

Р.А.Баханова, Б.Н.Лєсков

НАТУРНІ ВИПРОБУВАННЯ НОВОГО ХОЛОДОРЕАГЕНТУ ДЛЯ ВПЛИВУ НА ПЕРЕОХОЛОДЖЕНІ ХМАРИ

Наведено результати натурних випробувань технології використання для впливу на переохолоджені хмари нових холодоагентів – пористих гранул аеросилу та деревного вугілля, просякнутих рідким азотом. Показана більша ефективність їх дії порівняно з гранулами твердого CO_2 .

Вступ

У практиці активного впливу на переохолоджені крапельні хмари використовують два основних класи реагентів: а) холодоагенти – тіла, охолоджені до температури, що нижча за -40°C ; б) аерозолі з речовин, кристалічна структура яких ізоморфна структурі кристалів льоду.

Класичним холодоагентом, який давно широко використовується для засіву переохолоджених хмар, є діоксид вуглецю CO_2 у твердому стані (сухий лід). Технологія застосування гранул CO_2 широко відома [5]. Автоматичний пристрій для гранулювання та дозованого скидання гранул CO_2 у хмари з літака описано у праці [3]. Спеціальні дослідження показали, що гомогенну нуклеацію льоду в переохолодженій хмарі може викликати будь-яке охолоджене до необхідної температури тіло.

У 1980-тих роках лабораторією аерозолів УкрНДГМІ у співпраці з Інститутом хімії поверхні (ІХП) Національної академії наук України були розроблені і виготовлені пористі гранули з аеросилу та деревного вугілля, які змочували рідким азотом. Експерименти з цими гранулами, проведені у камері туману УкрНДГМІ та в аеродинамічній трубі Інституту експериментальної метеорології [1, 2], показали можливість їх використання як холодоагентів. За даними лабораторних експериментів були розроблені технічні умови для виготовлення дослідних партій гранул з аеросилу та деревного вугілля.

Згідно з технічними умовами основні характеристики гранул такі:

- густина – $0,4 \pm 0,1 \text{ г/см}^3$;
- діаметр (середній) – $1,5 \div 2,0 \text{ см}$;

Наук. праці УкрНДГМІ. -2002. -Вип. 250

- маса азоту, яку утримує гранула – 1,3 г/г;
- вихідний матеріал – пресований аеросил, або деревне вугілля.

Обидва матеріали гідрофобізовані триметилхлорсиланом.

Крім того, до реагенту ставились додаткові вимоги. Пористі гранули повинні бути досить міцними, після просякнення рідким азотом не кришитися, не перетиратися під час транспортування та при їх викиданні дозуючими пристроями. Під час зберігання вони повинні не злежуватися, не набирати вологи і бути пожежо- та вибухобезпечними.

Згідно з зазначеними вище технічними умовами на дослідному виробництві ІХП було виготовлено дві партії гранул: з аеросилу та деревного вугілля, які були використані в натурних експериментах. Виявилося, що запропоновані реагенти у кілька разів дешевші за твердий CO_2 , а методика їх застосування більш технологічна.

Результати натурних випробувань нового холодореагенту

Випробування проводили на переохолоджених шаруватих хмарах, на яких чітко реєструються зони кристалізації, заподіяні реагентом. Випробування проводили зимою на Експериментальному метеорологічному полігоні УкрНДГМІ у Дніпропетровській області. Експерименти виконували, використовуючи літаки-лабораторії ІЛ-14, що були доукомплектовані спеціальними дозаторами реагенту та пристроями для зберігання та перекачування рідкого азоту на борту літака.

Значна увага приділялася вибору метеорологічної ситуації. Хмари повинні бути шаруватими, крапельними за фазовим станом, мати рівну верхню межу, температуру рівня введення реагенту нижчу за -3°C . Для спрощення спостережень за результатами дії реагенту бажано, щоб вище верхньої межі хмар було ясно.

Важливе значення має вибір схеми експерименту. Прокладали дві лінії засіву хмар, іноді три. По одній лінії використоували досліджуваний реагент, по другій (на відстані 5-8 км) контрольний (гранули діоксиду вуглецю). Реагенти вводили з рівня верхньої межі хмар. В окремих випадках засів хмар виконували на 100–800 м вище їх верхньої межі. Лінії засіву прокладались у напрямку сонця. Після засіву літак піднімався на 300-500 м вище верхньої межі хмар і проводилися спостереження за динамікою розвитку зон. Ширина зон кристалізації визначалась у кожному прольоті з точністю близько 70 м.

Засівали хмари різних форм. Їх товщина коливалась у межах від 0,11 до 0,60 км, температура верхньої межі змінювалася від мінус 2,8 до мінус

15,5°C. Швидкість вітру на рівні хмар знаходилася в межах 6–20 м/с, водність хмар – 0,02-0,32 г/м³, водозапас – 3–62 г/м² (табл.1).

Таблиця 1

Метеорологічні параметри хмар, що засівали холодореагентами*

№	Вид хмар	H _{вм} , км	ΔH, км	T _{вм} , град	T _{ср} , град	W, г/м ³	q, г/м ²
1	St	0,72	0,29	- 9,6	- 10,9	0,06	17
2	Sc	0,91	0,60	- 6,0	- 7,1	0,14	62
3	St	0,61	-	- 8,0	-	-	-
4	Ac cuf	2,31	0,17	- 13,7	- 13,9	-	-
5	Ac trans	2,20	0,20	- 7,0	- 7,0	-	-
6	Ci Sp	6,45	0,60	- 25,0	- 25,0	-	-
7	Sc trans	1,15	0,11	- 15,5	- 15,5	0,03	3
8	Sc cuf	1,51	0,16	- 15,0	- 11,0	0,20	32
9	Ac trans	2,49	0,17	- 3,8	- 3,6	0,07	11
10	St	0,40	0,25	- 2,8	- 7,1	0,14	35
11	St	0,56	0,18	- 7,7	- 7,4	0,32	58
12	Sc	1,30	0,23	- 9,7	- 10,0	0,05	12
13	Sc	1,33	0,24	- 4,6	- 3,8	0,28	54
14	Ac trans	2,28	0,19	- 7,4	- 5,2	0,08	15
15	Sc	1,32	0,24	- 4,6	- 3,8	0,28	54
16	Sc	0,60	0,36	- 6,0	- 5,1	-	-
17	Sc	2,07	0,14	- 8,3	- 7,6	0,06	8
18	Sc	2,07	0,14	- 8,3	- 7,6	0,06	8
19	Ac cuf	2,15	0,31	- 14,0	- 13,7	0,02	6
20	Ac cuf	1,85	0,17	- 12,8	- 12,6	0,04	7
21	Ac	2,09	0,15	- 13,7	- 13,1	0,04	6
22	Sc	1,12	0,30	- 6,5	- 7,0	-	-
23	Sc	1,02	0,22	- 6,8	- 7,3	-	-
24	Sc	0,98	0,12	- 8,4	- 8,1	-	-
25	Sc	1,49	0,25	- 13,1	- 12,7	-	-
26	Ac cuf	2,78	0,28	- 5,5	- 4,5	-	-
27	Ac trans	2,61	0,11	- 8,1	- 7,9	-	-

* № - порядковий номер експерименту, H_{вм} - висота верхньої межі хмар, ΔH - товщина хмар; T_{вм} і T_{ср} – температура верхньої межі хмар та середня температура хмарного шару, W і q – водність та водозапас хмар

Витрати рідкого азоту (в ПГА та ПГДВ) коливалися від 20 до 500 г/км, гранул CO₂ - від 200 до 1000 г/км. Більшість засівів було проведено з

рівня верхньої межі хмар ($H = 0$), деяка кількість - з висоти 100–800 м вище верхньої межі хмар. Результати експериментів наведені у табл.2.

Таблиця 2

Характеристики зон кристалізації від різних холодореагентів*

№	Реагент	Р, г/км	Н, м	L, км			L _м , км	Т _м , хв
				10 хв	20 хв	30 хв		
1	ПГА	100	0	0,75	1,55	-	2,45	29
	CO ₂	200	0	0,76	1,56	-	1,8	28
2	ПГА	100	10	1,26	1,80	3,60	3,60	30
	CO ₂	200	10	1,55	2,30	-	2,30	18
3	ПГА	80	30	0,45	1,38	2,40	3,60	46
	CO ₂	400	30	0,83	1,46	2,60	3,35	38
4	ПГА	180	100	0,90	1,60	-	1,8	21
	CO ₂	200	100	0,80	-	-	0,90	17
5	ПГА	20	0	0,90	1,93	-	2,25	23
	CO ₂	300	0	1,2	2,08	-	2,86	25
6	ПГА	50	100	1,80	3,20	4,34	4,34	30
	CO ₂	500	100	1,30	3,00	3,40	3,43	33
7	ПГА	50	0	1,20	2,10	2,80	5,74	53
	CO ₂	200	0	1,10	2,50	4,00	5,40	53
8	ПГА	125	0	1,13	4,33	4,94	5,10	33
	CO ₂	400	0	-	-	1,80	3,30	38
9	ПГА	100	0	0,84	1,30	1,52	1,56	25
	CO ₂	400	0	0,75	1,20	1,64	1,68	31
10	ПГА	125	350	0,78	1,40	1,40	2,08	39
	CO ₂	500	350	0,90	1,60	2,20	2,84	45
11	ПГА	125	230	0,66	1,05	1,65	1,65	30
	CO ₂	500	230	0,95	1,55	2,20	2,84	28
12	ПГА	125	500	-	-	-	0,37	6
	CO ₂	500	500	-	-	-	0,82	12
13	ПГА	125	0	0,67	2,17	3,05	3,90	46
	CO ₂	400	0	1,69	4,2	4,16	4,97	27
14	ПГА	110	0	0,78	1,38	1,77	2,02	40
	CO ₂	330	0	0,98	2,00	2,86	3,50	40
15	ПГА	50	0	-	0,83	0,92	0,94	40
	CO ₂	400	0	1,00	1,43	2,00	2,04	26
16	ПГА	140	0	0,86	1,45	1,90	2,63	38
	CO ₂	400	0	0,92	1,70	2,63	2,66	28

Продовження таблиці 2

17	ПГА	140	400	* *	-	-	-	-
	CO ₂	400	400	***	-	-	-	-
18	ПГА	140	500	**	-	-	-	-
	ПГА	140	600	**	-	-	-	-
	ПГА	140	700	**	-	-	-	-
	ПГА	140	800	****	-	-	-	-
19	ПГДВ	320	0	0,72	1,56	2,44	3,64	44
	CO ₂	300	0	0,66	1,30	1,30	1,30	22
20	ПГДВ	300	200	0,80	1,60	2,32	2,64	36
	CO ₂	500	200	0,48	1,06	1,12	1,18	34
21	ПГДВ	300	100	1,23	1,88	2,26	2,27	31
	ПГДВ	300	300	0,98	1,42	1,54	1,60	29
22	ПГДВ	450	0	-	1,28	1,90	1,90	30
	CO ₂	1000	0	0,98	1,84	2,10	2,10	30
23	ПГДВ	450	0	0,60	1,41	1,97	1,97	30
	CO ₂	300	0	0,74	1,35	1,88	1,88	30
24	ПГДВ	450	0	0,94	1,52	2,50	2,73	31
	CO ₂	600	0	0,83	1,92	2,50	2,50	28
25	ПГДВ	450	0	1,23	1,98	-	-	-
	ПГА	400	0	1,23	1,68	-	-	-
	CO ₂	400	0	0,83	1,68	-	-	-
26	ПГДВ	500	50	0,56	0,94	-	-	-
	CO ₂	500	50	0,48	0,80	-	-	-
27	ПГДВ	200	-10	0,50	0,96	1,72	2,56	50
	CO ₂	550	-10	0,60	1,25	2,86	3,16	41
	ПГА	200	-10	0,50	0,84	1,68	2,38	45

* ПГА і ПГДВ - пористі гранули аеросилу та деревного вугілля; CO₂ - гранули твердого діоксиду вуглецю; P – витрати реагенту на 1 км; H – висота засіву над рівнем верхньої межі хмар; L – ширина зони кристалізації через 10, 20, 30 хв після засіву; L_m – максимальна ширина зони; T_m – час після засіву, коли зона досягала максимальної ширини;

** Зона утворилась, розвиток інтенсивний;

*** Зона утворилась із затримкою 10 хв; кристалізація не суцільна: площа зони CO₂ складає приблизно 30% від зони ПГА;

**** Зона кристалізації утворилась із затримкою на 7–10 хв, не суцільна, площа складає 20–30 % від площі зон ПГА, що скидали з висот 500, 600, 700м над верхньою межею хмар.

Дані натурних експериментів підтвердили результати лабораторних досліджень. У всіх випадках спостерігалася кристалізація у хмарах після засіву ПГА чи ПГДВ. У переважній більшості експериментів їх розвиток був інтенсивнішим, ніж зон, отриманих від засіву CO_2 (див. табл.2). Ця тенденція зберігалася навіть у тих експериментах, в яких маса нового холодореагенту була меншою за масу витраченого CO_2 . Однаковий результат впливу досягався при кількості витраченого ПГА та ПГДВ у 4-8 разів меншій, ніж маса скинутого CO_2 . Подібні результати при однакових витратах контрольного та випробовуваного реагентів були отримані тільки у двох випадках.

Перевага нового реагенту полягає ще й в тому, що його можна скидати з досить великої висоти над верхньою межею хмар. Це дає можливість використовувати цей реагент під час групового польоту кількох літаків на різних рівнях. Крім того, відпадає необхідність заходу літака у хмари, що виключає його обмерзання.

Важливий результат було отримано в експериментах №17-18, в яких засів було проведено з досить великих висот (400-800 м над рівнем верхньої межі хмар). Температура на їх верхній межі була мінус $8,3^\circ\text{C}$. В експерименті №17 з рівня 400 м була засіяна одна лінія CO_2 . Кристалізація мала хороший розвиток в експерименті №17 та перших трьох зонах в експерименті №18. В останній, четвертій зоні, отриманій від засіву з висоти 800 м (експеримент №18), розвиток кристалізації був повільнішим, зона не була суцільною.

Отримані дані показали, що пористими гранулами з рідким азотом можна впливати на хмари, скидаючи реагент з досить значних висот. Припускаємо, що збільшення розміру гранул до 3–5 см дасть можливість засівати хмари у гірських районах, де, згідно з правилами безпеки польотів, скидати реагент допускається з висоти 1,0 км над рівнем найвищої вершини гір району польотів.

Цікавий результат отримано в експерименті, у ході якого було засіяно дві лінії ПГА і твердим CO_2 у шарі безхмарної атмосфери на висоті 6450 м. В результаті впливу утворилися дві зони кристалізації, які можна вважати штучними пір'ястими хмарами. Витрати ПГА (50 г/км) були у 10 разів менші, ніж витрати твердого CO_2 (500 г/км). Незважаючи на це, максимальна ширина зони кристалізації, яка утворилася в атмосфері від засіву ПГА, була навіть більшою (4340 м) від максимальної ширини зони від засіву твердого CO_2 (3430 м). “Нижнє” сонце в зоні ПГА було яскравішим, але по центру зона твердого CO_2 виглядала чіткіше і була суцільною. Штучні кристалічні хмари для обох зон мали однакову

товщину – близько 400 м. Таким чином, пористі гранули, просякнуті рідким азотом, як і твердий CO_2 , можуть використовуватися для утворення штучних кристалічних хмар.

Оцінка економічної ефективності застосування нового реагенту показала, що перевагу треба віддати ПГДВ – гідрофобізованому деревному вугіллю, вартість якого набагато менша за вартість пористих гранул, виготовлених з аеросилу. Крім того, технологія виробництва ПГДВ значно простіша. Новий реагент ПГДВ з рідким азотом не токсичний, вибухобезпечний. Його гранули досить міцні, не злежуються і можуть довго зберігатись без зміни. Рідкий азот тривалий час зберігається у дьюарівських посудинах.

Висновки

1. Натурні випробування нових реагентів – пористих гранул аеросилу і деревного вугілля (ПГА і ПГДВ), змочених рідким азотом, показали їх більшу ефективність, порівняно з контрольним реагентом – твердим CO_2 .

2. Однаковий результат впливу у більшості експериментів досягався при витратах рідкого азоту (в гранулах ПГА і ПГДВ) в 2-5 разів менших, ніж контрольного реагенту – CO_2 .

3. Встановлена можливість ефективного впливу на переохолоджені хмари при скиданні на них пористих гранул діаметром 1,5–2,0 см, просякнутих рідким азотом, з висот до 700 м над верхньою межею хмар.

4. Результати натурних випробувань довели доцільність використання нової технології засіву хмар у практиці активних впливів.

* *

Приведены результаты самолётных испытаний нового хладореагента – пористых гранул аэросила и древесного угля, пропитанных жидким азотом, в переохлажденных зимних облаках. Показана более высокая эффективность их действия по сравнению с гранулами твердого CO_2 .

* *

1. Баханова Р.А., Киселев В.И., Головки Л.В. Исследование скорости испарения жидкого азота из пористых гранул // Тр. УкрНИГМИ. – 1986. – Вып.218. – С.89-93.

2. Головки Л.В., Ким Н.С., Шкодкин А.В., Шилин А.Г. Кристаллизация переохлажденного тумана при испарении жидкого азота из пористых носителей // Тр. ИЭМ. –1989. –Вып. 48 (138). –С.65–71.

3. Красновский Б.Л. О конструкции, эксплуатации и путях дальнейшего усовершенствования автоматической дозирующей и гранулирующей установки (АДГ-1) // Сб. Исследование облаков, осадков и грозного электричества. –М.: Изд-во АН СССР. –1961. –С. 318–321.

4. Лесков Б.Н., Половина И.П. О методике проведения опытов и точности измерения зон искусственной кристаллизации // Тр. УкрНИГМИ. –1969. –Вып.82. –С. 84-91.

5. Никандров В.Я. Искусственные воздействия на облака и туманы. - Л.: Гидрометеиздат. -1959. -192 с.

6. Vlasiuk M.P., Khaikine M.N., Koloskov B.P. et al. Some results of intended fog dispersion at the Motorway Venice-Trieste (Italy) // Proceed. of 7-th WMO scientific conference on weather modification,- Chiang Mai, Thailand. –1999. -P.323-326.