

Ocena wpływu parametrów geometrycznych rozpylających dysz wodnych w procesie wytwarzania sztucznego śniegu

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

2025, volume 14, issue 1, pp. 115-127

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

Tomasz Rokita
AGH w Krakowie, Poland



Streszczenie: Naśnieżanie stoków narciarskich wymaga ciągłego udoskonalania elementów konstrukcyjnych armatek śnieżnych tak aby dostosować się do zmieniających się warunków klimatycznych. Mając na uwadze powszechność sportów zimowych, w artykule zaprezentowano nową konstrukcję dysz wodnych firmy SUPERSNOW, która cechowała się innowacyjnym rozwiązaniem. W badaniach laboratoryjnych dysz wodnych skupiono się na określeniu wydajności dla różnych ciśnień, odpowiednio: 20 bar, 30 bar, 40 bar; kąta rozpylania oraz poziomu emitowanego hałasu dla każdej z dysz. Szczególną uwagę zwrócono na określenie parametrów rozpylacza z krawędzią tnącą z otworem wylotowym ϕ 1,5 mm. Następnie na podstawie wyników badań dokonano wyboru najlepszego wariantu dyszy wodnej, biorąc pod uwagę ciśnienie wody oraz odległość pomiaru. W badaniach przemysłowych w warunkach letnich oraz zimowych zastosowano moduł z wentylatorem szybkoobrotowym. Uzyskane wyniki wydajności armatki śnieżnej zostały przeanalizowane pod kątem możliwej redukcji zużycia energii.

Słowa kluczowe: dysze wodne; armatki śnieżne; rozpylacz; moduł z wentylatorem szybkoobrotowym

WPROWADZENIE

Obecnie bardzo często ze względu na ograniczenia klimatyczne i regionalne, naturalne opady śniegu nie mogą w pełni zaspokoić potrzeb związanych z uprawianiem sportów zimowych (Elsasser i Bürki, Steiger i in., 2020). W związku z tym niezbędne są zabiegi zmierzające do zastosowania technik sztucznego naśnieżania, aby uzupełnić ilość naturalnego śniegu. W przypadku wielu sportów zimowych dobre warunki śniegowe mogą stworzyć bezpieczne środowisko sportowe dla ludzi. Dlatego, aby poprawić jakość sztucznego śniegu w różnych regionach i warunkach meteorologicznych (Damm i in., 2017), konieczne jest zbadanie czynników, które na nią wpływają. Urządzenia do sztucznego naśnieżania są obecnie głównym sprzętem używanym do sztucznego naśnieżania: dysza rozpylająca z wewnętrznym mieszaniem gazu i cieczy, o przepływie dwufazowym, jest głównym elementem urządzeń do naśnieżania. Wykorzystuje ona powietrze pod wysokim ciśnieniem i wodę pod wysokim ciśnieniem do mieszania i rozpylania przed rozpyleniem do otoczenia. Rozpylona para wodna

ulega krystalizacji i przekształca się w śnieg w środowisku o niskiej temperaturze (Wang i in., 2023). Im większa ilość dostarczanej wody, tym większa ilość opadów śniegu wytwarzana przez urządzenia do naśnieżania. Jak widać z procesu działania wytwornic śniegu, powstawanie sztucznego śniegu można podzielić na dwa procesy: atomizację i krystalizację (Dong i in., 2023). Atomizacja to proces rozpylania kropeł wody pod wysokim ciśnieniem do dyszy, zderzających się i mieszających z powietrzem pod wysokim ciśnieniem (Vijay i in., 2015). Gdy struktura dyszy i rodzaj cieczy są stałe, głównym czynnikiem wpływającym na proces atomizacji jest ciśnienie cieczy. Guo i in. (Guo i in., 2002) przeprowadzili eksperymenty atomizacji na dyszy o przepływie dwufazowym i stwierdzili, że dla danego ciśnienia gazu średnica kropli rośnie wraz ze wzrostem ciśnienia cieczy, podczas gdy dla danego ciśnienia cieczy średnica kropli maleje wraz ze wzrostem ciśnienia gazu. Ma i in. (Ma i in., 2015) badali dwie różne formy mieszania rozpylaczy powietrza i stwierdzili, że ciśnienie powietrza wpływa na kąt atomizacji, a także pole prędkości na wylocie dyszy. Krystalizacja to proces, w którym rozpylone krople mieszają się przez dyszę rozpylającą i zamieniają w śnieg w zimnym środowisku. Tworzenie się kryształów śniegu można podzielić na dwa etapy: nukleację i wzrost kryształów, a oba procesy są silnie zależne od temperatury otoczenia. Satyawali i in. (Satyawali i in., 2008) określili, że przewodnictwo cieplne rośnie wraz ze wzrostem wielkości ziarna, szacując przewodnictwo cieplne śniegu przy różnych gradientach temperatury, a wyniki wskazują, że wielkość kryształów śniegu wpływa na jakość tworzenia się śniegu. Oznacza to, że osiągnięcie wysokiej jakości produkcji śniegu można osiągnąć jedynie poprzez kontrolowanie czynników wpływających podczas procesu tworzenia się śniegu. Zhao i in. (Zhao i in., 2019) stwierdzili, że istnieje określony obszar, w którym kropla wymienia ciepło i masę z otaczającym gazem, i że obszar ten będzie się powiększał wraz ze wzrostem promienia kropli i różnicy temperatur. Liu i in. (Liu i in., 2023) badali proces przemiany fazowej chłodzenia i zamrażania przez parowanie pojedynczych kropeł wody jako pierwszy i drugi etap sztucznego naśnieżania. Wyniki pokazały, że maksymalna średnica kropelek wody, która jest dopuszczalna w sztucznym naśnieżaniu, wzrastała wraz ze spadkiem temperatury otoczenia i wilgotności względnej. Cogné i in. (Cogné i in., 2013) opracowali nowy model wymiany ciepła i masy do symulacji procesu zamarzania pojedynczych kropeł i odkryli, że na czas zamarzania wpływała średnica kropli i początkowa temperatura kropli. Mirabedin i Farhadi (Mirabedin i Farhadi, 2017) zastosowali symulacje numeryczne, aby zbadać, czy efekt Mpemby (zjawisko polegające na szybszym zamarzaniu wody cieplejszej od zimniejszej w określonych warunkach) może wystąpić w pojedynczej kropce i stwierdzili, że wyższa temperatura początkowa kropli sprzyja osiągnięciu zamarzania. Ciśnienie powietrza i ciśnienie wody wpływają na proces atomizacji w dyszy, co z kolei wpływa na średnicę rozpylonych kropeł na wylocie dyszy (Prostański, 2017). W przypadku krystalizacji rozpylonych kropeł, temperatura otoczenia wpływa na wielkość kryształków śniegu, wpływając na wymianę ciepła

rozpylonych kropeł. Wraz ze spadkiem temperatury otoczenia, wymiana ciepła między rozpylonymi kroplami a otoczeniem nasila się. Gdy cząsteczki rozpylonych kropeł są duże, do krystalizacji kropeł wymagana jest niższa temperatura otoczenia (Orzechowski i Prywer, 2018). Temperatura ta może być nawet niższa niż „temperatura zamarzania”, co jest określane jako przechłodzenie. W konsekwencji dysza wytwarza różne efekty atomizacji w różnych warunkach pracy. W sztucznym naśnieżaniu jakość formowania się śniegu jest ściśle związana z procesem krystalizacji. Wielkość cząstek śniegu powstałych podczas krystalizacji odgrywa fundamentalną rolę w określaniu jakości formowania się śniegu. Na tej podstawie w niniejszym artykule określono wpływ parametrów geometrycznych rozpylających dysz wodnych w procesie wytwarzania sztucznego śniegu

DYSZE WODNE

Obecnie firma SUPERSNOW (SUPERNOW, 2025) dysponuje dyszami własnej konstrukcji opracowanej we własnym zakresie. Są to dysze zbudowane w oparciu o elementy ceramiczne formowane metodą wtrysku ceramiki i następnie obrabiane poprzez szlifowanie (rysunek 1). Konstrukcja tej dyszy jest autorstwem SUPERSNOW co zostało potwierdzone ochroną patentową przyznaną na poziomie krajowym i międzynarodowym.

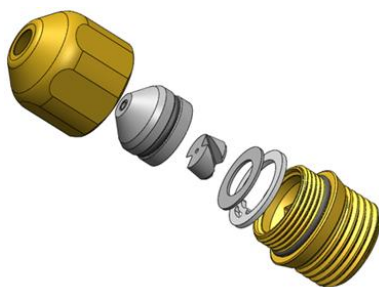


Rys. 1 Dotychczasowa konstrukcja dyszy wodnej SUPERSNOW

Na podstawie doświadczeń posiadają one kilka głównych wad:

- Geometria elementów odpowiedzialnych za tworzenie strumienia rozpylanego nie do końca zgodna z zasadami mechaniki płynów;
- Kłopotliwy montaż;
- Wrażliwość elementów wykonanych z ceramiki na niewłaściwy montaż – elementy ceramiczne pękają przy montażu i czyszczeniu dyszy;
- Problematiczna produkcja elementów ceramicznych z racji geometrii elementów, które nie są technologicznie łatwe w wykonaniu.

W celu ulepszenia istniejącego rozwiązania opracowano nowy model dyszy wodnej (rysunek 2). Główne zmiany jakie zostały wprowadzone w konstrukcji to:



Rys. 2 Model 3D elementów nowej dyszy ceramicznej SUPERSNOW

- Poprawa geometrii dyszy pod kątem parametrów przepływowych;
- Poprawa sposobu montażu dyszy – konstrukcja niweluje problemy przy montażu i serwisowaniu dyszy – jest mniej wrażliwa na niewłaściwy montaż;
- Elementy przewidziane docelowo jako ceramiczne, mają uproszczony kształt pod kątem technologii jaka jest wykorzystywana do tego celu – metoda wtrysku ceramiki;
- Zachowanie kompatybilności montażowej nowej konstrukcji dyszy z dotychczas produkowanymi urządzeniami SUPERSNOW.

W celu określenia poprawności projektu i przeprowadzenia badania jakości rozpylanego strumienia wody wykonano prototypowe elementy nowej dyszy w technologii wydruku 3D z proszku metalu – stali nierdzewnej. Pozostałe elementy dyszy zostały wykonane w rodzimym zakładzie z mosiądzu. Wykonano elementy w kilku wariantach dla sprawdzenia kilku konfiguracji dyszy podczas pracy. Elementy różniły się m.in. ilością kanałów zawirowujących, kątem kanałów zawirowacza. Pozwoliło to na przygotowanie 20 sztuk konfiguracji dyszy wodnej poprzez różny montaż elementów, dla potrzeb realizacji badań. Po otrzymaniu prototypowych wydruków 3D (rysunek 3a, 3b) okazało się, że ich jakość eliminuje je z jakichkolwiek badań.



a)

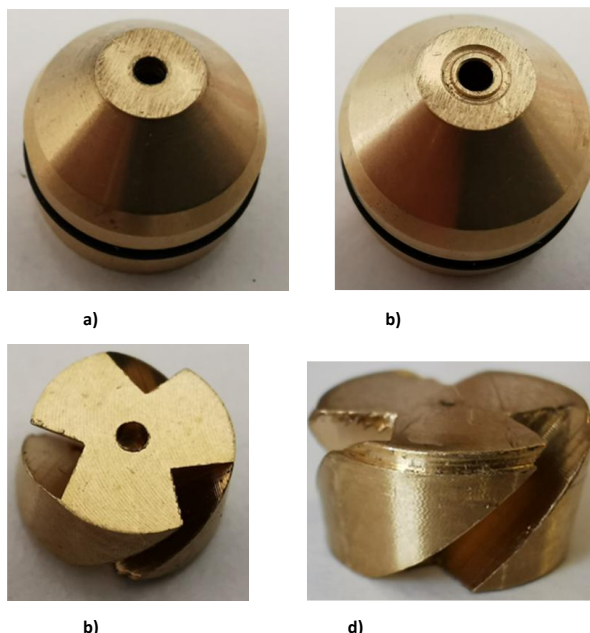


b)

Rys. 3 Wydruk 3D: a) wkładka zawirowująca; b) wkładka rozpylająca

Deklarowana przez dostawcę jakość powierzchni na poziomie Ra5 znacznie odbiegała od tej klasy chropowatości. Konieczne okazało się wykonanie elementów konwencjonalnymi metodami obróbki. Widoczne wady powodują brak możliwości montażu dyszy zgodnie z projektem.

W związku z powyższym elementy wykonano za pomocą technologii obróbki ubytkowej (rysunek 4a-4d) wymagającej zwiększonego nakładu finansowego ale zapewniającej dokładność wykonania na oczekiwanym poziomie, na podstawie opracowanej dokumentacji płaskiej dla elementów.



Rys. 4 Elementy dyszy SUPERSNOW wykonane metodą obróbki ubytkowej:
a) rozpylacz dyszy bez krawędzi tnącej; b) rozpylacz dyszy z krawędzią tnącą;
c) zawirowacz dyszy, widok z góry; d) zawirowacz dyszy, widok z boku

Obróbka tego typu nie była brana pod uwagę w pierwszej fazie, z racji konieczności dobrojenia w narzędzia do tak precyzyjnej obróbki. Elementy dyszy – zawirowacze zostały wykonane w zakładzie zewnętrznym dysponującym odpowiednimi narzędziami. Rozpylacze natomiast zrealizowano w rodzimym zakładzie SUPERSNOW. Elementy dysz wykonane konwencjonalnymi metodami obróbki ubytkowej odznaczają się lepszą jakością powierzchni oraz lepszym odwzorowaniem kształtu wg modelu 3D.

BADANIA LABORATORYJNE DYSZ WODNYCH

Elementy wykonane metodą obróbki ubytkowej pozwoliły na wygenerowanie 20 konfiguracji do badań laboratoryjnych. Dysze dla celów oceny poprawności konstrukcji zostały przebadane w firmie SUPERSNOW (rysunek 5a, 5b).



Rys. 5 Badania pojedynczych dysz na stanowisku laboratoryjnym:
a) widok ogólny; b) pomiar kąta rozpylania

Podczas testów zostały mierzone następujące wartości:

- Wydajność dla różnych ciśnień – 20 bar, 30 bar, 40 bar;
- Kąt rozpylania;
- Poziom emitowanego hałasu dla każdej z dysz.

Wyniki badań zestawione przedstawione w tabeli 1 i 2.

Tabela 1 Rozpylacz z krawędzią tnącą z otworem wylotowym ϕ 1,5 mm

	Parametr								
	20 bar			30 bar			40 bar		
	Wydajność [l/min]	Poziom hałasu LAeq1 [db]	Kąt rozpylania [°]	Wydajność [l/min]	Poziom hałasu LAeq1 [db]	Kąt rozpylania [°]	Wydajność [l/min]	Poziom hałasu LAeq1 [db]	Kąt rozpylania [°]
Zawirówacz 2x20°x1,8x1,8+ otwór ϕ 1x1	3,7	72,8	50	4,6	75,1	45	5,3	76,8	45
Zawirówacz 2x30°x1,8x1,8+ otwór ϕ 1x1	3,5	72,8	50	4,3	75	45	5	76,8	45
Zawirówacz 2x45°x1,8x1,8+ otwór ϕ 1x1	3,5	71,7	50	4,3	74,2	50	5	76	45
Zawirówacz 2x45°x1,8x1,8	3,5	72,2	50	4,3	74,6	50	5	76,5	45
Zawirówacz 2x45°x1,8x1,8+ otwór ϕ 1x1+R0,5	3,7	71,7	50	4,5	74,4	45	5,2	76,2	45
Zawirówacz 3x20°x1,5x1,5+ otwór ϕ 1x1	4	73	45	4,9	75,4	40	5,6	77	40
Zawirówacz 3x30°x1,5x1,5+ otwór ϕ 1x1	3,5	72,2	50	4,3	74,6	45	5	76,6	45
Zawirówacz 3x45°x1,5x1,5+ otwór ϕ 1x1	3,7	72,1	50	4,5	74,6	45	5,2	76,3	45
Zawirówacz 3x45°x1,5x1,5	3,7	72,4	50	4,5	74,9	45	5,2	76,5	45
Zawirówacz 3x45°x1,5x1,5+ otwór ϕ 1x1+R0,5	3,8	72,2	45	4,7	74,9	45	5,4	76,9	45

Tabela 2 Rozpylacz bez krawędzi tnącej z otworem wylotowym ϕ 1,5 mm

	Parametr								
	20 bar			30 bar			40 bar		
	Wydajność [l/min]	Poziom hałasu LAeq1 [db]	Kąt rozpylania [°]	Wydajność [l/min]	Poziom hałasu LAeq1 [db]	Kąt rozpylania [°]	Wydajność [l/min]	Poziom hałasu LAeq1 [db]	Kąt rozpylania [°]
Zawirówacz 2x20°x1,8x1,8+ otwór ϕ 1x1	3,7	72,9	45	4,6	75,1	45	5,3	76,9	45
Zawirówacz 2x30°x1,8x1,8+ otwór ϕ 1x1	3,5	73,1	50	4,3	75	50	5	76,7	45
Zawirówacz 2x45°x1,8x1,8+ otwór ϕ 1x1	3,5	71,6	50	4,4	74,2	50	5	76	45
Zawirówacz 2x45°x1,8x1,8	3,6	72,9	50	4,4	75,3	50	5	76,7	45
Zawirówacz 2x45°x1,8x1,8+ otwór ϕ 1x1+R0,5	3,7	71,3	45	4,5	73,7	45	5,2	75,7	45
Zawirówacz 3x20°x1,5x1,5+ otwór ϕ 1x1	3,9	72,9	45	4,8	74,9	45	5,6	76,8	40
Zawirówacz 3x30°x1,5x1,5+ otwór ϕ 1x1	3,6	72,7	50	4,4	75	45	5,1	76,7	45
Zawirówacz 3x45°x1,5x1,5+ otwór ϕ 1x1	3,7	72	50	4,5	74,7	50	5,3	76,6	50
Zawirówacz 3x45°x1,5x1,5	3,7	72,5	50	4,6	75	45	5,2	76,8	45
Zawirówacz 3x45°x1,5x1,5+ otwór ϕ 1x1+R0,5	3,8	72,9	45	4,7	75,2	45	5,4	76,9	42

W kolejnym etapie przeprowadzono badania w instytucie KOMAG na odpowiedniej aparaturze, dla uzyskania precyzyjnych i porównywalnych wyników nt. wielkości kropli. Wyniki pomiarów w instytucie doprowadziły do stworzenia tabel dla określenia najlepszego wariantu dyszy wodnej (tabela 3-6). Jako najkorzystniejszy wariant wytypowany został ten który przy tych samych

Tabela 6 Wybór najlepszego wariantu dyszy wodnej, ciśnienie wody 40 bar, odległość pomiaru 500 mm

Dysza	Ciśnienie wody Pw [bar]	Odległość pomiaru d [mm]	Wydajność wody Qv [l/min]	Dv(10)	Dv(50)	Dv(90)	D[4][3]	D[3][2]	WDV10	WDV50	WDV90	WD43	WD32	suma	Punkty
Dysza jednomediowa – wodna - Konfiguracja „1” (IN 0846+IN 0847)	40	500	5,7	27,56	88,55	177,6	97,03	53,53	0,74	0,41	0,16	0,38	0,63	2,33	0,95
Dysza jednomediowa – wodna - Konfiguracja „2” (IN 0846+IN 0848)	40	500	5,26	32,91	97,11	185,3	104,6	60,1	0,69	0,36	0,12	0,33	0,59	2,09	0,85
Dysza jednomediowa – wodna - Konfiguracja „3” (IN 0846+IN 0849)	40	500	5,24	27,37	88,31	178,6	97,14	53,35	0,75	0,42	0,15	0,38	0,63	2,33	0,95
Dysza jednomediowa – wodna - Konfiguracja „4” (IN 0846+IN 0850)	40	500	5,25	35,94	99,93	190,4	107,9	62,69	0,67	0,34	0,10	0,31	0,57	1,98	0,81
Dysza jednomediowa – wodna - Konfiguracja „5” (IN 0846+IN 0851)	40	500	5,44	79,57	125,7	191,4	130,5	105,6	0,26	0,17	0,09	0,16	0,28	0,96	0,39
Dysza jednomediowa – wodna - Konfiguracja „6” (IN 0846+IN 0852)	40	500	6	65,46	117,1	197,2	124,5	93,3	0,39	0,22	0,06	0,20	0,36	1,24	0,51
Dysza jednomediowa – wodna - Konfiguracja „7” (IN 0846+IN 0853)	40	500	6,32	66,29	118,8	201,2	126,7	94,98	0,38	0,21	0,04	0,19	0,35	1,18	0,48
Dysza jednomediowa – wodna - Konfiguracja „8” (IN 0846+IN 0854)	40	500	5,44	61,39	114,9	196,6	122,3	89,5	0,43	0,24	0,07	0,22	0,39	1,34	0,55
Dysza jednomediowa – wodna - Konfiguracja „9” (IN 0846+IN 0855)	40	500	5,51	60,87	113,3	193,7	120,6	87,94	0,43	0,25	0,08	0,23	0,40	1,39	0,57
Dysza jednomediowa – wodna - Konfiguracja „10” (IN 0846+IN 0856)	40	500	5,68	54,1	110,2	193,9	117,6	79,06	0,50	0,27	0,08	0,25	0,46	1,55	0,63
Dysza jednomediowa – wodna - Konfiguracja „11” (IN 0845+IN 0847)	40	500	5,64	65,25	117,5	198,2	124,9	92,81	0,39	0,22	0,06	0,20	0,36	1,24	0,50
Dysza jednomediowa – wodna - Konfiguracja „12” (IN 0845+IN 0848)	40	500	5,22	66,51	119	201,2	126,8	94,37	0,38	0,21	0,04	0,19	0,35	1,18	0,48
Dysza jednomediowa – wodna - Konfiguracja „13” (IN 0845+IN 0849)	40	500	5,17	78,45	128,1	200,3	133,7	105,7	0,27	0,15	0,05	0,14	0,28	0,89	0,36
Dysza jednomediowa – wodna - Konfiguracja „14” (IN 0845+IN 0850)	40	500	5,2	67,57	121,8	207	129,9	96,63	0,37	0,19	0,02	0,17	0,34	1,09	0,44
Dysza jednomediowa – wodna - Konfiguracja „15” (IN 0845+IN 0851)	40	500	5,37	54,96	111,2	195,9	118,8	79,42	0,49	0,26	0,07	0,24	0,46	1,52	0,62
Dysza jednomediowa – wodna - Konfiguracja „16” (IN 0845+IN 0852)	40	500	5,37	54,96	111,2	195,9	118,8	79,42	0,49	0,26	0,07	0,24	0,46	1,52	0,62
Dysza jednomediowa – wodna - Konfiguracja „17” (IN 0845+IN 0853)	40	500	5,27	28,42	83,2	164,9	91,21	53,04	0,74	0,45	0,22	0,42	0,64	2,45	1,00
Dysza jednomediowa – wodna - Konfiguracja „18” (IN 0845+IN 0854)	40	500	5,4	27,86	90,92	179,4	98,83	53,8	0,74	0,40	0,15	0,37	0,63	2,29	0,93
Dysza jednomediowa – wodna - Konfiguracja „19” (IN 0845+IN 0855)	40	500	5,46	25,54	86,21	175,1	94,77	51,36	0,76	0,43	0,17	0,39	0,65	2,40	0,98
Dysza jednomediowa – wodna - Konfiguracja „20” (IN 0845+IN 0856)	40	500	5,69	83,57	127,4	187,8	131,1	106,9	0,22	0,16	0,11	0,16	0,27	0,92	0,37
Dysza jednomediowa – wodna: DW SN ϕ 1,5	40	500	5,95	107,6	151	210,6	156,1	146	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Dla realizacji właściwego porównania parametrów pracy dysz, jednocześnie z nową konstrukcją dysz pomiarom poddane zostały dotychczasowe dysze SUPERSNOW 1,5 mm. Wyniki pomiarów dla dyszy 1,5 mm zestawione zostały w ostatnim wierszu każdej z powyższych tabeli. Na podstawie tabel zestawiono wyniki dla poszczególnych konfiguracji w tabeli 7.

Tabela 7 Zestawienie wyników dla nowej konstrukcji i konfiguracji dysz

Dysza	Suma punktów	OCENA
Dysza jednomediowa – wodna – Konfiguracja „1” (IN 0846+IN 0847)	3,32	0,896
Dysza jednomediowa – wodna – Konfiguracja „2” (IN 0846+IN 0848)	3,24	0,872
Dysza jednomediowa – wodna – Konfiguracja „3” (IN 0846+IN 0849)	3,25	0,877
Dysza jednomediowa – wodna – Konfiguracja „4” (IN 0846+IN 0850)	2,93	0,791
Dysza jednomediowa – wodna – Konfiguracja „5” (IN 0846+IN 0851)	1,40	0,378
Dysza jednomediowa – wodna – Konfiguracja „6” (IN 0846+IN 0852)	2,27	0,613
Dysza jednomediowa – wodna – Konfiguracja „7” (IN 0846+IN 0853)	2,01	0,541
Dysza jednomediowa – wodna – Konfiguracja „8” (IN 0846+IN 0854)	1,78	0,479
Dysza jednomediowa – wodna – Konfiguracja „9” (IN 0846+IN 0855)	2,30	0,621
Dysza jednomediowa – wodna – Konfiguracja „10” (IN 0846+IN 0856)	2,05	0,554
Dysza jednomediowa – wodna – Konfiguracja „11” (IN 0845+IN 0847)	2,08	0,562
Dysza jednomediowa – wodna – Konfiguracja „12” (IN 0845+IN 0848)	2,28	0,614
Dysza jednomediowa – wodna – Konfiguracja „13” (IN 0845+IN 0849)	1,88	0,508
Dysza jednomediowa – wodna – Konfiguracja „14” (IN 0845+IN 0850)	2,14	0,577
Dysza jednomediowa – wodna – Konfiguracja „15” (IN 0845+IN 0851)	3,22	0,867
Dysza jednomediowa – wodna – Konfiguracja „16” (IN 0845+IN 0852)	2,91	0,784
Dysza jednomediowa – wodna – Konfiguracja „17” (IN 0845+IN 0853)	3,71	1,000
Dysza jednomediowa – wodna – Konfiguracja „18” (IN 0845+IN 0854)	3,57	0,962
Dysza jednomediowa – wodna – Konfiguracja „19” (IN 0845+IN 0855)	3,55	0,958
Dysza jednomediowa – wodna – Konfiguracja „20” (IN 0845+IN 0856)	2,26	0,610
Dysza jednomediowa – wodna: DW SN ϕ 1,5	0,41	0,111

BADANIA WYDAJNOŚCI DYSZ WODNYCH W WARUNKACH PRACY ARMATKI ŚNIEŻNEJ

W pierwszym etapie badania przemysłowe z nową konstrukcją dyszy wodnej wykonano w okresie letnim w sierpniu. W badaniach zastosowano układ z wentylatorem szybkoobrotowym (EDF). Elementy układu zostały poddane

pracom badawczym na zabudowanym module z uwzględnieniem poniższych kwestii:

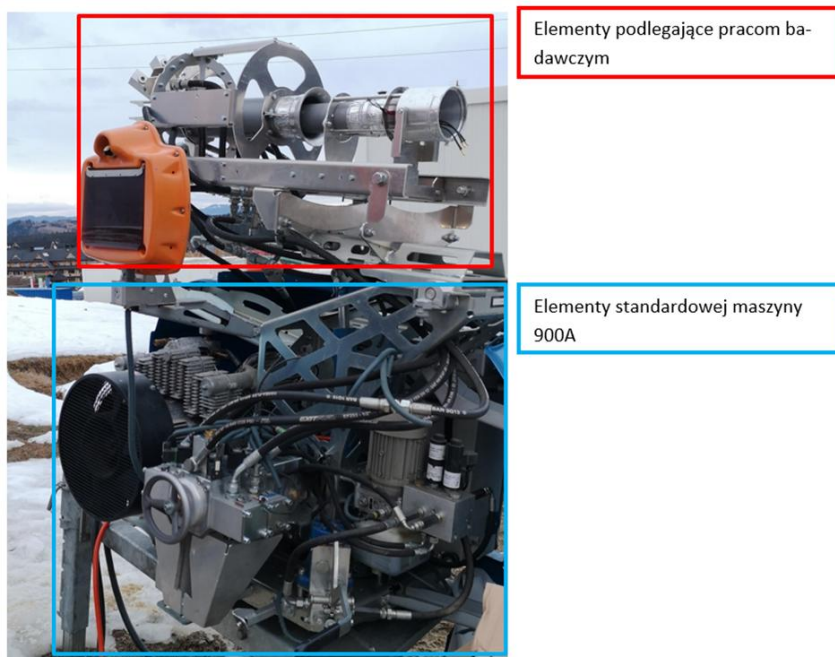
- kształt i zasięg wyrzucanej strugi wodno-powietrznej z modułu;
- produkcje śniegu w różnych warunkach pogodowych;
- Wytrzymałość układu na zimowe warunki eksploatacji.

Na podstawie wyników badań wysunięto następujące wnioski dotyczące pracy pojedynczego modułu:

- Wysoki hałas – ze względu na wysokie częstotliwości pochodzące od wysokich obrotów wentylatora hałas nawet z odległości kilkunastu metrów jest „nieprzyjemny” dla ucha;
- Przy próbach rozpylania wody pojedynczy moduł wykazywał niski zasięg w porównaniu z konwencjonalnymi armatkami. Zasięg wynosił około 15-20 m, natomiast dla konwencjonalnych armatek ten zasięg jest w granicach 40-60 m, tak niski zasięg może wpływać na mocny spadek wydajności urządzenia – tracimy czas opadania kropelek wody zanim skryształizują w całej swej objętości;
- Układ podczas prób narażony był na lekkie podmuchy wiatru bocznego (rzędu 2-3 m/s) wpływ bocznego wiatru negatywnie wpływał zarówno na zasięg jak i na strukturę strugi, która była rozdmuchiwana w różnych kierunkach – niekoniecznie tam gdzie skierowany był wyrzut z modułu. Może to powodować spadek jakości produkcji śniegu;
- Podczas badań przy różnych zakresach ciśnień układ wykazywał słabe możliwości rozbijania kropel dla ciśnień powyżej 20 bar. Osie dysz wodnych skierowane są do wewnątrz strumienia powietrza – jak w konwencjonalnej armatce śnieżnej, co powoduje kumulację wody w osi przepływu powietrza. Wentylator ma za zadanie ponownie rozbić skupiony strumień wody i wyrzucić ją na optymalną odległość. Słabe rozbijanie wody przy wyższych ciśnieniach zasilania modułu wodą pod ciśnieniem powyżej 20 bar, powoduje to że ze względu na duże skupienie wody w jednym punkcie krople w strumieniu łączą się w większe i potrzebują więcej czasu na zamarzanie. Doprowadzić to może do produkcji mokrego śniegu – przypadek niekorzystny w użytkowaniu. Rozpylanie dysz w kierunku skupionym wynika z charakterystyki dysz (pustostozkowe) i ewentualne próby ustawienia osi dysz bardziej równoległe do strumienia (mniej skupiony wyrzut wody) powodowałoby skutek rozrzucania wody na zewnątrz poza strugę wentylatora, co jest zjawiskiem niekorzystnym – tak rozrzucona woda bardzo szybko opadałaby na grunt bez krystalizacji.

W drugim etapie badań (sezon zimowy 2020/2021) w naturalnych warunkach pracy maszyny, pojedynczy moduł został zabudowany w oparciu o ramę maszyny 900A oferowanej przez SUPERSNOW (rysunek 6). Praca układu weryfikowana została w różnych warunkach – zarówno temperatur marginalnych rzędu -1,5

TWB oraz warunkach optymalnych dla pracy konwencjonalnych armatek śnieżnych, rzędu -8 do -10°C.



Rys. 6 Pojedynczy moduł zabudowany w oparciu o ramę maszyny 900A

Wyniki badań uzyskanych przez moduł z wentylatorem szybkoobrotowym, przedstawiono w tabeli 8.

Tabela 8 Zestawienie wyników uzyskanych przez moduł z wentylatorem szybkoobrotowym

Dane dla nowo projektowanego urządzenia zbudowanego w oparciu o kilka modułów									Armata 700ASE - model który przewidywany był do zamiany przez nowy projekt urządzenia	Wyniki porównania 700A SE i modułu			
L.p.	TWB [st. C]	TW [st. C]	Ciśnienie wody [bar]	Ilość dysz pracujących na module [szt.]	Wydajność [l/min]	Jakość śniegu wg skali SU-PERSNOW	Jakość śniegu wyrażona w gramach na litr śniegu [g/l]	Zakładana docelowa ilość modułów wentylatorowych [szt.]	Wydajność teoretyczna przy zastosowaniu 4 modułów [l/min]	Wydajność standardowego modelu armatki [l/min]	Różnica w wydajności [l/min]	Różnica %	Uwagi
1	-4,5	4	24	3	12,32		4	420	49,26	110	-60,74	-55,21%	
2	-4,5	4	24	6	24,63	brak produkcji śniegu		870	98,53	193,2	-94,67	-49,00%	dla maszyny 700A SE przyjętą wydajność dla jakości 7 = 870g/l
3	-10	4,7	24	23	94,42	brak produkcji śniegu		870	377,69	374,5	3,19	0,85%	dla maszyny 700A SE przyjętą wydajność dla jakości 7 = 870g/l
4	-10,9	4,7	23	11	44,21		6	740	176,83	324,5	-147,67	-45,51%	
5	-2	3,5	24	3	12,32		6	740	49,26	74,65	-25,39	-34,01%	
6	-2,5	3	24	3	12,32		6	740	49,26	97,42	-48,16	-49,43%	
7	-6	2	24	11	45,16		5	526	180,64	184,15	-3,51	-1,91%	
8	-7	2,5	24	11	45,16		5	526	180,64	205,34	-24,70	-12,03%	
9	-13	1,5	24	24	98,53		7	870	394,11	571,94	-177,83	-31,09%	
10	-12	1,5	24	24	98,53		7	870	394,11	530,73	-136,62	-25,74%	

Pojedynczy układ wentylatorowy w warunkach pracy 1,5 TWB nie był w stanie wyprodukować kryształków śniegu. Gramatura śniegu posiadała skalę odwrotną tzn. wartość wyższa gramatury oznacza gorszą jakość śniegu (bardziej mokry) natomiast niższa gramatura lepszą jakość śniegu (śnieg suchy).

Dodatkowo podczas testów w warunkach zimowych stwierdzono kilka krytycznych aspektów:

- Wysoką wrażliwość izolacji na przetarcia i uszkodzenia. Przez przewody zasilające silnik EDF płyną wysokie prądy (od 60 do 125A) co stwarza wysokie ryzyko porażenia prądem oraz ryzyko zwarcia instalacji w przypadku pracy ciągłej układu ze zwielokrotnionymi wentylatorami EDF;
- Awarię łożyskowania silnika wentylatora na badawczym układzie. Po około kilkudziesięciu godzinach pracy wentylator zaczął hałasować podczas pracy. Po zatrzymaniu wentylatora stwierdzono uszkodzenie silnika. Nie możliwe okazało się uruchomienie ponownie silnika do dalszych testów. Do uszkodzenia mogło się przyczynić niewyważenie wywołane osadzaniem się pewnej ilości lodu na piaście wentylatora;
- W warunkach marginalnych pojedynczy moduł nie był w stanie wyprodukować śniegu, w których konwencjonalna maszyna jest w stanie wygenerować zarodki krystalizacji i produkować śnieg;
- Zalodzenia, w niektórych miejscach układu wentylatorowego. Zalodzenie nawet w przypadku zastosowania czerpni powietrza w innym miejscu może nie eliminować takich małych ilości lodu na elementach wentylatora, które w konsekwencji mogą doprowadzać do uszkodzeń łożyskowania i łopatek wentylatora co przy obrotach rzędu kilkudziesięciu tysięcy obrotów może niszczyć elementy układu wentylatora.

Zarówno słabe parametry, oraz usterki, które wyniknęły podczas badań zostały uznane za krytyczne. Natomiast korzyści z wykorzystania wentylatorów EDF tj. modułowość, przewidywane obniżenie zużycia energii dla wyrzutu strugi wodnej, nie są w stanie zrekompensować wad tego rozwiązania, którymi są krótka żywotność i problemy eksploatacyjne związane z układem zasilania wentylatora.

PODSUMOWANIE

Na podstawie badań laboratoryjnych, uzyskano następujące wnioski:

- Nie stwierdzono pozytywnego wpływu krawędzi tnącej na parametry strugi wylotowej z dyszy. Stosowanie krawędzi tnącej w postaci rowka pierścieniowego wokół otworu wylotowego dyszy miało za zadanie poprawić kształt strumienia wody poprzez odrywanie powietrza zasysanego w okolice wylotu dyszy ze względu na różnicę ciśnień generowaną przez wyrzut cieczy pod dużą prędkością. Podczas prób nie stwierdzono znaczącego wpływu obecności tego rowka na pracę dyszy;
- Dysza SUPERSNOW 1,5 mm stosowana dotychczas w armatkach SUPERSNOW, przy pomiarach w Instytucie KOMAG wykazuje znacznie gorsze parametry kropel;
- Spośród wszystkich konfiguracji najlepszy wynik uzyskuje dysza w konfiguracji nr 17.

Analizując wyniki badań przemysłowych przy zachowaniu zakładanej redukcji zużycia energii na dostarczenie odpowiedniej ilości energii do wyrzutu strugi wodnej (4 moduły po 2,5 kW = 10 kW) osiągnięta wydajność potencjalnej maszyny jest średnio znacznie niższa od konwencjonalnej maszyny naśnieżającej

z dużym wentylatorem. W najgorszym przypadku ponad 50% poniżej parametrów standardowej armatki śnieżnej. Uzysk z energii (około 10%) nie rekompensuje takiej straty w wydajności produkcji śniegu. Dla wyprodukowania tej samej ilości śniegu w obrębie jednego ośrodka nowa konstrukcja wymagałaby zwiększenia ilości maszyn co rozmija się z celem projektu zakładającym redukcję energii elektrycznej poświęconej na produkcję śniegu i z zyskiem ekonomicznym dla klientów jak i firmy przy sprzedaży tego typu urządzeń.

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

LITERATURA

- Cogné, C.; Nguyen, P.U.; Lanoisellé, J.L.; Van Hecke, E.; Clausse, D. Modeling Heat and Mass Transfer during Vacuum Freezing of Puree Droplet. *Int. J. Refrig.* 2013, 36, pp. 1319-1326.
- Damm, A.; Greuell, W.; Landgren, O.; Prettenhaler, F. Impacts of +2°C Global Warming on Winter Tourism Demand in Europe. *Clim. Serv.* 2017, 7, pp. 31-46.
- 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. *Int. J. Refrig.* 2023, 154, pp. 56-65.
- Elsasser, H.; Bürki, R. Climate Change as a Threat to Tourism in the Alps. *Clim. Res.* 2002, 20, pp. 253-257.
- Guo, L.-J.; Li, G.-J.; Chen, B.; Chen, X.-J.; Papailiou, D.D.; Panidis, T. Study on Gas-Liquid Two-Phase Spraying Characteristics of Nozzles for the Humidification of Smoke. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2002, 26, pp. 715-722.
- Liu, B.; Hu, H.; Bi, L.; Theodorakis, P.E. Analysis of the Characteristics of the Gas-Liquid Mixed Artificial Snow-Making. *Int. J. Refrig.* 2023, 149, pp. 155-167.
- Ma, R.; Dong, B.; Yu, Z.; Zhang, T.; Wang, Y.; Li, W. An Experimental Study on the Spray Characteristics of the Air-Blast Atomizer. *Appl. Therm. Eng.* 2015, 88, pp. 149-156.
- Mirabedin, S.M.; Farhadi, F. Enquête Numérique Portant Sur La Solidification de Gouttelettes Uniques Avec et sans Mécanisme d'évaporation. *Int. J. Refrig.* 2017, 73, pp. 219-225.
- Orzechowski, Z., Prywer, J. Wytwarzanie i zastosowanie rozpylonej cieczy. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa, 2018.
- Prostański, D. Zraszanie powietrzno-wodne jako metoda ograniczenia zagrożenia zapłonem metanu i wybuchem pyłu węglowego oraz redukcji zapylenia powietrza. *Prace Naukowe – Monografie nr 51. Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice* 2017.
- Satyawali, P.K.; Singh, A.K.; Dewali, S.K.; Kumar, P.; Kumar, V. Time Dependence of Snow Microstructure and Associated Effective Thermal Conductivity. *Ann. Glaciol.* 2008, 49, pp. 43-50.
- Steiger, R.; Posch, E.; Tappeiner, G.; Walde, J. The Impact of Climate Change on Demand of Ski Tourism – A Simulation Study Based on Stated Preferences. *Ecol. Econ.* 2020, 170, 106589.
- SUPERSNOW, <https://www.SUPERSNOW.pl/> (dostęp: 23.09.2025)
- Vijay, G.A.; Moorthi, N.S.V.; Manivannan, A. Internal and External Flow Characteristics of Swirl Atomizers: A Review. *At. Sprays* 2015, 25, pp. 153-188.
- 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. *Int. J. Refrig.* 2023, 149, pp. 146-154.
- Zhao, F.; Liu, Q.; Zhao, C.; Bo, H. Influence Region Theory of the Evaporating Droplet. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2019, 129, pp. 827-841.

Assessment of the influence of geometric parameters of water spray nozzles in the process of artificial snow production

Abstract: Snowmaking on ski slopes requires continuous improvement of snowmakers design elements to adapt to changing climatic conditions. Given the widespread use of winter sports, this article presents a new design of SUPERSNOW water nozzles, featuring an innovative solution. Laboratory tests of the water nozzles focused on determining performance at various pressures: 20 bar, 30 bar, and 40 bar, the spray angle, and the noise level for each nozzle. Particular attention was paid to determining the parameters of the cutting-edge nozzle with an outlet opening of ϕ 1.5 mm. Based on the test results, the best water nozzle variant was then selected, taking into account water pressure and measurement distance. A module with a high-speed fan was used in industrial tests in both summer and winter conditions. The obtained snowmaker performance results were analyzed for possible reductions in energy consumption.

Keywords: water nozzles; snowmakers; sprayer; high-speed fan module

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