresie 5-6 bar wskazywanego przez manometr zainstalowany przy kompresorze, stąd wynika różna średnica otworu wylotowego w konfiguracjach badanych dysz. Dysza dławiąca wodę przez którą dostarczana była woda do komory mieszającej pozostawała w każdej konfiguracji taka sama. Niższe wartości ciśnienia niż 5 bar powodują spadek parametrów powietrza dla rozbijania strugi wodnej rozpryskiwanej przez dyszę. Zbyt wysokie ciśnienie podnosi temperaturę pracy sprężarki i w konsekwencji także jej zużycie. Sami producenci sprężarek deklarują również nominalne parametry dla ciśnienia 5 bar. Stąd taka wartość ciśnienia została ustalona jako optymalna dla pracy dysz atomizujących. Konfiguracja nowej konstrukcji dysz w ilości 6 sztuk z kompresorem 4 kW nie była weryfikowana z racji przekroczenia dopuszczalnego ciśnienia pracy (ponad 10 bar) dla tego kompresora przy takiej konfiguracji. Podczas prac badawczych zaobserwowano niższą temperaturę dostarczanego powietrza do instalacji, tłoczonego przy pomocy małego kompresora. Temperatura powietrza oscylowała w granicach 35-45°C. Kompresor 4 kW dostarcza powietrze o znacznie wyższej temperaturze w granicy 60-90°C. Może to wynikać z budowy kompresorów i korzystniejszego odprowadzania produkowanego ciepła przez chłodzenie przez wentylator kompresora w przypadku mniejszej konstrukcji kompresora.

Badania były realizowane według autorskiej procedury, w której w odległości około 20 m od armatki śnieżnej ustawione były tacki pomiarowe z tworzywa o wielkości ok. 50 cm x 50 cm, na które spadał produkowany z armatki śnieżnej śnieg. Po okresie 15-30 min pracy, tacki pomiarowe z wyprodukowanym śniegiem były mierzone pod kątem jakości, przez pomiar gęstości śniegu. Tak odczytana gęstość śniegu przeliczona została na zdefiniowane jakości śniegu wg charakterystyki maszyn zaimplementowane w sterownikach armatek SUPERSNOW. Podczas badań określana została jakość produkowanego śniegu wg skali producenta SUPERSNOW od 1 do 7 co odpowiada gramaturze od 345 g/l do

870 g/l, gdzie jakość 1 (345 g/l) oznacza najwyższą jakość – śnieg suchy, natomiast jakość 7 (870 g/l) oznacza najniższą jakość śniegu – śnieg mokry. Wyniki badań zestawione zostały w tabeli 8.

Tabela 8 Tabela wyników pomiaru jakości śniegu z zastosowaniem nowej konstrukcji dysz nukleacyjnych w zestawieniu z kompresorami tłokowymi różnej mocy

L.p.	Data	UWAGI i komentarze do wyników	Temperatura wody zasilającej [C]	Ciepłota wody zasilającej [bar]	Temperatura mokrego termometru [C]	Konfiguracja zaworów	Jakość	Przepływ wody – test [l/min]	Przepływ wg. charakterystyki 700ASE [l/min]	Różnica
1	2021-01-15	Kompresor 4 kW. Dysze nukleacyjne 1,4mm x 8sztuk	0,5	16,6	-9,2	1+2+3+4	5	307,3	291,2	16,1
2		Kompresor 4 kW. Dysze nukleacyjne 1,4mm x 8sztuk	0,5	21,7	-9	1+3+4	5	304,5	285,4	19,1
3		Kompresor 4 kW. Dysze nukleacyjne 1,4mm x 8sztuk	0,5	23,9	-9,2	1+4	3	221,2	203,8	17,4
4		Kompresor 4 kW. Dysze nukleacyjne 1,4mm x 8sztuk	0,5	25	-9,2	2+3	2	150,8	160,1	-9,3
5	2021-01-17	Kompresor 4 kW. Dysze nukleacyjne 1,4mm x 8sztuk	0,7	17,7	-12,4	1+2+3+4	4	317,3	322,9	-5,6
6		Kompresor 4 kW. Dysze nukleacyjne 1,4mm x 8sztuk	0,6	21,8	-12,4	1+3+4	4	305,2	324,4	-19,3
7		Kompresor 4 kW. Dysze nukleacyjne 1,4mm x 8sztuk	0,6	23,1	-12,5	1+2+4	3	265,8	269,2	-3,4
8		Kompresor 4 kW. Dysze nukleacyjne 1,4mm x 8sztuk	0,5	23,9	-12,3	1+4	3	221,2	266,5	-45,3
9		Kompresor 4 kW. Dysze nukleacyjne 1,4mm x 8sztuk	0,5	25	-12,6	1+2+3	1	176,0	194,7	-18,7
10	2021-01-19	Kompresor 4 kW. Dysze nukleacyjne 1,4mm x 8sztuk	0,8	25	-1,9	1+2	6	75,4	81,6	-6,2
11		Kompresor 4 kW. Dysze nukleacyjne 1,4mm x 8sztuk	0,9	25	-1,9	2	5	50,3	67,6	-17,4
12	2021-01-26	- Pomiary przy wietrze i opadach śniegu naturalnego	0,5	23,2	-4,6	2+4	6	242,2	190,0	52,2
13			0,4	24,2	-4,6	4	5	197,9	159,1	38,8
14			0,5	25	-4,6	1+3	3	125,7	110,8	14,9
15			0,8	25	-4,7	1+2	1	75,4	79,4	-4,0
16	2021-02-01	Kompresor 4 kW. Dysze nukleacyjne 1,4mm x 8sztuk	0,5	18,5	-12	1+2+3+4	3	324,4	260,4	64,0
17		Kompresor 1,5 kW. Dysze nukleacyjne 1,4mm x 8sztuk Ppow 2 bary	0,5	18,5	-12	1+2+3+4	3	324,4	260,4	64,0
18		Kompresor 1,5 kW. Dysze nukleacyjne 1,0mm x 6sztuk Ppow 4bary	0,5	18,5	-12	1+2+3+4	4	324,4	316,2	8,2
19		Kompresor 1,5 kW. Dysze nukleacyjne 1,0mm x 6sztuk Ppow 6 bar	0,5	18,5	-12	1+2+3+4	4	324,4	316,2	8,2
20	2021-02-10	Kompresor 1,5 kW. Dysze nukleacyjne 1,0mm x 6sztuk Ppow 6 bar	0,3	20,6	-9,5	1+2+3+4	5	342,3	302,8	39,6
21			0,3	23	-9,5	1+2+4	3	265,2	211,9	53,3
22			0,2	24	-9,5	1+4	2	221,7	167,3	54,4
23			0,2	22	-9,5	1+3+4	5	306,6	304,2	2,4
24			0,2	23	-8,6	1+2+4	4	265,2	236,2	29,1
25		Kompresor 4 kW. Dysze nukleacyjne 1,4mm x 8sztuk	0,1	23	-7,9	1+2+4	5	265,2	258,6	6,7
26			0,2	25	-7,2	1+2+3	3	176,0	165,8	10,2
27			0,3	25	-7	1+2+3	3	176,0	160,9	15,1
28		Kompresor 1,5 kW. Dysze nukleacyjne 1,0mm x 6sztuk	0,7	25	-6	2+3	3	150,8	137,8	13,1
29			0,5	25	-4,3	2+3	5	150,8	149,6	1,2
30			0,4	25	-3,9	2+3	5	150,8	138,8	12,1
31			0,5	25	-3,9	3	3	100,6	96,7	3,9
32			1	25	-2,7	3	5	100,6	97,9	2,7
33	2021-03-02	Kompresor 1,5 kW. Dysze nukleacyjne 1,0mm x 6sztuk	3	24,5	-3,7	1+2	2	74,7	63,9	10,8
34			3	24,5	-4,4	1+2	1	74,7	66,9	7,7
35			3	24,5	-4,6	1+3	4	124,4	118,1	6,3

W wyniku przeprowadzonych badań, wnioskować można o korzystnej konstrukcji nowej dyszy atomizującej dla potrzeb nukleacji w armatkach śnieżnych. Wyniki przedstawione w tabeli 8, wykazują poprawę parametrów produkcji z wykorzystaniem konfiguracji z kompresorem 1,5 kW i 6 sztuk dysz z otworem 1,0 mm lub konfiguracji z 8 sztuk dysz z otworem 1,0 mm. Z przyczyn ekonomicznych korzystne jest wykorzystanie konfiguracji z 6 sztuk dysz,

ponieważ rezultaty wydajności całej maszyny pozostają korzystniejsze w stosunku do aktualnej konstrukcji dysz nukleacyjnych. Parametry pracy urządzenia z wykorzystaniem 4 kW kompresora i 8 dysz z otworem 1,4 mm wykazują spadek parametrów produkcji śniegu. Wynikać to może z większej temperatury pracy tego kompresora i dostarczania powietrza o wyższej temperaturze do procesu nukleacji.

PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych prac badawczych dotyczących dysz atomizujących oraz alternatywnej metody na atomizację, stwierdzono, że istnieje potencjał w zastosowaniu dysz atomizujących zaprojektowanych przez SUPERSNOW w armatkach śnieżnych SUPERSNOW. Przy wykorzystaniu parametrów zasilania dyszy atomizującej jakie dostępne są w armatce podczas pracy możliwe jest osiągnięcie lepszych parametrów rozpylania z dysz. Z powodu słabego okresu zimowego w sezonie 2019/2020 (średnia temperatura za okres zimowy od listopada do końca marca to $+1,42^{\circ}\text{C}$ wg danych IMGW) nie zawsze możliwe było wykonanie pełnego spectrum pomiarów. Dla kompletu danych i właściwego potwierdzenia sprawności danego rozwiązania konieczna jest weryfikacja parametrów w warunkach marginalnych (mroz $-1, -2^{\circ}\text{C}$), pośrednich ($-5, -7^{\circ}\text{C}$) i dużych mrozów (poniżej -10°C). Dla ostatecznej weryfikacji konieczne byłyby dodatkowe badania w warunkach pracy armatki wyposażonej w nowe rozwiązanie w sezonie zimowym.

Artykuł opracowano w ramach projektu nr: POIR.01.01.01-00-0522/19-00

LITERATURA

- Dong, P., Chen, Q., Liu, G., Zhang, B., Yan, G., Wang, R. Effects of geometric parameters on flow and atomization characteristics of swirl nozzles for artificial snowmaking. International Journal of Refrigeration. 2023, 154, pp. 56-65, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2023.07.015
- Liu, J., Zhang, X-Q., Li, Q-L., Wang, Z-G. Effect of geometric parameters on the spray cone angle in the pressure swirl injector. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. 2012, 227, pp. 342-353, doi:10.1177/0954410011432233
- SUPERSNOW, <https://www.SUPERSNOW.pl/> (dostęp: 22.09.2025)
- Wang, R., Zhang, B., Xu, R., Xing, M., Zhang, H., Zhang, H., Yan, G., Wu, H. Sensitivity of atomization characteristic to operation conditions for air-assisted atomizers in snow-makers. International Journal of Refrigeration. 2023, 149, pp. 146-154, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2022.12.016
- Yang, X., Wu, H., Wang, R., Yu, F., Xu, R. Experimental study on the effect of nozzle configurations on snow quality for outdoor snow-makers. Physics of Fluids. 2024, 36, 127125, doi 10.1063/5.0242294
- Zhang, B., Wang, R., Wu, H., Dong, P., Xu, R., Xing, M., Zhang, H., Cui, Z., Yan, G., Zhang, H. Atomization characteristics of twin nozzles for outdoor snow-makers application. International Journal of Refrigeration. 2022, 139, pp. 60-69, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2022.03.025.

Zhao, W.; Li, Z.; Zhang, H.; Su, M.; Liu, Z.; Chen, P.; Han, Y. An Experimental Investigation on the Size Distribution of Snow Particles during Artificial Snow Making. *Energies*. 2023, 16, 7276, doi: 10.3390/en16217276

Improving the efficiency of the nucleation process in snowmakers thanks to the use of innovative atomizing nozzle designs

Abstract: Outdoor snowmaking equipment for ski slopes requires continuous technological improvement and the development of more efficient design solutions. Therefore, this article presents a new design of the SUPERSNOW atomizing nozzle. Particular attention is paid to the fundamental criteria that determine the selection of a new design solution. Laboratory tests measured the external and internal nucleation of standard nozzles and the new SUPERSNOW 2020 nozzle design. Snow density measurements were determined and the snow production coefficient was calculated. To determine the potential for reducing electrical energy consumption for the nucleation process, studies were conducted on changing the method of generating water droplet particles. An important stage of the laboratory research was determining the spray parameters of the new nucleation nozzle design, which was analyzed for several configurations. Based on the laboratory test results, the droplet measurements of the existing SUPERSNOW atomizing nozzle were compared with the new atomizer design, and the best nozzle was selected. The new atomizing nozzle design was tested under snowmakers operating conditions. Snow quality measurement results using the new nucleating nozzle design, combined with piston compressors of varying power, indicate improved snow production parameters.

Keywords: snowmakers; atomizing nozzles; nucleation; snow production

Robert Moczarny

SUPERSNOW S.A.

Ks. Antoniego Siudy 11

34-436 Maniowy, Poland

Dariusz Kaczor

SUPERSNOW S.A.

Ks. Antoniego Siudy 11

34-436 Maniowy, Poland

Tomasz Rokita

AGH University of Krakow

Faculty of Mechanical Engineering and Robotics

Department of Machinery Engineering and Transport

A. Mickiewicza Av. 30, 30-059 Krakow, Poland

e-mail: rokitom@agh.edu.pl