

1.6.18
УДК
DOI:

НАУКИ ОБ АТМОСФЕРЕ И КЛИМАТЕ
551.509.6
10.37493/2308-4758.2023.1.4

Хучунаев Б. М.,
Будаев А. Х.,
Тумгоева Х. А.

Высокогорный геофизический институт, г. Магас, Россия
Высокогорный геофизический институт, г. Магас, Россия
Ингушский государственный университет, г. Магас, Россия

ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЬДООБРАЗУЮЩИХ СВОЙСТВ
КЛАСТЕРОВ ИЗ НАНОТРУБОК ОКСИДА ЦИНКА

Введение.

В последние годы в мире растет объем средств, используемых в практике активных воздействий (АВ) на облачные процессы. Серебро, основной компонент средств АВ, является довольно дорогим металлом. Поэтому вопрос снижения содержания серебра в рецептурах пиротехнических составов или использование других эффективных льдообразующих агентов является актуальным. Оксид цинка, как и иодид серебра, обладает льдообразующими свойствами. При возгонке цинка в среде водяного пара образуются кластеры из нанотрубок различных размеров. В связи этим экспериментальные исследования механизма льдообразования на кластерах из нанотрубок оксида цинка представляются актуальной задачей. Результаты этих исследований представлены в настоящей статье.

Материалы и методы исследований.

При термической возгонке реагентов образуются наноразмерные частицы, которые объединяются в кластеры. Форма и размер этих кластеров, а также их льдообразующие свойства зависят от термодинамического состояния среды, в которой они образуются. Испытания льдообразующей эффективности таких реагентов должно проводиться в условиях таких же, как в облаках. В статье представлены результаты лабораторного моделирования образования кристаллов льда при взаимодействии кластеров оксида цинка, состоящих из нанотрубок, и результаты их сравнения с используемым на практике активных воздействий пиротехническим составом АД-1, который используется в противорадиационных изделиях (ПРИ) типа «Алазань-6» и «Алазань-9» [1].

Результаты исследований и их обсуждение.

В статье представлены аппаратура, методика проведения экспериментов по изучению льдообразующих свойств кластеров из нанотрубок оксида цинка, полученных в облачной камере при возгонке цинка в присутствии водяного пара. Эксперименты проводились на лабораторных установках в температурном диапазоне от -3 до -14 °С. Исследована эффективность реагента на основе кластеров из нанотрубок оксида цинка и проведено ее сравнение с эффективностью пиротехнического состава АД-1. Результаты исследований представлены в таблицах 1-6 и на рисунках 2-7.

Выводы.

В процессе лабораторных экспериментов выработана методика исследования льдообразующих свойств кластеров из нанотрубок оксида цинка. При возгонке пиротехнического состава АД-1 образуются частицы, имеющие диаметр от 20 нм до 400 нм с модальным значением 70 нм. Кластеры оксида цинка имеют пористую рыхлую структуру, маленькую плотность и более крупные размеры, почти на два порядка превышающие размеры частиц йодистого серебра. На них формируются ледяные кристаллы больших размеров. Суммарная площадь кристаллов, образовавшихся на кластерах из нанотрубок оксида цинка, на порядок больше, чем суммарная площадь кристаллов, образовавшихся на частицах пиротехнического состава АД-1. Реагент, состоящий из кластеров оксида цинка, по льдообразующим характеристикам сравним с пиротехническим составом АД-1 и может быть рекомендован к практическому применению.

Ключевые слова:

активные воздействия, пиротехнический состав, реагент, льдообразующие частицы, оксид цинка, кластеры из нанотрубок, температура, площадь поверхности, скорость роста.

**Khuchunaev B. M.,
Budaev A. H.,
Tumgoeva Kh. A.**

High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia
High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia
Ingush State University, Magas, Russia

Studies of Ice-forming Properties of Zinc Oxide Nanotube Clusters

Introduction.

In recent years, the volume of funds used in the practice of weather modification has been growing in the world. Silver, the main component of weather modification funds, is a rather expensive metal. Therefore, the issue of reducing the silver content in the formulations of pyrotechnic compositions or the use of other effective ice-forming agents is relevant. Zinc oxide, like silver iodide, has ice-forming properties. When zinc is sublimated in water vapor, clusters of nanotubes of various sizes are formed. In this regard, experimental studies of the mechanism of ice formation on clusters of zinc oxide nanotubes seem to be an urgent task. The results of these studies are presented in this article.

Materials and research methods.

During thermal sublimation of reagents nanoscale particles are formed. These particles combine into clusters. The shape and size of these clusters, as well as their ice-forming properties, depend on the thermodynamic state of the medium in which they are formed. Tests of the ice-forming efficiency of such reagents should be carried out in conditions in clouds.

This article presents the results of laboratory modeling of the formation of ice crystals during the interaction of zinc oxide clusters consisting of nanotubes, and the results of their comparison with the pyrotechnic composition AD-1 used in practice of weather modification, which is used in anti-hail products of the type «Alazan-6» and «Alazan-9» [1].

Research results and their discussion.

The article presents the equipment and methods of performing experiments to study the ice-forming properties of clusters of zinc oxide nanotubes obtained in a cloud chamber during zinc sublimation in the presence of water vapor. The experiments were carried out on laboratory installations in the temperature range from -3 to -14 °C. The effectiveness of a reagent based on clusters of zinc oxide nanotubes has been investigated and compared with the effectiveness of the pyrotechnic composition of AD-1. The research results are presented in Tables 1–6 and Figures 2–7.

Conclusions.

In the course of laboratory experiments, a method for studying the ice-forming properties of clusters of zinc oxide nanotubes has been developed.

When the pyrotechnic composition of AD-1 is sublimated, particles with a diameter from 20 nm to 400 nm with a modal value of 70 nm are formed. Zinc oxide clusters have a porous, loose structure, low density and larger sizes, almost two orders of magnitude larger than the sizes of silver iodide particles. Large ice crystals are formed on them.

The total area of crystals formed on clusters of zinc oxide nanotubes is an order of magnitude larger than the total area of crystals formed on particles of the pyrotechnic composition AD-1.

The reagent consisting of zinc oxide clusters is comparable in ice-forming characteristics to the pyrotechnic composition of AD-1 and can be recommended for practical use.

Key words:

weather modification, pyrotechnic composition, reagent, ice-forming particles, zinc oxide, nanotube clusters, temperature, surface area, growth rate.

Введение

Активные воздействия на облачные процессы с целью обеспечения благополучной жизнедеятельности человечества являются одной из основных задач метеорологии. Современные концепции АВ основываются на изменении микрофизической структуры облаков посредством реагентов с задаваемыми физико-химическими свойствами [7, 8]. В качестве реагентов используются в основном вещества, обладающие льдообразующими и конденсационными свойствами [13].

Мерой эффективности реагентов в настоящее время используется удельный выход льдообразующих ядер и температурный порог образования кристаллов. Удельный выход — это количество ледяных кристаллов, образующихся в облаке или тумане при заданной температуре в расчете на единицу массы вводимого вещества или с одного средства воздействия [6]. Большую роль в эффективности кристаллизации воды на частице реагента играют ее поверхностные характеристики [15]. Однако немаловажную роль играет площадь образующихся кристаллов. В данной работе для сравнения льдообразующей эффективности вышеприведенных реагентов в качестве показателя эффективности реагентов рассматриваются площадь кристаллов, удельный выход. Основной целью работы является исследование эффективности реагента на основе кластеров из нанотрубок оксида цинка и его сравнение с эффективностью пиротехнического состава АД-1.

Пиротехнический состав АД-1 используется при создании топливных зарядов маршевых ракетных двигателей, начиненных реагентом для оснащения противораковых ракет. Пиросостав АД-1 содержит 8 % иодистого серебра (AgI) и имеет порог кристаллизующей эффективности $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ [11].

В настоящее время иодид серебра остается самым эффективным льдообразующим реагентом. Удельный выход активных ядер на единицу массы AgI существенно превосходит соответствующие выходы для всех других реагентов этого типа при всех температурах активации [20]. Но реагенты на основе йодистого серебра имеют ряд недостатков: дороговизна, низкий порог кристаллизации, высокая полидисперсность, низкая термостабильность. Исследования на Северном Кавказе в период противораковых работ подтвер-

дили вымывание вносимого в облака AgI на земную поверхность [5]. Но следует отметить, что иодид серебра относится к высоко опасным веществам 2–4 классов [4].

Выход активных льдообразующих частиц с одного грамма иодида серебра в диапазоне температур от нуля и до -6°C , остается недостаточно высоким, что снижает эффективность его применения в области отрицательных температур, лежащих вблизи нулевой изотермы [2, 19]. Также следует отметить, что иодид серебра разрушается при температуре 554°C [14], в то время как температура горения различных пиротехнических и баллистических составов начинается от 1200°C [3].

Поэтому разработка новых реагентов является актуальной задачей. Оксид цинка является важным материалом благодаря своей доступности, невысокой цене, химической стабильности, биосовместимости и уникальному сочетанию химических и физических свойств [12].

При возгонке цинка в среде водяного пара образуются кластеры из нанотрубок различных размеров. В работах [16, 17, 21] было показано, что кластеры, состоящие из нанотрубок оксида цинка, обладают хорошими льдообразующими свойствами. В капиллярах нанотрубок оксида цинка вода приобретает льдоподобную структуру при более высоких температурах [22].

В связи с этим имеет важное значение разработка реагента на основе кластеров из нанотрубок оксида цинка и исследование его льдообразующих свойств.

Материалы и методы исследований

Аппаратура для исследования

льдообразующих свойств

Для проведения исследования был создан комплекс аппаратуры, схема которого представлена на рисунке 1. В комплекс аппаратуры входят: большая облачная камера, устройство для возгонки реагента, ультразвуковой парогенератор, весы, оптический микроскоп (рис. 1).

Большая облачная камера представляет собой холодильный шкаф с рабочим объемом $6,16\text{ м}^3$. Камера снабжена системой регу-

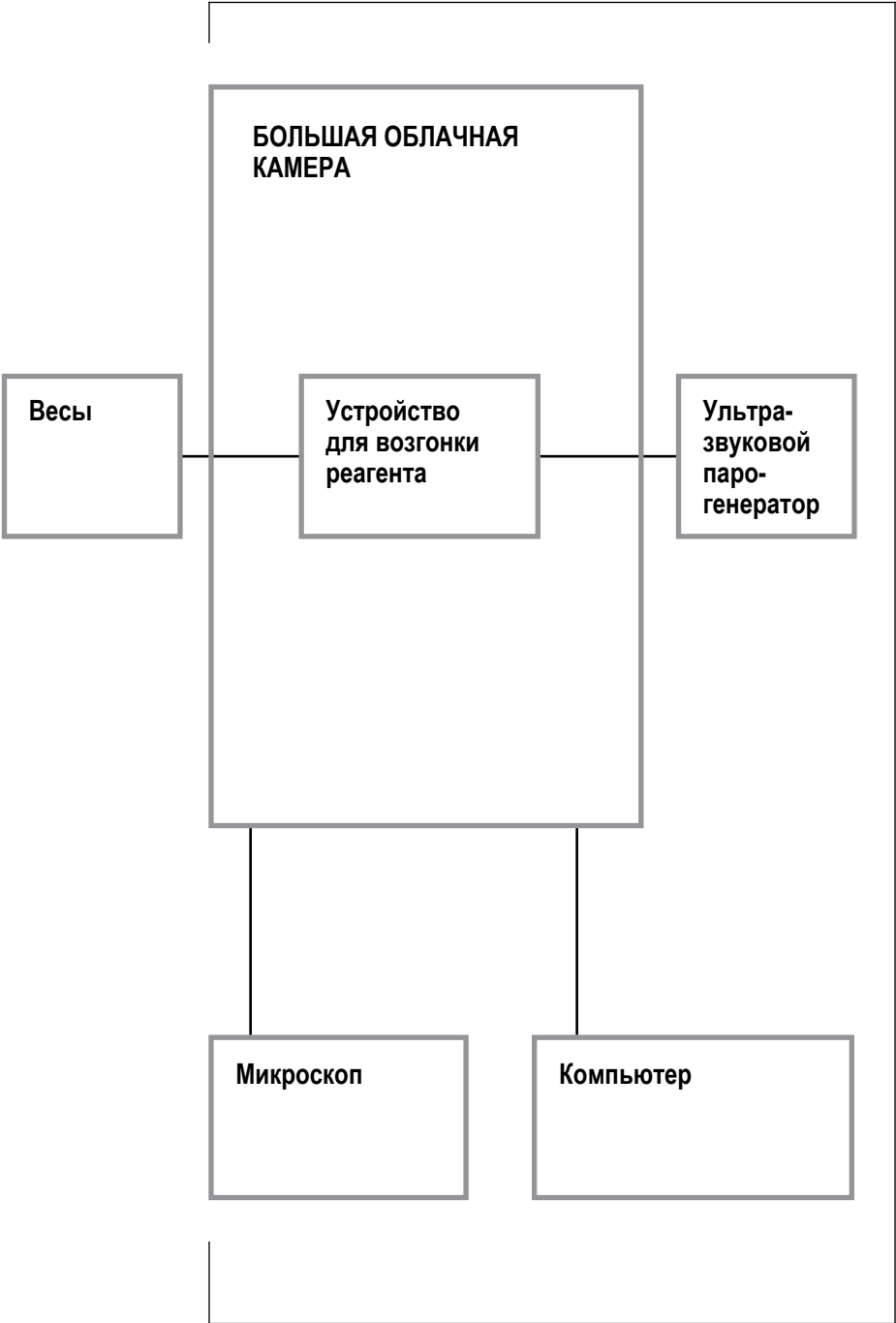


Рис. 1.

Комплекс аппаратуры для изучения льдообразующих свойства кластеров из нанотрубок оксида цинка.
Fig. 1. A set of equipment for studying the ice-forming properties of zinc oxide nanotube clusters.

лировки температуры, на которую выводятся показания термодатчика, расположенного внутри камеры. Внутри камеры расположены вентиляторы для перемешивания водяного пара и реагентов.

Ультразвуковой парогенератор размещен внутри емкости объемом 100 л, которая соединена с большой камерой при помощи трубы.

Устройство для возгонки реагента представляет собой графитовую подложку, зажатую между электродами. На электроды подается электрический ток порядка 180–200 А, подложка нагревается до температур порядка 2000–3000 °С и происходит возгонка реагента.

Термостатированные подложки для сбора кристаллов представляют собой небольшие металлические диски, к которым приклеены стекла. Подложки снабжены крышками, которые открываются в момент появления кристаллов. Кристаллы оседают на стекла подложек.

Подложки изучаются с помощью автоматизированной системы, которая состоит из оптического микроскопа, персонального компьютера и специализированного программного обеспечения. Производится расчет удельного выхода льдообразующих ядер по формуле:

$$N = \frac{\frac{S_{б.к.}}{S_{кадра}} n_{подл}}{m_{реаг}} ,$$

где $S_{б.к.}$ — площадь камеры внесения реагента, мкм²;
 $S_{кадра}$ — площадь кадра на поле зрения микроскопа, мкм²;
 $m_{реаг.}$ — масса внесенного реагента, г;
 $n_{подл.}$ — количество кристаллов в кадре, м⁻².

Результаты исследований и их обсуждение

Проведены серии экспериментов по изучению льдообразующих свойств кластеров из нанотрубок оксида цинка и частиц пиротехнического состава АД-1. Эксперименты проводились в температурном диапазоне от –3 до –14 °С.

В таблицах 1, 2 и на рисунках 2, 3 представлены данные о площади ледяных кристаллов, которые образовались на кластерах из нанотрубок оксида цинка и на частицах пиротехнического состава АД-1 в разных диапазонах температуры. Приведены соотношения кристаллов по различным диапазонам размеров, $n_{кр}/n$, %.

Table 1. ЗАВИСИМОСТЬ РАЗМЕРОВ ЛЕДЯНЫХ КРИСТАЛЛОВ, ОБРАЗОВАВШИХСЯ НА КЛАСТЕРАХ ИЗ НАНОТРУБОК ОКСИДА ЦИНКА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Таблица 1. Dependence of the size of ice crystals formed on clusters of zinc oxide nanotubes on the temperature

S, мкм²	Соотношение кристаллов при различных значениях температуры, $n_{кр}/n$, %			
	-12...-14 °C	-9...-11 °C	-6...-8 °C	-3...-5 °C
0–2000	6,5	55,2	70,0	39,0
2000–4000	26,1	15,5	16,7	33,9
4000–6000	17,4	5,2	10,0	10,2
6000–8000	10,9	12,1	3,3	3,4
8000–10000	8,7	3,4	0,0	3,4
10000–12000	2,2	1,7	0,0	0,0
12000–14000	10,9	1,7	0,0	0,0
14000–16000	0,0	1,7	0,0	5,1
16000–18000	10,9	1,7	0,0	1,7
18000–20000	2,2	0,0	0,0	1,7
20000–22000	4,3	1,7	0,0	1,7
Удельный выход, г ⁻¹	$3,3 \cdot 10^{13}$	$2,4 \cdot 10^{13}$	$1,2 \cdot 10^{13}$	$7,3 \cdot 10^{12}$

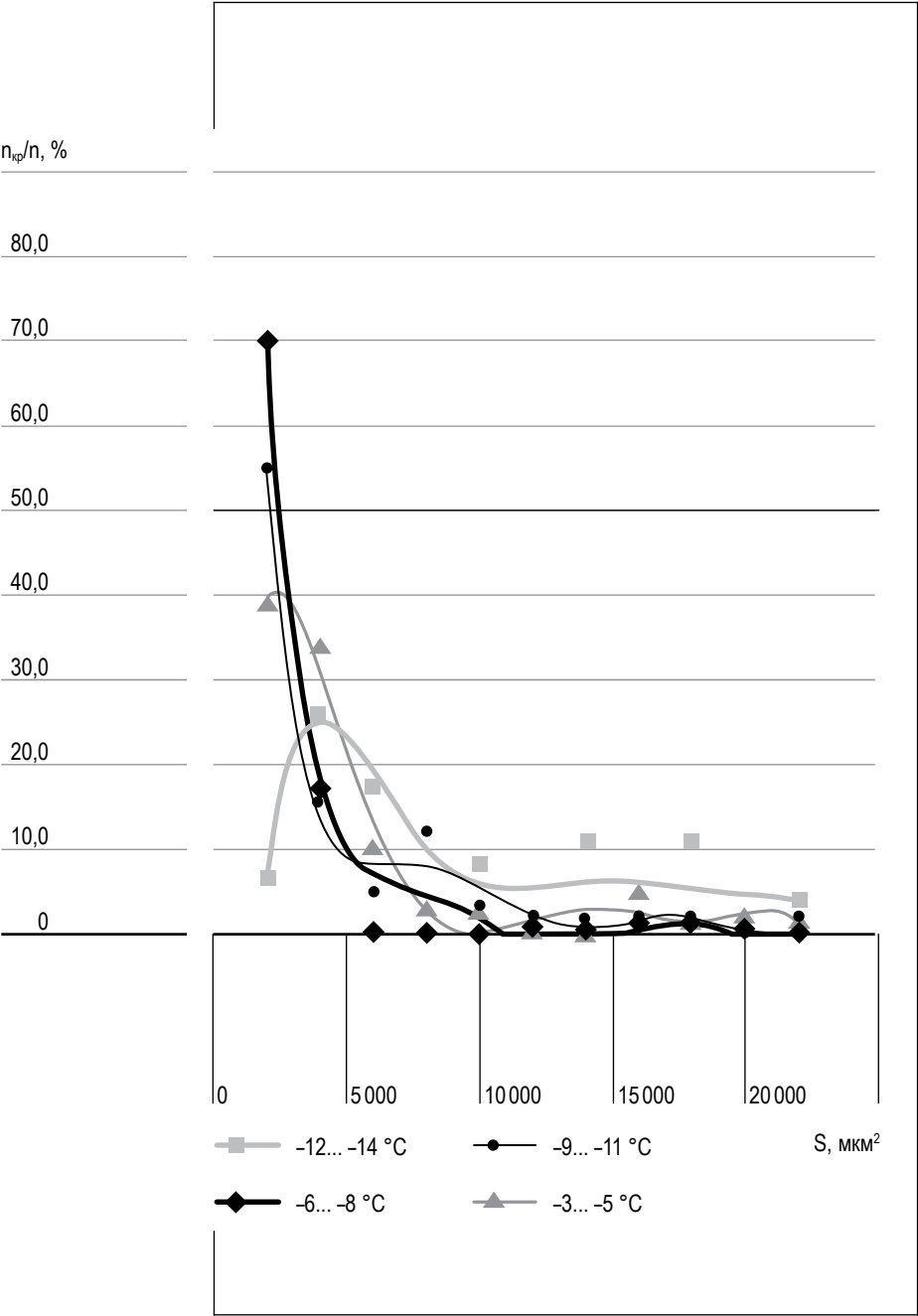


Рис. 2. Зависимость размеров ледяных кристаллов, образовавшихся на кластерах из нанотрубок оксида цинка от температуры.

Fig. 2. Dependence of the size of ice crystals formed on clusters of zinc oxide nanotubes on the temperature.

Таблица 2. ЗАВИСИМОСТЬ РАЗМЕРОВ ЛЕДЯНЫХ КРИСТАЛЛОВ, ОБРАЗОВАВШИХСЯ НА ЧАСТИЦАХ ПИРОСОСТАВА АД-1 ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ
Table 2. Dependence of the size of ice crystals formed on the particles of the pyrotechnic composition of AD-1 on the temperature

S, мкм ²	Соотношение кристаллов при различных значениях температуры, n _{кр} /n, %			
	-12...-14 °C	-9...-11 °C	-6...-8 °C	-3...-5 °C
0–2000	26,7	40,0	78,2	29,5
2000–4000	26,7	25,0	21,8	39,3
4000–6000	23,3	16,7	0,0	24,6
6000–8000	6,7	6,7	0,0	3,3
8000–10000	6,7	1,7	0,0	1,6
10000–12000	3,3	1,7	0,0	0,0
12000–14000	1,7	3,3	0,0	0,0
14000–16000	0,0	1,7	0,0	1,6
16000–18000	1,7	3,3	0,0	0,0
18000–20000	1,7	0,0	0,0	0,0
20000–22000	1,7	0,0	0,0	0,0
Удельный выход, г ⁻¹	4,8·10 ¹²	3,5·10 ¹²	3,0·10 ¹²	7,0·10 ¹¹

В таблицах 3, 4 и на рисунках 4, 5 представлены данные о накопленных частотах соотношений кристаллов, которые образовались на кластерах из нанотрубок оксида цинка и на частицах пиротехнического состава АД-1 в разных диапазонах температуры, n_{кр}/n, %.

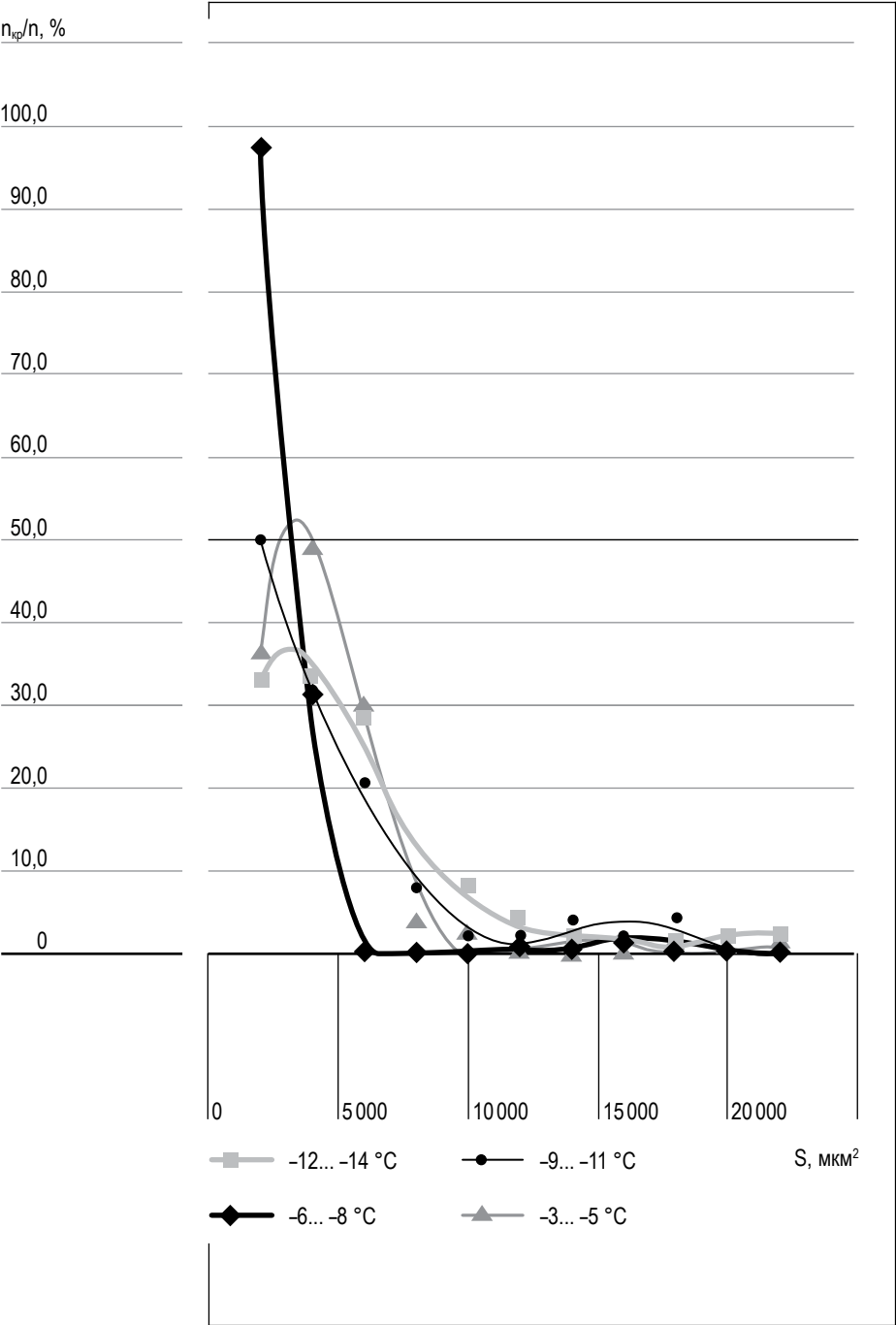


Рис. 3. Зависимость размеров ледяных кристаллов, образовавшихся на частицах пиросостава АД-1 от температуры.
Fig. 3. Dependence of the specific yield of particles of the pyrotechnic composition AD-1 on the electric field strength.

Таблица 3.

НАКОПЛЕННЫЕ ЧАСТОТЫ СООТНОШЕНИЙ КРИСТАЛЛОВ,
ОБРАЗОВАВШИХСЯ НА КЛАСТЕРАХ
ИЗ НАНОТРУБОК ОКСИДА ЦИНКА

Table 3. Cumulative frequencies of crystal ratios formed on clusters
of zinc oxide nanotubes

S, мкм²	Соотношение кристаллов при различных значениях температуры, n _{кр} /n, %			
	-12...-14 °C	-9...-11 °C	-6...-8 °C	-3...-5 °C
0-2000	6,5	55,2	70,0	39,0
2000-4000	32,6	70,7	86,7	72,9
4000-6000	50,0	75,9	96,7	83,1
6000-8000	60,9	88,0	100,0	86,5
8000-10000	69,6	91,4	100,0	89,9
10000-12000	71,8	93,1	100,0	89,9
12000-14000	82,7	94,8	100,0	89,9
14000-16000	82,7	96,5	100,0	95,0
16000-18000	93,6	98,2	100,0	96,7
18000-20000	95,8	98,2	100,0	98,4
20000-22000	100,0	100,0	100,0	100,0

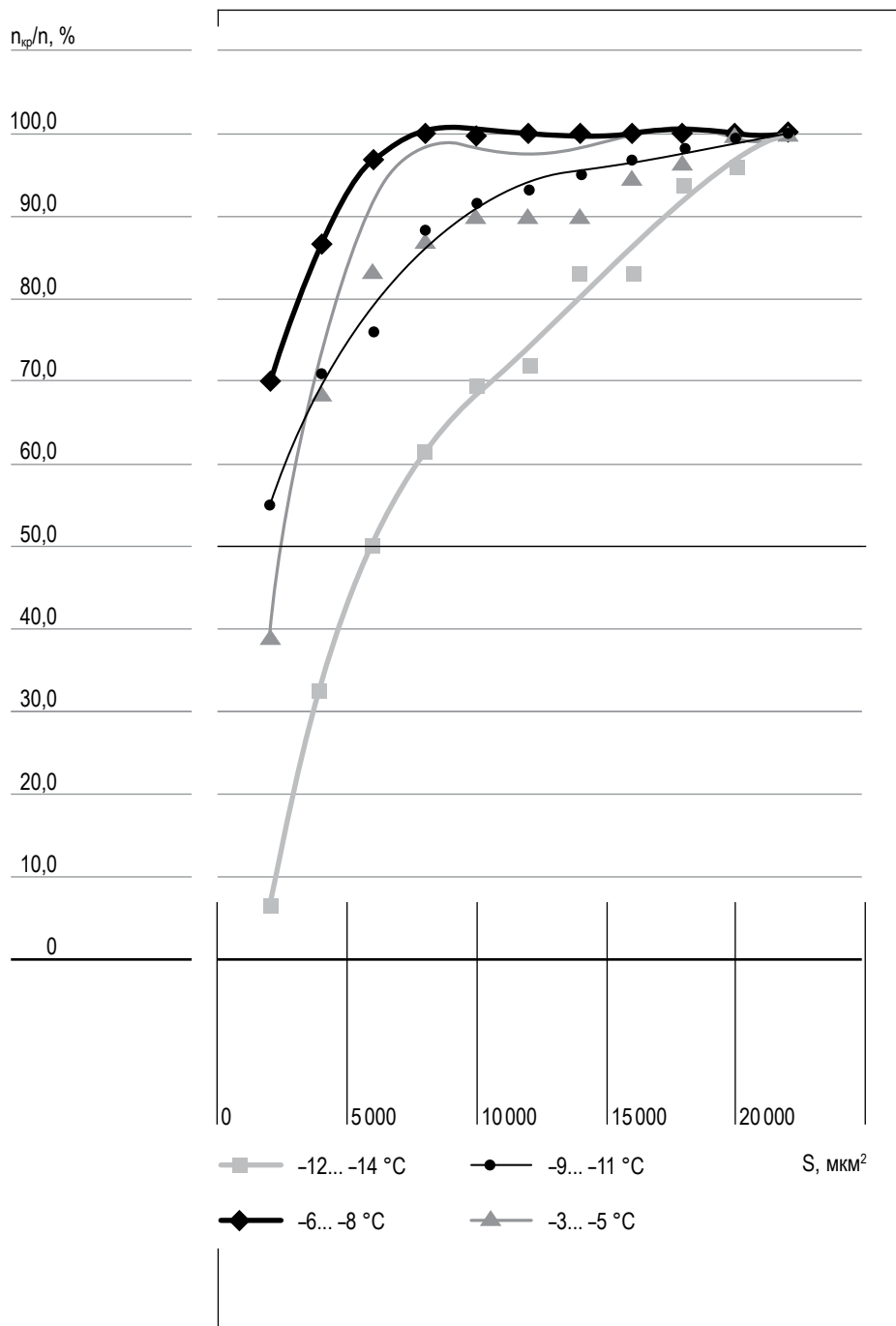


Рис. 4.

Накопленные частоты соотношений кристаллов, образовавшихся на кластерах из нанотрубок оксида цинка.

Fig. 4. Cumulative frequencies of crystal ratios formed on clusters of zinc oxide nanotubes.

Таблица 4. НАКОПЛЕННЫЕ ЧАСТОТЫ СООТНОШЕНИЙ КРИСТАЛЛОВ, ОБРАЗОВАВШИХСЯ НА ЧАСТИЦАХ ПИРОТЕХНИЧЕСКОГО СОСТАВА АД-1
Table 4. Cumulative frequencies of crystal ratios formed on particles of pyrotechnic composition AD-1

S, мкм²	Соотношение кристаллов при различных значениях температуры, n _{кр} /n, %			
	–12...–14 °С	–9...–11 °С	–6...–8 °С	–3...–5 °С
0–2000	26,7	40,0	78,2	29,5
2000–4000	53,4	65,0	100,0	68,8
4000–6000	76,7	81,7	100,0	93,4
6000–8000	83,4	88,4	100,0	96,7
8000–10000	90,1	90,1	100,0	98,3
10000–12000	93,4	91,8	100,0	98,3
12000–14000	95,1	95,1	100,0	98,3
14000–16000	95,1	96,8	100,0	100,0
16000–18000	96,8	100,0	100,0	100,0
18000–20000	98,5	100,0	100,0	100,0
20000–22000	100,0	100,0	100,0	100,0

Как видно из вышеприведенных данных, до 90 % ледяных кристаллов, образовавшихся на частицах пиросостава АД-1, имеет площадь поверхности до 10⁴ мкм² при температурах от –9 до –14 °С. При температурах порядка –3...–5 °С доля ледяных кристаллов, имеющих площадь поверхности до 8·10³ мкм²,

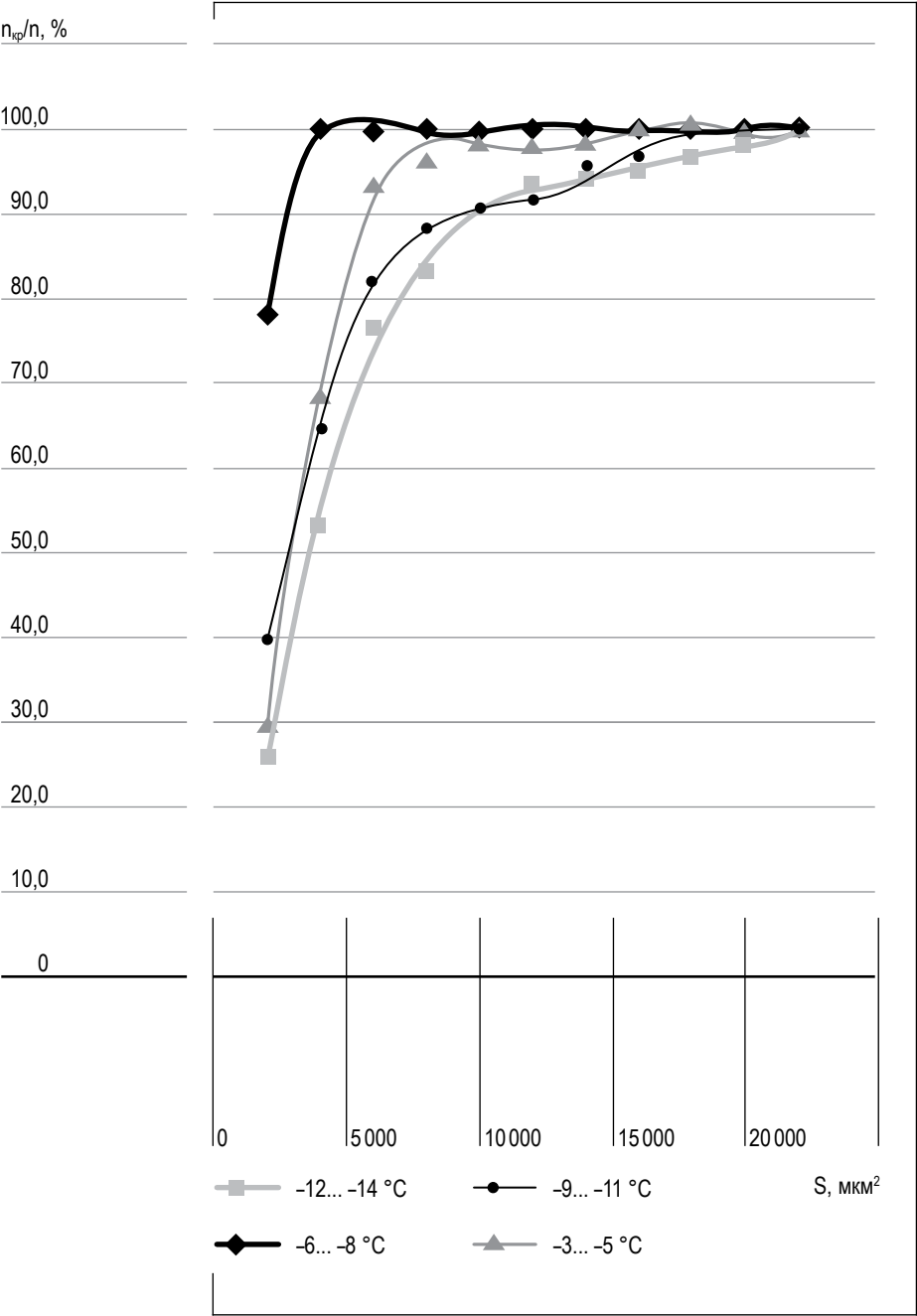


Рис. 5. Накопленные частоты соотношений кристаллов, образовавшихся на частицах пиротехнического состава АД-1.
Fig. 5. Cumulative frequencies of crystal ratios formed on particles of pyrotechnic composition AD-1.

достигает 95 %. При температурах порядка $-6...-8$ °C формируются самые маленькие кристаллы, имеющие площадь поверхности, не превышающую $4 \cdot 10^3$ мкм².

Ледяные кристаллы, образовавшиеся на кластерах из нанотрубок оксида цинка, имеют большие размеры. При температурах $-12...-14$ °C половина ледяных кристаллов имеет площадь от $6 \cdot 10^3$ до $2,2 \cdot 10^4$ мкм². В температурных диапазонах $-3...-5$ °C и $-9...-11$ °C 90 % ледяных кристаллов имеет площадь поверхности до 10^4 мкм². При температурах $-6...-8$ °C все кристаллы имеют площадь поверхности до $8 \cdot 10^3$ мкм².

При возгонке пиротехнического состава АД-1 образуются частицы, имеющие диаметр от 20 нм до 400 нм с модальным значением 70 нм. При этом практически 100%-ная активность иодида серебра наблюдается при наличии частиц диаметром 50 нм [18]. Кластеры оксида цинка имеют пористую рыхлую структуру, маленькую плотность и более крупные размеры, почти на два порядка превышающие размеры частиц йодистого серебра. Соответственно, на них формируются ледяные кристаллы больших размеров.

В таблице 5 приводятся суммарная площадь кристаллов, которые образовались на кластерах из нанотрубок оксида цинка и частицах пиротехнического состава АД-1 в различных температурных диапазонах.

Как видно из вышеприведенных данных, суммарная площадь кристаллов, образовавшихся на кластерах из нанотрубок оксида цинка, на порядок больше, чем суммарная площадь кристаллов, образовавшихся на частицах пиротехнического состава АД-1. Минимальное значение площадей для кластеров оксида цинка и для пиросостава АД-1 наблюдается при температурах $-4...-7$ °C. Результаты проведенных исследований показали, что реагент, состоящий из кластеров оксида цинка, полученных при возгонке цинка в среде водяного пара, по своим льдообразующим характеристикам сравним с пиротехническим составом АД-1 и может быть рекомендован к практическому применению. По стоимости такой реагент гораздо дешевле, чем реагенты на основе AgI.

Таблица 5. СУММАРНАЯ ПЛОЩАДЬ КРИСТАЛЛОВ, КОТОРЫЕ ОБРАЗОВАЛИСЬ НА КЛАСТЕРАХ ИЗ НАНОТРУБОК ОКСИДА ЦИНКА В РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДИАПАЗОНАХ

Table 5. The total area of crystals formed on clusters of zinc oxide nanotubes in different temperature ranges

S, мкм ²	Площадь кристаллов, · 10 ¹⁵ мкм ²			
	-12...-14 °C	-9...-11 °C	-6...-8 °C	-3...-5 °C
0–2000	2,13	13,08	8,61	2,85
2000–4000	25,60	11,02	616,23	7,42
4000–6000	28,45	6,16	615,00	3,72
6000–8000	24,95	20,07	284,13	1,74
8000–10000	25,60	7,25	0,0	2,23
10000–12000	7,91	4,43	0,0	0,0
12000–14000	46,34	5,24	0,0	0,0
14000–16000	0,0	6,04	0,0	5,58
16000–18000	60,59	6,85	0,0	2,11
18000–20000	13,67	0,0	0,0	2,36
20000–22000	29,53	8,46	0,0	2,61
	Суммарная площадь, · 10 ¹⁶ мкм ²			
	26,48	8,86	2,38	3,06

Таблица 6. СУММАРНАЯ ПЛОЩАДЬ КРИСТАЛЛОВ, КОТОРЫЕ ОБРАЗОВАЛИСЬ НА ЧАСТИЦАХ ПИРОТЕХНИЧЕСКОГО СОСТАВА АД-1 В РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДИАПАЗОНАХ

Table 6. The total area of crystals formed on the particles of the pyrotechnic composition of AD-1 in different temperature ranges

S, мкм ²	Площадь кристаллов, ·10 ² мкм ²			
	-12...-14 °C	-9...-11 °C	-6...-8 °C	-3...-5 °C
0-2000	12,74	14,00	23,46	2,07
2000-4000	38,21	26,25	19,62	8,25
4000-6000	55,57	29,23	0,0	8,61
6000-8000	22,37	16,42	0,0	1,62
8000-10000	28,76	5,36	0,0	1,01
10000-12000	17,32	6,55	0,0	0,0
12000-14000	10,54	15,02	0,0	0,0
14000-16000	0,0	8,93	0,0	1,68
16000-18000	13,79	19,64	0,0	0,0
18000-20000	15,41	0,0	0,0	0,0
20000-22000	17,03	0,0	0,0	0,0
	Суммарная площадь, ·10 ¹⁶ мкм ²			
	2,317	1,414	0,431	0,232

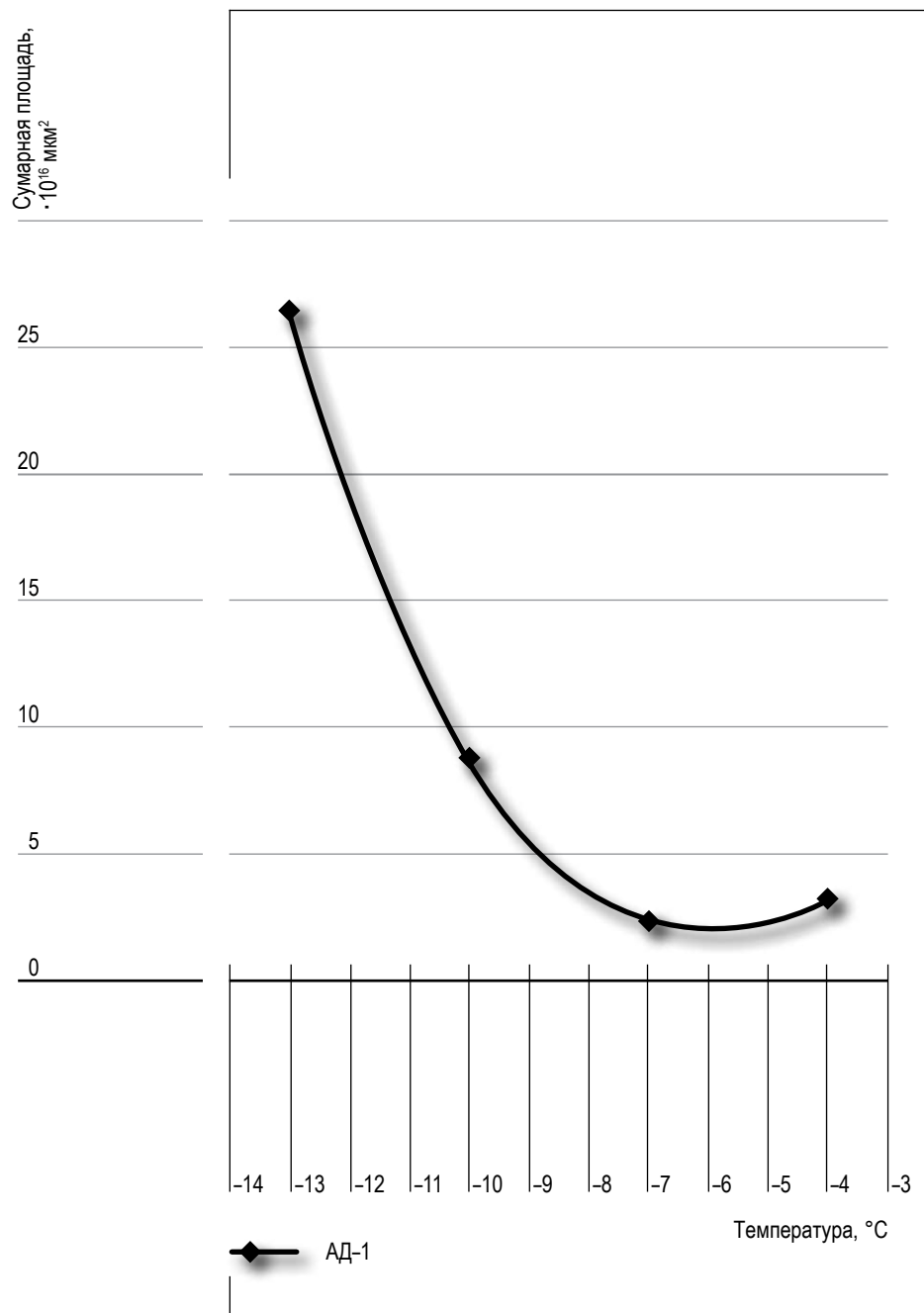


Рис. 6.

Распределение суммарной площади кристаллов, образовавшихся на кластерах из нанотрубок оксида цинка, по температуре.

Fig. 6. Distribution of the total area of crystals formed on clusters of zinc oxide nanotubes by temperature.

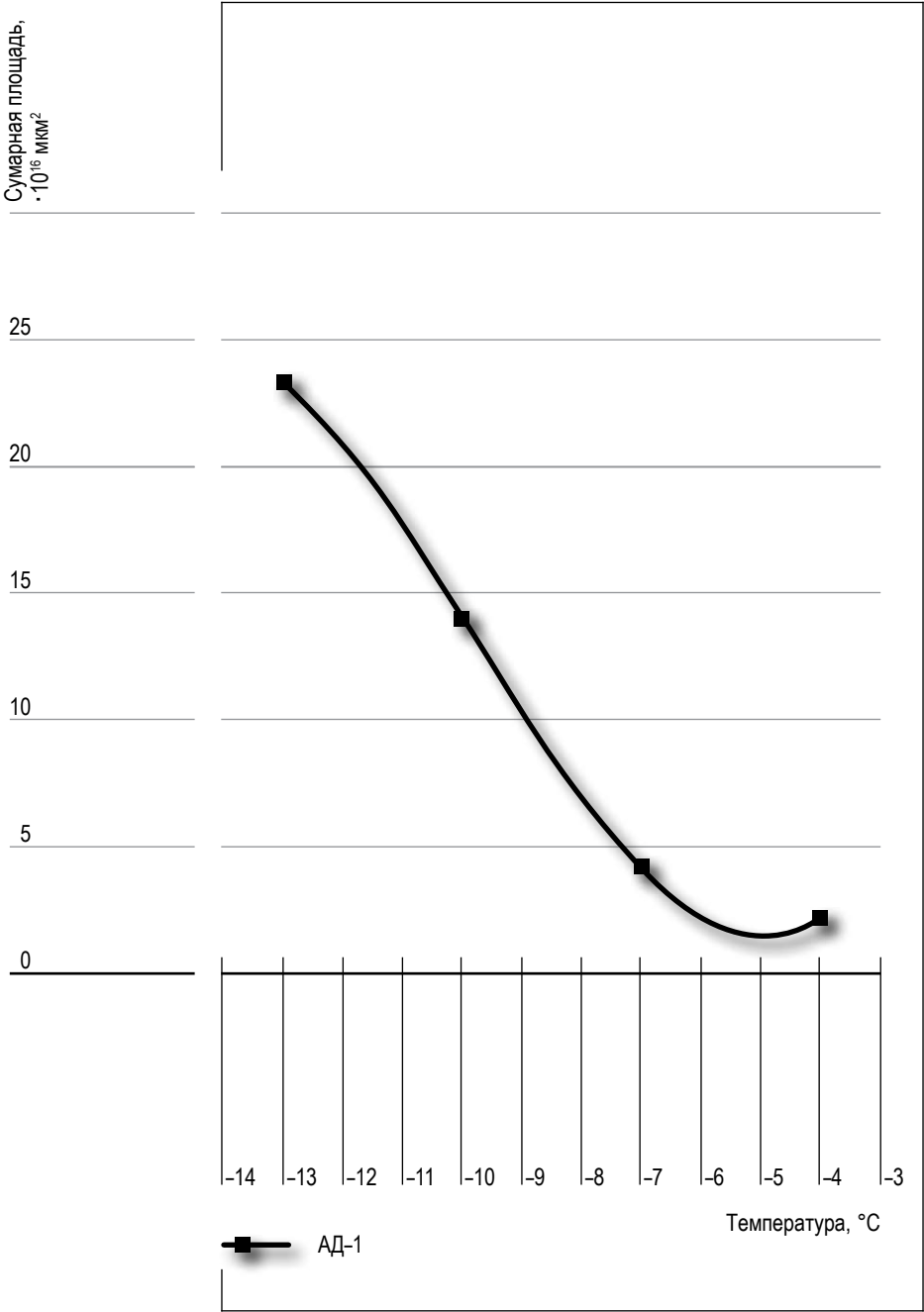


Рис. 7.

Распределение суммарной площади кристаллов, образовавшихся на частицах пиротехнического состава АД-1, по температуре.

Fig. 7. Distribution of the total area of crystals formed on particles of the pyrotechnic composition AD-1 by temperature.

При этом, как показали исследования, реагент на основе оксида цинка будет обладать высокой агрегируемостью исходных наночастиц. Как показано в работе [9], даже после непродолжительного хранения агрегаты могут достигать 1 мкм в диаметре. Поскольку применение наноразмерных реагентов в силу целого ряда их преимуществ перед пиротехническими составами представляется перспективным, то дальнейшие исследования при разработке таких реагентов следует направить на снижение степени их агрегируемости.

Выводы

В процессе лабораторных экспериментов выработана методика исследования льдообразующих свойств кластеров из нанотрубок оксида цинка.

При возгонке пиротехнического состава АД-1 образуются частицы, имеющие диаметр от 20 нм до 400 нм с модальным значением 70 нм. Практически 100 %-ная активность иодида серебра наблюдается при наличии частиц диаметром 50 нм. Кластеры оксида цинка имеют пористую рыхлую структуру, маленькую плотность и более крупные размеры, почти на два порядка превышающие размеры частиц йодистого серебра. На них формируются ледяные кристаллы больших размеров.

До 90 % ледяных кристаллов, образовавшихся на частицах пиросостава АД-1, имеет площадь поверхности до 10^4 мкм² при температурах от -9 до -14 °С. При температурах порядка $-3...-5$ °С доля ледяных кристаллов, имеющих площадь поверхности до $8 \cdot 10^3$ мкм², достигает 95 %. При температурах порядка $-6...-8$ °С формируются самые маленькие кристаллы, имеющие площадь поверхности, не превышающую $4 \cdot 10^3$ мкм².

Ледяные кристаллы, образовавшиеся на кластерах из нанотрубок оксида цинка, имеют большие размеры. При температурах $-12...-14$ °С половина ледяных кристаллов имеет площадь от $6 \cdot 10^3$ до $2,2 \cdot 10^4$ мкм². В температурных диапазонах $-3...-5$ °С и $-9...-11$ °С 90 % ледяных кристаллов имеет площадь поверхности до 10^4 мкм². При температурах $-6...-8$ °С все кристаллы имеют площадь поверхности до $8 \cdot 10^3$ мкм².

Суммарная площадь кристаллов, образовавшихся на кластерах из нанотрубок оксида цинка, на порядок больше, чем суммарная площадь кристаллов, образовавшихся на частицах пиротехнического состава АД-1. Минимальное значение площадей для кластеров оксида цинка и для пиросостава АД-1 наблюдается при температурах $-4...-7$ °С. Результаты проведенных исследований показали, что реагент, состоящий из кластеров оксида цинка, полученных при возгонке цинка в среде водяного пара, по своим льдообразующим характеристикам сравним с пиротехническим составом АД-1 и может быть рекомендован к практическому применению. По стоимости такой реагент гораздо дешевле, чем реагенты на основе AgI.

Библиографический список

1. Абшаев А.М., Абшаев М.Т. и др. Руководство по организации и проведению противоградовых работ. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Нальчик, 2014. 315 с.
2. Аверкина А.С., Кондрашова Н.Б., Вальцифер В.А. Получение гибридных порошковых материалов AgI-SiO₂, их свойства и применение в качестве осадкопреобразующих реагентов // Вестник Технологического университета. 2022. Т. 25. № 7. С. 31–37.
3. Аликин В.Н., Вахрушев А.В., Голубчиков В.Б., Ермилов А.С., Липанов А.М., Серебренников С.Ю. Твердые топлива реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 2011. 380 с.
4. Ватиашвили М.Р. Оценка влияния на окружающую среду йодистого серебра, применяемого в противоградовой защите // Наука. Инновации. Технологии. 2018. № 2. С. 7–24.
5. Гаджиева М.М. Содержание йода в атмосферных осадках в районе активных воздействий // Тр. ВГИ, 1987. Вып. 69. С. 87–92.
6. Данелян Б.Г., Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Аджиев А.Х., Иванов В.Н., Дрофа А.С., Козлов В.Н. РД 52.11.850–2016. Термины и определения в области активных воздействий на гидрометеорологические процессы и явления / Введ. 2016-07-04. М.: ЦАО, 2016. 44 с.
7. Деннис А. Изменение погоды засевом облаков / пер. с англ. А.В. Лысака, Е.Д. Стукина. М.: Мир, 1983. 272 с.

8. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 455 с.
9. Ким Н.С., Корнеев В.П., Петрунин А.М., Частухин А.В., Воронин Е.Ф. Исследование эффективности наноразмерных порошкообразных льдообразующих реагентов // Гидрометеорология и экология. 2020. № 58. С. 31–40.
10. Ким Н.С., Корнеев В.П., Частухин А.В., Щукин Г.Г. Экологические аспекты российских технологий активных воздействий на облака // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 46. С. 91–99.
11. Ким Н.С., Шилин А.Г., Поносов В.С., Резников М.С., Шакиров И.Н., Несмеянов П.А., Дубинин Б.Н., Стасенко В.Н., Корнеев В.П. Пиротехнический состав для активного воздействия на переохлажденные облака и туманы // Патент на изобретение RU 2309439 C1, 27.10.2007. Заявка №2006121150/28 от 14.06.2006.
12. Ключко Н.П., Хрипунов Г.С., Мягченко Ю.А., Мельничук Е.Е., Копач В.Р., Клепикова Е.С., Любов В.Н., Копач А.В. Управление морфологией и свойствами наноструктур оксида цинка, изготавливаемых методом импульсного электрохимического осаждения // Журнал нано- та електронної фізики. 2014. № 4. С. 21–29.
13. Колосков Б.П., Корнеев В.П., Щукин Г.Г. Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов: моногр. СПб., 2012. 341 с.
14. Лидин Р.А., Молочко В.А., Андреева Л.Л. Химические свойства неорганических веществ. М.: Химия, 2000. 480 с.
15. Никулин В.Н., Чукин В.В., Садыкова А.Ф. Экспериментальные установки для исследования образования льда в атмосфере // Ученые записки РГГМУ. 2015. № 38. С. 102–112.
16. Таппасханов В.О., Хучунаев Б.М., Тлисов М.И., Хучунаев А.Б., Куповых Г.В. Предварительные результаты исследования конденсационных и льдообразующих свойств нанотрубок AgI и оксида цинка // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. № 6. 2014. С. 40–43.
17. Хучунаев Б.М., Куповых Г.В., Ташилова А.А., Теунова Н.В., Хучунаев А.Б., Будаев А.Х. Исследование льдообразующих свойств нанотрубок оксида цинка // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. 2018. № 4. С. 111–115.
18. Шилин А.Г., Хучунаев Б.М. Возможности увеличения эффективности пиротехнических генераторов льдообразу-

- ющего аэрозоля // Наука. Инновации. Технологии. 2022. № 1. С. 87–110.
19. Шилин В.А. Исследование процессов образования гляциогенных аэрозолей из систем с пониженным содержанием серебра: дис. ... канд. ф.-м. наук: 25.00.30. Нальчик, 2018. 129 с.
 20. Fukuta N. Paik Y. Water adsorption and ice nucleation on silver iodide surfaces // J. Appl. Phys. 2014. V. 141. P. 1092–1100.
 21. Khuchunaev B., Baysiev Kh-M., Gekkieva S., Budaev A. Researches of ice-forming efficiency of products of sublimation of pyrotechnic compositions consisting of Silver Iodide particles and Zinc Oxide nanotubes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. 1083. 012097.
 22. Pascal T.A., Goddard W.A., Jung Y. Entropy and the driving force for the filling of carbon nanotubes with water. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2011. Jul 19; 108(29):11794-8. doi: 10.1073/pnas.1108073108. Epub 2011 Jun 27. PMID: 21709268; PMCID: PMC3141970

References

1. Abshaev A.M., Abshaev M.T. et al. Guidelines for the organization and conduct of anti-hail works. Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet). Nalchik, 2014. 315 p. (In Russian).
2. Averkina A.S., Kondrashova N.B., Valcifer V.A. Obtaining hybrid powder materials AgI-SiO₂, their properties and application as sedimentary reagents // Bulletin of the Technological University. 2022. Vol. 25. No. 7. P. 31–37. (In Russian).
3. Alikin V.N., Vakhrushev A.V., Golubchikov V.B., Ermilov A.S., Lipanov A.M., Serebrennikov S.Yu. Solid propellants for jet engines. Moscow: Mashinostroenie, 2011. 380 p. (In Russian).
4. Vatiashvili M.R. Assessment of the environmental impact of silver iodide used in anti-hail protection // Science. Innovations. Technologies. No. 2. 2018. P. 7–24. (Russian).
5. Gadzhieva M.M. Iodine content in atmospheric precipitation in the area of active influences // Tr. VGI, 1987. Issue 69. P. 87–92. (In Russian).
6. Danelyan B.G., Abshaev M.T., Abshaev A.M., Adzhiev A.H., Ivanov V.N., Bustard A.S., Kozlov V.N. RD 52.11.850–2016. Terms and definitions in the field of active impacts on hydro-

- meteorological processes and phenomena / Introduction. 2016-07-04. Moscow: CAO, 2016. 44 p. (In Russian).
7. Dennis A. Changing the weather by seeding clouds / Translated from English by A.V. Lysaka, E.D. Stukina. M.: Mir, 1983. 272 p. (In Russian).
 8. Kachurin L.G. Physical bases of influence on atmospheric processes. L.: Hydrometeoizdat, 1978. 455 p. (In Russian).
 9. Kim N.S., Korneev V.P., Petrunin A.M., Chastukhin A.V., Voronin E.F. Investigation of the effectiveness of nanoscale powdered ice-forming reagents // Hydrometeorology and ecology. 2020. No. 58. P. 31–40. (In Russian).
 10. Kim N.S., Korneev V.P., Chastukhin A.V., Shchukin G.G. Ecological aspects of Russian technologies of active impacts on clouds // Scientific Notes of RSMU. 2016. No. 46. P. 91–99. (In Russian).
 11. Kim N.S., Shilin A.G., Ponomarev V.S., Reznikov M.S., Shakhmurov I.N., Nesmeyanov P.A., Dubinin B.N., Stasenko V.N., Korneev V.P. Pyrotechnic composition for active exposure to supercooled clouds and fogs // Patent for invention RU 2309439 C1, 27.10.2007. Application No. 2006121150/28 dated 14.06.2006. (In Russian).
 12. Klochko N.P., Khripunov G.S., Myagchenko Yu.A., Melnichuk E.E., Kopach V.R., Klepikova E.S., Lyubov V.N., Kopach A.V. Management of morphology and properties of zinc oxide nanostructures manufactured by pulsed electrochemical deposition // Journal of nano and electronic physics. 2014. No. 4. P. 21–29. (In Russian).
 13. Koloskov B.P., Korneev V.P., Shchukin G.G. Methods and means of modification of clouds, precipitation and fogs: monogr. SPb., 2012. 341 p. (In Russian).
 14. Lidin R.A., Molochko V.A., Andreeva L.L. Chemical properties of inorganic substances. M.: Chemistry, 2000. 480 p. (In Russian).
 15. Nikulin V.N., Chukin V.V., Sadykova A.F. Experimental installations for the study of ice formation in the atmosphere // Scientific notes of RSHMU. 2015. № 38. P. 102–112. (Russian).
 16. Tappaskhanov V.O., Khuchunaev B.M., Tlisov M.I., Khuchunaev A.B., Kupovykh G.V. Preliminary results of the study of condensation and ice-forming properties of AgI nanotubes and zinc oxide // News of universities. North Caucasus region. No. 6. 2014. P. 40–43. (In Russian).

17. Khuchunaev B.M., Kupovykh G.V., Tashilova A.A., Teunova N.V., Khuchunaev A.B., Budaev A.H. Investigation of ice-forming properties of zinc oxide nanotubes // News of universities. North Caucasus region. 2018. No. 4. P. 111–115. (In Russian).
18. Shilin A.G., Khuchunaev B.M. Possibilities of increasing the efficiency of pyrotechnic generators of ice-forming aerosol // Science. Innovations. Technologies. No. 1. 2022. P. 87–110. (In Russian).
19. Shilin V.A. Investigation of the formation of glaciogenic aerosols from systems with a reduced silver content / dis. for the degree of Candidate of Sciences: 25.00.30. N., 2018. 129 p. (In Russian).
20. Fukuta N. Paik Y. Water adsorption and ice nucleation on silver iodide surfaces // J. Appl. Phys. 2014. No. 141. P. 1092–1100.
21. Khuchunaev B., Baysiev Kh-M., Gekkieva S., Budaev A. Researches of ice-forming efficiency of products of sublimation of pyrotechnic compositions consisting of Silver Iodide particles and Zinc Oxide nanotubes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. 1083. 012097.
22. Pascal T.A., Goddard W.A., Jung Y. Entropy and the driving force for the filling of carbon nanotubes with water. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2011. Jul 19; 108(29):11794-8. DOI: 10.1073/pnas.1108073108. Epub 2011 Jun 27. PMID: 21709268; PMCID: PMC3141970

**Поступила в редакцию 12.11.2022,
принята к публикации 24.01.2023.**

Об авторах

Хучунаев Бузигит Муссаевич, д-р физ.-мат. наук, зав. лаб. Высокогорный геофизический институт.

E-mail: buzgigit@mail.ru

Будаев Алим Хадисович, МНС лаб. Высокогорный геофизический институт.

E-mail: budayalim@yandex.ru

Тумгоева Хадижат Абукаровна, канд. физ.-мат. наук. Ингушский государственный университет.

E-mail: tumgoeva_75@mail.ru

About the authors

Khuchunaev Buzigit Mussayevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory, High-Mountain Geophysical Institute.

E-mail: buzgigit@mail.ru

Budaev Alim Hadisovich, Junior Researcher of the Laboratory of Clouds Microphysics High-Mountain Geophysical Institute.

E-mail: budayalim@yandex.ru

Tumgoeva Khadizhat Abukarovna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Ingush State University.

E-mail: tumgoeva_75@mail.ru